



**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE YÜZEY
BÜTÜNLÜĞÜNÜN YORULMA ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ramazan ÇAKIROĞLU

**2020
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE YÜZEY
BÜTÜNLÜĞÜNÜN YORULMA ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ramazan ÇAKIROĞLU

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**KARABÜK
Temmuz 2020**

Ramazan ÇAKIROĞLU tarafından hazırlanan “ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN YORULMA ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Mekine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 03/07/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Yakup TURGUT (GÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Alaattin KAÇAL (DPÜ)

.....

...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ramazan ÇAKIROĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNÜN YORULMA ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ramazan ÇAKIROĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Temmuz 2020, 98 sayfa

Bu çalışmada, elektro erozyon ile tornalamada (EET) işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve işlenmiş parçanın yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, iş parçasının dönmesini sağlamak amacıyla bir mekanizma tasarlanarak imal edilmiştir. EET deneyleri, AISI L2 takım çeliği üzerinde üç farklı boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi ile sabit devir sayısı kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, L₉ dikey dizisine göre gerçekleştirilmiş olup, işleme performans çıktıları olarak İİH, EAH, Ra, Rz, Sm ve mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Daha sonra numunelere dönел eğilmeli yorulma dayanım testi uygulanmıştır. Elde edilen deneysel yorulma dayanım sonuçları teorik yorulma hesaplamalarında kullanılan \sqrt{area} modeli ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, boşalım akımı ve vurum süresinin artışıyla İİH, EAH, Ra, Rz ve Sm değerlerinin arttığı belirlenmiştir. En düşük Ra, Rz ve Sm değerleri düşük boşalım akımı ve düşük vurum sürelerinde elde edilmiştir. Buna paralel olarak düşük boşalım akımı ve düşük vurum sürelerinin

yorulma dayanım sınırını artırdığı tespit edilmiştir. En büyük yorulma dayanımı, 3 A boşalım akımı, 3 µs vurum süresi ve 7 µs bekleme süresinin olduğu durumda 591 MPa olarak elde edilirken; en küçük yorulma dayanımı ise, 12 A boşalım akımı, 8 µs vurum süresi ve 6 µs bekleme süresinin olduğu durumda 383 MPa olarak elde edilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırıldığında, düşük boşalım akımında elde edilen sonuçların daha yüksek yorulma dayanımı verdiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Elektro erozyon ile tornalama, İş parçası işleme hızı, Elektrot aşınma hızı, Yüzey pürüzlülüğü, Yorulma ömrü, Takım çeliği

Bilim Kodu : 91416

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACE INTEGRITY ON THE FATIGUE IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Ramazan ÇAKIROĞLU

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

July 2020, 98 pages

In this study, it was aimed to determine the effects of machining parameters on the surface integrity and fatigue life of the machined part in electrical discharge turning (EDT). Initially, a mechanism was designed and manufactured to ensure rotation of the workpiece. EDT experiments were carried out on AISI L2 tool steel using three different discharge currents, pulse on time, pulse off time and constant rotational speed. The experiments were carried out according to the L9 orthogonal array, and Rz, Sm and hardness values were measured as processing performance outputs. Then, the samples were applied by rotational bending fatigue strength test. The experimental fatigue strength results obtained were compared with the \sqrt{area} model used in theoretical fatigue calculations. According to the experimental results, it was determined that the values of IIR, EAH, Ra, Rz and Sm increased with the increase of discharge current and pulse duration. The lowest Ra, Rz and Sm values were obtained with low discharge current and low pulse times. In parallel, it was determined that low

discharge current and low pulse times increase the fatigue strength limit. While the greatest fatigue strength, 3 A discharge current, 3 μ s pulse time and 7 μ s standby time are obtained as 591 MPa; The smallest fatigue strength was obtained as 383 MPa with 12 A discharge current, 8 μ s pulse time and 6 μ s standby time. When the experimental and theoretical results were compared, it was seen that the results obtained in the low discharge flow showed higher fatigue strength.

Key Word : Electrical discharge turning, Material removal rate, Electrode wear rate, Surface roughness, Fatigue life, Tool steel

Science Code : 91416

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY'a, tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr. Yakup TURGUT ve Doç. Dr. Okan ÜNAL'a

Fiziksel deneylerimin tasarlanması ve gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Doç. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN'a, Doç. Dr. Gültekin UZUN'a, Dr. Öğr. Üyesi Semih ÖZDEN'e, Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ'a ve Cihan KOCAPINAR'a,

Ölçme Laboratuvarını kullanma imkanı sağlayan Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş. yetkililerine ve değerli çalışmalarından Ömer KAYKI'ya

Beni her konuda destekleyen, varlıkları ile gurur duyduğum, babam ve anneme,

Doktora çalışmalarım boyunca bütün zorlukları benimle paylaşan sevgili eşim, oğlum ve kızıma

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
BÖLÜM 3	26
TEORİK TEMELLER	26
3.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME	26
3.1.1. İşleme Parametreleri	27
3.1.2. EEİ Yönteminde Temel Performans Karakteristikleri	29
3.2. EEİ PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ.....	30
3.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü	30
3.2.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri.....	32
3.3. TAKIM ÇELİKLERİ	35
3.3.1. Soğuk İş Takım Çelikleri.....	36
3.4. ELEKTRO EROZYON İLE TORNALAMA TEKNİĞİ.....	36
3.4.1. Dalma Elektro Erozyon İle Tornalama.....	37
3.4.2. Tel Erozyon İle Tornalama.....	38

	<u>Sayfa</u>
3.4.3. Elektro Erozyon İle Taşlama	38
3.5. YORULMA TEORİSİ	39
3.5.1. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler.....	41
3.5.2. Yorulma Deney Türleri	44
3.5.3. Yorulma İle İlgili Terimler	45
3.6. MURAKAMI MODELİ İLE YORULMA ÖMRÜ TAHMİNİ.....	48
BÖLÜM 4	51
MATERYAL VE YÖNTEM	51
4.1. MALZEME VE EKİPMANLAR.....	51
4.1.1. EEİ Tezgahı	51
4.1.2. Elektrot (Takım)	52
4.1.3. İş Parçası Malzemesi	53
4.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü	53
4.1.5. Mikro Sertlik.....	54
4.2. DENEY DÜZENİĞİNİN TASARIMI VE İMALATI.....	55
4.3. DENEY TASARIM VE ANALİZ	57
4.4. YORULMA DENEY NUMUNESİ	58
4.5. YORULMA DENEY CİHAZI.....	58
4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM).....	59
BÖLÜM 5	61
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	61
5.1. İŞ PARÇASI İŞLEME HIZI (İİH)	61
5.2. ELEKTROT AŞINMA HIZI (EAH).....	62
5.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN (Ra, Rz, Sm) DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
5.4. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	70
5.5. DENEYSEL YORULMA ÖMRÜ	72
5.6. TEORİK YORULMA ÖMRÜ	79
5.7. KIRIK YÜZEYLERDEN ALINAN SEM GÖRÜNTÜLERİ.....	83

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	87
SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneğinin şematik gösterimi..	4
Şekil 2.2.	Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği	5
Şekil 2.3.	Elektro erozyon ile tornalanmış yüzeyin SEM görüntüsü	5
Şekil 2.4.	Deneyleerde kullanılan titanyum iş parçası ve elektrot takım	6
Şekil 2.5.	Tel elektro erozyonda işleme yöntemleri.	7
Şekil 2.6.	a) Yüzey çatlaklarının SEM görüntüsü b) Yüzey ve yüzey altının SEM görüntüsü	10
Şekil 2.7.	İşlenmiş yüzeylerde oluşan çatlakların SEM görüntüleri.....	11
Şekil 2.8.	Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği	13
Şekil 2.9.	Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği.	14
Şekil 2.10.	Inconel 825 malzemesi yüzeyinde meydana gelen çatlaklıkların görünümü.....	15
Şekil 2.11.	Inconel 825 malzemesi yüzeyinde meydana gelen beyaz katmanların görünümü.....	16
Şekil 2.12.	Her bir üretim yöntemi için numunelerden elde edilmiş yorulma dayanım değerlerinin ortalamaları.....	20
Şekil 2.13.	A356 alüminyum alaşımlarının S/N diyagramı.	22
Şekil 2.14.	6023 döngüden sonra kopan A356+T6+Sr örneğinin SEM görüntüleri	22
Şekil 3.1.	EEİ çalışma prensibi.....	27
Şekil 3.2.	EEİ süreçlerindeki sebep ve etki diyagramı	27
Şekil 3.3.	Ra yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi.	30
Şekil 3.4.	Aynı Ra değerine sahip farklı yüzey şekilleri.	31
Şekil 3.5.	Rz ve Rt yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi	32
Şekil 3.6.	Sm yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterim.	32
Şekil 3.7.	Rockwell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.	33
Şekil 3.8.	Brinell sertlik ölçümünün şematik gösterimi	33
Şekil 3.9.	Vickers sertlik ölçümünün şematik gösterimi.	34
Şekil 3.10.	Elektro erozyon ile silindirik profilleri işleme yöntemleri.....	37
Şekil 3.11.	Dalma elektro erozyon tezgâhında tornalama mekanizması.....	37
Şekil 3.12.	Klasik tel erozyon tezgâhında tornalama mekanizması.	38

Şekil 3.13.	Elektro erozyon ile taşlama mekanizması.....	39
Şekil 3.14.	Yorulma olayında çatlak başlangıcı ve yayılması.....	40
Şekil 3.15.	Yorulma deneyindeki periyodik yükleme eğrisi.....	45
Şekil 3.16.	Demir ve demir - dışı malzemelere ait tipik S–N diyagramı	47
Şekil 3.17.	a) Periyodik yüzey pürüzlülüğü çentikleri ve eş değer çatlakları, b) Periyodik yüzey çatlakları için gerilme yoğunluk faktörü	48
Şekil 3.18.	Yüzey pürüzlülüğünün maksimum yüksekliği.....	50
Şekil 3.19.	Yüzey pürüzlülüğünün tepe noktaları arasındaki genişliğin ortalaması	50
Şekil 4.1.	Deneylerde kullanılan M25 A dalma elektro erozyon tezgahı.....	51
Şekil 4.2.	a) Takımın boyutları, b) Tel erozyon tezgahında işlenmiş takımlar. .	52
Şekil 4.3.	İş parçası malzemesi boyutları	53
Şekil 4.4.	Yüzey pürüzlülüğü ölçümü cihazı.....	54
Şekil 4.5.	Soğuk bakalite alma işlem sırlaması	55
Şekil 4.6.	a)SHIMADZU Vickers sertlik cihazı, b)Deney numunesinde oluşan iz	55
Şekil 4.7.	Tasarlanan dalma EET deney düzeneğinin şematik görünümü.	56
Şekil 4.8.	EET deney düzeneği.....	56
Şekil 4.9.	ASTM E-466 yorulma deney numunesi boyutları.....	58
Şekil 4.10.	Yorulma test cihazı genel görünüşü ve elemanları	59
Şekil 4.11.	JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskopu ve EDS aparatı	60
Şekil 5.1.	İş parçası işleme hızı ana etki grafiği.....	62
Şekil 5.2.	Elektrot aşınma hızı ana etki grafiği.....	63
Şekil 5.3.	3 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü.....	63
Şekil 5.4.	5 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü	64
Şekil 5.5.	7 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü	64
Şekil 5.6.	3 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi.....	65
Şekil 5.7.	5 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi.....	66
Şekil 5.8.	7 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi.....	66
Şekil 5.9.	Ra değerinin işleme parametrelerine göre değişimi.....	68
Şekil 5.10.	Rz değerinin işleme parametrelerine göre değişimi.....	68
Şekil 5.11.	Sm değerinin işleme parametrelerine göre değişimi	69

Sayfa

Şekil 5.12.	50X büyütülmüş yüzey görüntüleri.....	70
Şekil 5.13.	Mikro sertlik değerleri.....	72
Şekil 5.14.	1 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	73
Şekil 5.15.	2 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	73
Şekil 5.16.	3 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	74
Şekil 5.17.	4 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	75
Şekil 5.18.	5 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	75
Şekil 5.19.	6 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	76
Şekil 5.20.	7 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	77
Şekil 5.21.	8 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	78
Şekil 5.22.	9 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.....	78
Şekil 5.23.	Deney numunelerinin karşılaştırılmış S-N diyagramı.....	79
Şekil 5.24.	Teorik yorulma gerilmesinin ana etki grafiği.....	81
Şekil 5.25.	Deney ve teorik yorulma dayanım sonuçları.....	82
Şekil 5.26.	1 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	83
Şekil 5.27.	2 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	84
Şekil 5.28.	3 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	84
Şekil 5.29.	4 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	85
Şekil 5.30.	5 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	85
Şekil 5.31.	6 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	85
Şekil 5.32.	7 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	86
Şekil 5.33.	8 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	86
Şekil 5.34.	9 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Yorulma deneyi numunesinde çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi.....	42
Çizelge 4.1. M25 A dalma elektro erozyon tezgahının genel özellikleri.....	52
Çizelge 4.2. AISI L2 soğuk iş takım çeliği malzemesinin kimyasal kompozisyonu.	53
Çizelge 4.3. Deney tasarımı.	57
Çizelge 5.1. Dalma EET deney sonuçları	61
Çizelge 5.2. Mikro sertlik değerleri	71
Çizelge 5.3. Teorik yorulma gerilmesi ve ΔK_{th} değerleri	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- I : Boşalım akımı, A
T_{on} : Vurum süresi, μ s
T_{off} : Bekleme süresi, μ s
R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü, μ m
R_z : Maksimum profil yüksekliği, μ m
R_t : Toplam profil yüksekliği, μ m
S_m : Profil elemanlarının ortalama genişliği, μ m
 σ : Gerilme
 σ_a : Gerilme genliği
 σ_m : Ortalama gerilme
 σ_{min} : Minimum gerilme
 σ_{max} : Maksimum gerilme
K_f : Çentik Faktörü
Al : Alüminyum
Cu : Bakır
Ni : Nikel
HB : Brinell sertliği
HRc : Rockwell sertliği
HV : Vickers sertliği

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- TS : Türk Standardı
- SEM : Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
- EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Yayıcı Spektroskop)
- XRD : X-Ray Diffraction (X ışını kırınımı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde metalik malzemeler birbirinden çok farklı imalat yöntemleriyle şekillendirilip kullanılmaktadır. İmalat yöntemleri; talaşlı imalat, alışılmamış imalat, plastik şekillendirme ile imalat, toz metalürjisi ile imalat, kaynak ve döküm gibi çok geniş bir çeşitlilik arz eder. Bütün bu imalat yöntemlerinin fiziksel işleme mantıkları ve imalat esnasında kullanılan enerji tipleri birbirinden tamamen farklılık göstermektedir. Bu farklılığın yanı sıra işlenen iş parçalarının yüzey bütünlüğü ve kalitesi de tümüyle farklıdır.

Yüzey bütünlüğü; işlenen yüzeylerde oluşacak içyapı değişikliği, yüzey sertliği, geometrik süreksizler, oluşabilecek oksit tabakalar, mikro çatlaklar ve yüzey pürüzlülük durumu gibi imalat sonrasında meydana gelen değişiklikleri kapsamaktadır [1]. Bütün bu sonuç faktörleri makine elemanlarının kullanımı süresince bazı beklenmedik hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Yüzey bütünlüğünü oluşturan bu faktörlerin oluşturduğu en büyük hasar mekanizması ise yorulma olayıdır [2].

Yorulma, makine elemanlarında yüzeyde başlayıp elemanın iç kesitine doğru ilerleyen aşamalı bir hasar mekanizmasıdır. Sonuçta makine elemanları mekanik deneylerle tespit edilen ve bilimsel olarak kabul edilmiş akma, kopma, eğilme ve sertlik dayanımlarının altındaki değerlerde beklenmedik anlarda aniden plastik deformasyona uğrayarak kullanılamaz hale gelip kazalara sebebiyet verebilmektedir [3]. Genellikle yorulma davranışı yeni üretilen malzemelerin endüstri Ar-Ge laboratuvarlarında ve üniversitelerde standartlaşmış değişik deneylerle imalat öncesinde tespit edilmektedir. Bu değerler makine parçalarının tasarımı aşamasında mukavemet analizlerinde doğrudan kullanılmaktadır.

İmalat endüstrisinde makine parçalarının şekillendirilmesi için çok fazla üretim tekniği mevcuttur. Elektriksel, ısı, mekanik, kimyasal birçok enerji türü ve işleme mantığı imalatın sınıflandırılmasındaki en önemli faktörlerdir. Ayrıca bugüne kadar üretilmiş on binlerce çeşit metal ve alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan imalat tekniklerinin belirli ideal işleme parametreleri farklılık göstermektedir.

İşleme parametrelerindeki bu geniş kullanım aralığının da işlenen yüzeylerin yapısal bütünlüğünü değiştirdiği bilinen bir gerçektir. Bunun yanı sıra her geçen zaman diliminde yeni geliştirilen metal malzemelerin işlenebilirliği üzerine yapılan araştırmalarda, arzu edilen ideal işleme performanslarını elde edebilmek için yeni imalat teknikleri de ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla hem mevcut hem de yeni geliştirilen imalat teknikleri ile işlenen makine parçalarında farklı yüzey yapıları oluşmaktadır.

Günümüzde bu imalat yöntemleri arasında en dikkat çekici ve ticari anlamda tezgâh boyutunda üretilenlerden birisi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir. EEİ tezgâhları üç farklı tezgâh olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Bunlar dalma elektro erozyon, tel elektro erozyon ve hızlı delik delme elektro erozyon tezgâhlarıdır. 1960'lardan sonra ticari olarak üretilen bu tezgâhların teknolojik gelişmelerle birlikte işleme hassasiyeti ve performansları geliştirilmiştir.

Bilinen diğer bütün imalat tekniklerinden farklı olarak bu yöntemde elektrik kıvılcımlarının metaller üzerine boşalımı ile şekillendirme gerçekleştirilmektedir [4,5]. İş parçasının yüzeyine uygulanan kıvılcım, noktasal olarak erime ve buharlaşmaya neden olur ve küçük metal parçacıklarını kopartır [6,7]. Kısacası elektro erozyon ile işleme, elektriksel olarak iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece iş parçasından küçük parçacıkların eritilerek ve buharlaştırılarak koparılması prensibine dayanan geleneksel olmayan bir işleme yöntemidir. EEİ yönteminde oluşan yüzeyler kraterimsin yapıdadır. Yani işleme esnasında takımın alt yüzeyinden boşalan binlerce kıvılcımın iş parçası yüzeyinde eritip buharlaştırdığı kraterlerin üst üste binmesiyle oluşan, diğer imalat teknikleri ile elde edilemeyen bir yüzey yapısı söz konusudur [8]. Bu nedenle krater boyutları ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü tümüyle farklı bir yapı

sergilemektedir. Ayrıca işlem iletken olmayan bir sıvı ortamında gerçekleştirildiğinden dolayı her bir kıvılcımın iş parçası yüzeyine düşerek ergittiği yüzeyde dielektrik sıvının hızlı soğutmasından ve ergitilen kısmın ısı transfer olayından dolayı yüzeylerde ısıdan etkilenmiş katmanlar oluşmaktadır [9,10]. Aynı zamanda EEİ’de imalat genellikle tek seferde gerçekleştirilmektedir. Yani, ikinci bir yüzey bitirme işlemine gerek kalmadan iş parçaları şekillendirilebilmektedir.

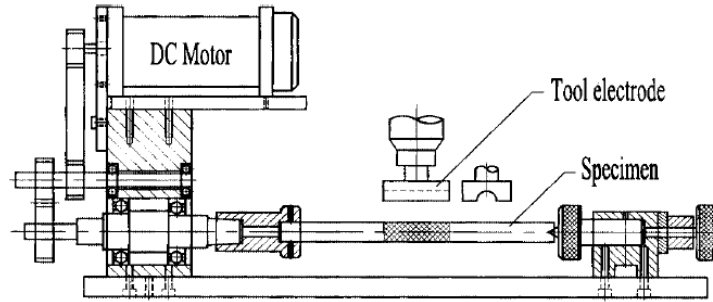
Son yıllarda EEİ üzerine yapılan çalışmalarda karmaşık geometriye sahip, işlenmesi zor olan silindirik parçaların işlenebilirliği araştırılmaktadır [11,12]. Bu yöntemde klasik dalma elektro erozyon tezgâhında silindirik geometriye sahip iş parçalarını işleyebilmek amacıyla döner mekanizma tezgâhın ana tablasına monte edilerek, C ekseninde dönme hareketi sağlanarak elektro erozyon ile tornalama (EET) işlemi yapılmaktadır. Bu imalat tekniğinin sunduğu yüzey bütünlüğü, kalitesi ve yüzey sertliği parçanın kullanım ömrünü değiştirmektedir.

Bu çalışmada, EET işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve işlenmiş parçanın yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, iş parçasının dönmesini sağlamak amacıyla bir mekanizma tasarlanarak imal edilmiştir. EET deneyleri, AISI L2 takım çeliği üzerinde üç farklı boşalım akımı, vuruş süresi ve bekleme süresi ile sabit devir sayısı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra numunelere dönel eğilmeli yorulma dayanım testi uygulanmıştır. Elde edilen deneysel yorulma dayanım sonuçları teorik yorulma hesaplamalarında kullanılan \sqrt{area} modeli ile karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

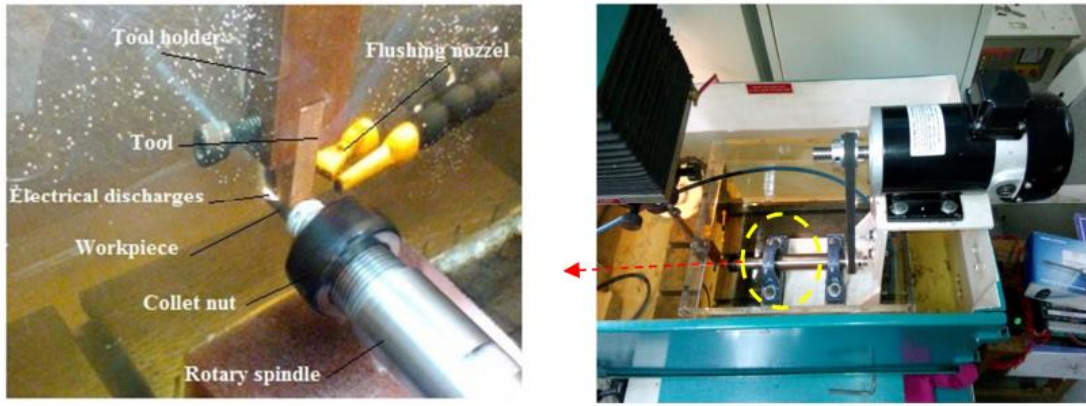
Guu vd.'nin elektro erozyon tezgâhında farklı işleme parametreleri kullanarak bakır elektrot ile AISI D2 takım çeliğini döndürerek işlemişlerdir. Kullandıkları deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 2.1'de verilmiştir.



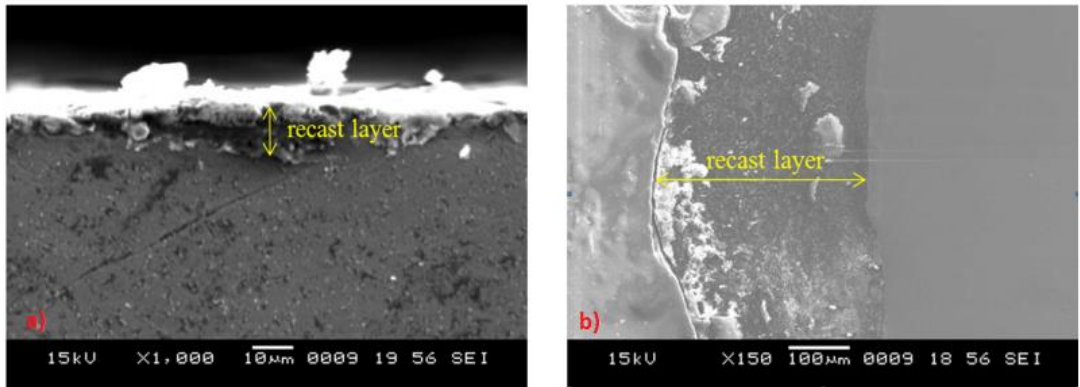
Şekil 2.1. Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği [13].

İşleme parametreleri olarak akım (1, 5 ve 10 A), vurum süresi (20, 100, 180 ve 260 μ s), vurum bekleme süresi (20 μ s), çevrim faktörü (50, 83, 90 ve 93 %) ve iş parçası devir sayısının (1200, 2200 ve 5000 dev/dak) yüzey pürüzlülüğüne ve talaş kaldırma oranına etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda akımın artmasıyla talaş kaldırma oranında artış olduğunu, deney parametresi olarak seçilen en düşük akım olan 1 A çok az talaş kaldırma oranına etki ettiğini belirlemişlerdir. Vurum bekleme süresinin artmasıyla belli bir noktaya kadar talaş kaldırma oranında artış gözlemlenirken belli bir süreden sonra talaş kaldırma oranındaki artış devam etmemiştir. Ayrıca akım ve iş parçası, devir sayısı arttıkça düşük yüzey kalitesi elde ettiklerini tespit etmişlerdir. Yüksek akım değerinin iş parçası yüzeyinde daha sık çatlaklar ve kalıntı gerilmesi oluşturduğu için kötü yüzey kalitesi ve ciddi yüzey kusurlarına sebep olduğunu belirtmişlerdir [13].

Gohil vd., EET yöntemiyle Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğünü deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında akım (5, 20 ve 35 A), vurum süresi (5, 10 ve 15 μ s), devir sayısı (50, 100 ve 150 dev/dak), püskürtme basıncı (0, 25 ve 50 kg/cm^2) ve çevrim faktörünü (1, 5 ve 9 %) işleme parametreleri olarak kullanmışlardır. Taguchi deney tasarımını kullanarak 18 adet deney yapmışlardır. Deneysel işleme süresini 30 dakika olarak sabit tutmuşlardır. Deney düzenekleri Şekil 2.2'de gösterilirken elektro erozyon ile tornalanmış yüzeyin SEM görüntüsü Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Elektro erozyon ile tornalama deney düzeni [14].

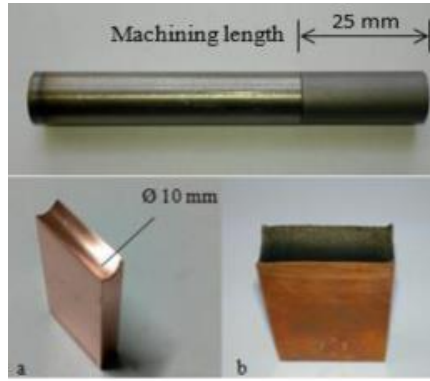


Şekil 2.3. Elektro erozyon ile tornalanmış yüzeyin SEM görüntüsü, (a) En düşük Ra, (5 A, 5 μ s vurum süresi, 150 dev/dak, 0.5 kg/cm^2 püskürtme basıncı, % 5 çevrim faktörü), (b) En yüksek Ra (255 A, 15 μ s vurum süresi, 50 dev/dak, 0.5 kg/cm^2 püskürtme basıncı, % 5 çevrim faktörü) [14].

Çalışma sonucunda akımın ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin çok fazla olduğunu görmüşlerdir. Akım ve vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede arttığını belirtmişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğü

değeri 5 A ve 5 μ s ile 2.20 μ m, en yüksek Ra değeri ise 35 A ve 15 μ s ile 5.43 μ m olarak ölçülmüştür. Akım değerinin artmasıyla enerji aktarım yoğunluğu arttığı için iş parçası yüzeylerinde derin ve büyük çukurlar meydana geldiğini SEM görüntüleriyle tespit etmişlerdir. Ayrıca akım, vuruş süresi ve çevrim faktörünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler olduğunu ANOVA ile belirlemişlerdir [14].

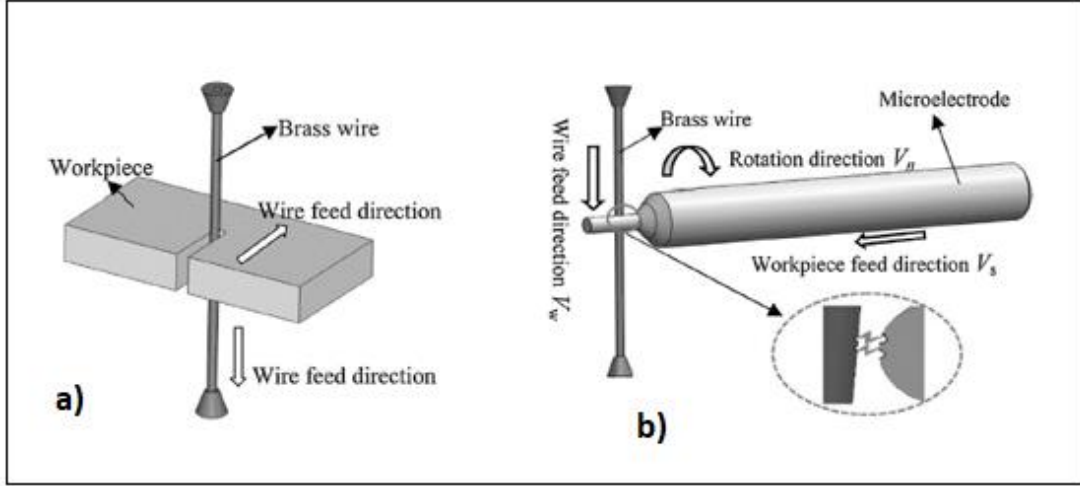
Gohil vd. elektro erozyon tezgahında tornalama tekniği ile işlenmesi zor olan silindirik parçaların işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında boşalım akımı (5, 20 ve 35 A), vuruş süresi (5, 10 ve 15 μ s), voltaj aralığı (40, 60 ve 80 V), devir sayısı (40, 80 ve 120 dev/dak) ve püskürtme basıncı (0, 0.25 ve 0.50 kg/cm²) gibi farklı işleme parametrelerini kullanarak Ti-6Al-4V alaşım malzemeyi işlemişlerdir.



Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan titanyum iş parçası ve elektrot takım (a) öncesi (b) sonrası [15].

Deneyler sonucunda iş parçası işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini gri ilişkisel analiz yöntemiyle optimize etmişlerdir. Optimum parametrelerin kombinasyonu olarak 5 A boşalım akımı, 5 μ s vuruş süresi, 40 V voltaj aralığı, 40 dev/dak devir sayısı ve 0 kg/cm² püskürtme basıncını belirlemişlerdir. Belirlenen optimum parametrelere göre yapılan doğrulama deneyleri sonucunda yüzey pürüzlülüğünde %2.23 oranında iyileşme sağlamışlardır. Ayrıca iş parçası işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili girdi parametreleri olarak voltaj aralığı ve püskürtme basıncını belirlemişlerdir [15].

Sun vd. tel elektro erozyon ile işleme ve tel elektro erozyonla tornalama deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarında işleme süreçlerini kaba, orta ve ince işleme olarak 3'e ayırmışlardır.



Şekil 2.5. Tel elektro erozyonda işleme yöntemleri a) Tel elektro erozyon ile işlemenin şematik gösterimi b) Tel elektro erozyonda tornalamanın şematik gösterimi [16].

Deneylerinde 20 mm x 30 mm x 10 mm boyutlarında karbon çeliği kullanmışlardır. İşlemeler sonrası en iyi yüzey kalitesini ve ölçü tamlığını ince işleme parametreleri ile elde ettikleri görülmüştür. Ayrıca elektro erozyon ile işleme ve elektro erozyonla tornalamayı karşılaştırdıklarında da en iyi yüzey kalitesini elektro erozyonla tornalama sonrası elde ettiklerini gözlemlemişlerdir [16].

Khan vd. EEİ'de hem pozitif hem de negatif kutuplu grafit elektrotlu takımlar kullanarak titanyum alaşımı Ti-5Al-2.5 malzemesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İşleme parametreleri olarak boşalım akımı (5, 10, 15, 20, 25 ve 30 A), vuruş süresi (50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 μ s) ve vuruş bekleme süresi (100, 150, 200, 250 ve 300 μ s) kullanılmıştır. Deney sonucunda Ra değerlerinin pozitif kutuplu elektrotla işlenen parçaların negatif kutuplu takımla işlenen parçalara göre neredeyse iki katı daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Pozitif elektrot da Ra üzerinde en fazla etki eden parametre vuruş süresi olurken negatif grafitli elektrot da ise boşalım akımı en etkili parametre olmuştur [17].

Shabgard vd., yaptıkları çalışmada dielektrik sıvının içerisine karbon nanotüp parçacıkları ekleyerek bakır elektrotlar yardımıyla Ti-6Al-4V alaşımını işlemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon nanotüp parçacıklarının talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkisine bakmışlardır. Dielektrik sıvının içerisine eklenen parçacıkların iş parçası yüzeyindeki mikro çatlakları azalttığı görülmüştür. Ayrıca bu parçacıkların talaş kaldırma oranını, takım aşınma oranını ve yüzey pürüzlülüğünü büyük oranda düşürdüğünü gözlemlemişlerdir [18].

Choudhary vd. çalışmalarında takım polaritesi (+, -), boşalım akımı (6, 8 ve 10 A), vurum süresi (60, 90 ve 120 μ s) ve voltaj (40, 50 ve 60 V) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerinde Taguchi L₁₈ dikey dizisi tasarımını kullanmışlardır. Elektro erozyonla işlemede takım polaritesi, boşalım akımı ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler olduğunu belirlemişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğünü; negatif takım polaritesi, 8 A boşalım akım, 60 μ s bekleme süresi ve 40 V voltaj kombinasyonunda elde etmişlerdir. Ayrıca pozitif takım polaritesi ile işlenen yüzeydeki karbon içeriği, negatif takım polaritesinden daha fazla olduğu ve takım malzemesinin negatif takım polaritesi ile işlenen yüzeyde birikmesi, pozitif takım polaritesi ile işlenen yüzeydekinden daha fazla olmuştur [19].

Guu vd. AISI D2 takım çeliğine TiN ve PVD kaplamanın yüzey sertliği, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilime ve yorulma dayanımına olan etkilerini incelemişlerdir. İşleme parametreleri olarak boşalım akımı ve vurum süresini kullanmışlardır. Deneyleri ASTM E466-9 standardına göre yapmışlardır. Boşalım akımı ve vurum süresinin artışının yorulma dayanımını azalttığını belirlemişlerdir. TiN kaplama PVD kaplamaya göre daha iyi yorulma dayanımını sergilemiştir. Bununla beraber TiN kaplama yapılan numunelerde yüksek yüzey sertliği, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmesi meydana gelmiştir. EEİ'lerde TiN kaplamanın takım çeliğinin yorulma ömrünü iyileştirmede etkili bir yöntem olarak önermişlerdir [20].

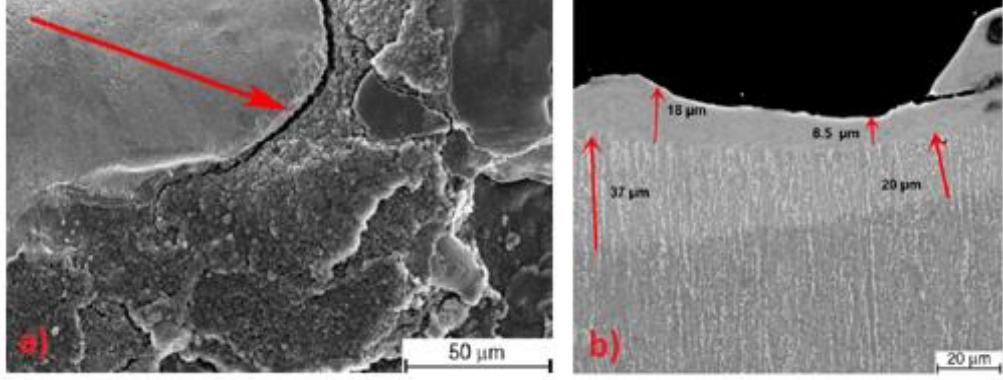
Lundberg vd., Frezeleme ve elektro erozyon tezgahlarında AISI 304 östenitik paslanmaz çelikleri farklı işleme parametreleri ile işleyerek elde edilen deney numunelerinin yüzey yapısını ve yorulma dayanımını incelemişlerdir. Deney

numunelerinin yorulma dayanımını belirlemek için dört noktadan eğme testi yapmışlardır. Yorulma deneylerinden önce numunelerin yüzey pürüzlülüğüne, kalıntı gerilmesine ve sertliklerine bakmışlardır. Yorulma testlerinde iki tezgah da elde edilen yüzey durumları arasında çevrim farklılıkları gözlenmiştir. Freze tezgâhında işlenen numunelerin yorulma dayanımı elektro erozyon tezgâhında işlenen numunelere göre daha yüksek olmuştur. Frezeleme yöntemiyle elde edilen deney numunelerinde ciddi şekilde plastik deformasyon olduğu ve yüzeylerde yeniden kristalleşmiş nano boyutlu taneler tespit edilmiştir. EEİ numune yüzeylerinde daha az plastik deformasyon meydana gelmiştir. Ayrıca frezelenmiş deney numunelerinde yaklaşık 500 MPa, EEİ numunelerinde ise yaklaşık 200 MPa'lık kalıntı gerilmeleri ölçülmüştür [20].

Arunachalam vd., yaptıkları çalışmada işleme yönteminin alüminyum alaşımlarının yüzeylerinde meydana gelen yüzey değişikliklerine bağlı olarak korozyon duyarlılığının yorulma davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Geleneksel freze ve EEİ tezgahlarında 141 mm boyunda 38.1 mm genişliğinde ve 3.2 mm kalınlığında (AA) 2024-T351, 5083-H116, 6061-T6 ve 7075-T651 alüminyum alaşımlarına 5mm çentik derinliği açılmıştır. Numunelere mikro yapısal analiz, elektrokimyasal testler ve korozyon yorulma testleri uygulanmıştır. Çalışmada EEİ ile işlenmiş yüzeylerdeki korozyon oluşum hızı frezelenmiş yüzey ile karşılaştırıldığında daha hızlı olduğu görülmüştür. Bu durumda malzemelerin yorulma dayanımının düştüğünü gözlemlemişlerdir [21].

Stráský vd., EEİ'de 29 A boşalım akımı kullanarak Ti-6Al-4V alaşımını işlemişlerdir. Yüksek boşalım akımı değeri seçmelerindeki amaç iş parçası yüzeyinde oluşan yüzey yapısı ve yüzeyin kimyasal bileşimindeki değişimlerin yorulma dayanımını nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. SEM ile yapılan incelemelerde Şekil 2.6 a)'da gösterildiği gibi malzeme yüzeyinde büyük hasarlar meydana gelmiştir. Ayrıca yüzey ve yüzey altının ısıdan etkilenen bölge derinlikleri Şekil 2.6 b)'de gösterilmiştir. Yorulma dayanımını belirlemek için döner eğilmeli yorulma deneyleri yapmışlardır. Yorulma deneyleri sonunda malzemelerin dayanım performansının oldukça zayıf olduğu görülmüştür. Bu durumu önceden var olan çatlaklara, artık kalıntı gerilimlerine ve muhtemelen kırılğan bir yüzey katmanına atfetmişlerdir. EEİ ile işlenmiş

numunelerin yorulma dayanımları özellikleri orijinal mikro yapıya bağlı olmadığını tespit etmişlerdir [22].

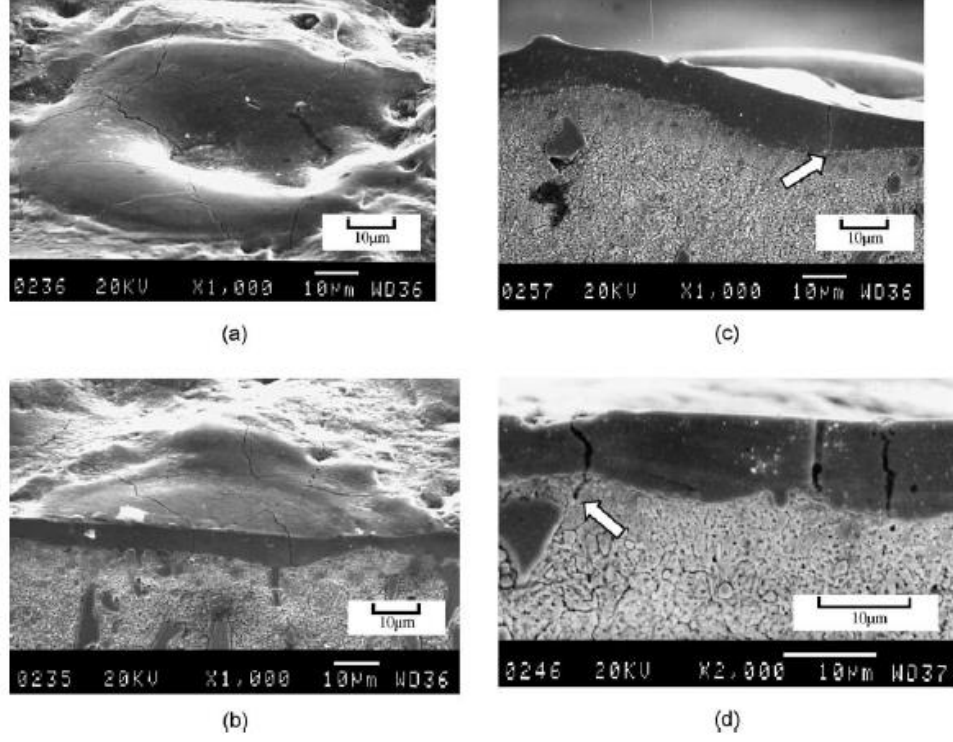


Şekil 2.6. a) Yüzey çatlaklarının SEM görüntüsü b) Yüzey ve yüzey altının SEM görüntüsü.

Kumar vd., çalışmalarında EEİ’de alüminyum esaslı kompozitleri (Al-SiC ve Al- SiC- B₄C) işleyerek yüzey karakteristiklerini araştırmışlardır. İşleme parametreleri olarak boşalım akımı (5, 10 ve 15 A), çevrim faktörü (4, 6 ve 8), vuruş süresi (50, 75 ve 100 µs) ve voltaj aralığı (40, 45 ve 50 V) değerlerini kullanmışlardır. İşlemeler sonucunda kompozitlerin işleme yüzeyi üzerinde ortalama krater boyutlarının biçimleri ve yüzeyin altında ısıdan etkilenen bölgeleri incelemişlerdir. İİH’nin artmasıyla işleme bölgesinde oluşan krater boyutlarında ve ısıdan etkilenen bölgenin derinliği artmıştır. Al-SiC kompoziti, Al-SiC-B₄C kompozitine kıyasla yüzeyde daha büyük derinlikte ısıdan etkilenen bölge olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni olarak daha yüksek boşalım akımı ve vuruş süresinde daha yüksek enerji boşalımından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kullanılan iki kompozit malzemelerde boşalım akımının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir [24].

Lee vd., çalışmalarında EEİ boşalım akımı (4, 6, 8, 12, 16 A), vuruş süresi (6, 9, 12, 15 µs), vuruş bekleme süresi (6, 9, 12, 15 µs) voltaj (120 V) gibi farklı işleme parametreleri kullanarak D2 ve H13 takım çeliğinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, yüzey çatlaklıklarının oluşumu, beyaz tabaka ve EEİ’nin neden olduğu kalıntı gerilmeler araştırılmıştır. İşlenen parçaların SEM görüntüleri incelendiğinde meydana gelen yüzey pürüzlülükleri sığ kraterler, çarpışma izleri, boşluklar ve çatlaklardan oluştuğu ve ayrıca boşalım akımı ve vuruş bekleme süresi arttıkça daha

belirgin hale geldiği görülmüştür. Bu durumu yüksek voltaj ve sıcaklıktan dolayı meydana gelen aşınma ve buharlaşmanın neden olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.7 işlenmiş yüzeylerde oluşan çatlakların SEM resimlerini göstermektedir.



Şekil 2.7. İşlenmiş yüzeylerde oluşan çatlakların SEM görüntüleri (a) D2 malzeme yüzeyindeki mikro çatlaklar (4 A / 15 µs); (b) D2 malzeme yüzeyi içinde başlayan çatlaklar (4 A / 15 µs); (c) D2 malzemesinde oluşan çatlakların beyaz tabaka içindeki sonlanması (8 A / 15 µs); (d) D2 ana malzemeye nüfuz eden çatlaklar (6 A / 15 µs) [25].

D2 ve H13 malzemelerinin yüzey pürüzlülüklerinde çok önemli fark oluşmamıştır. Beyaz katmanlarında dielektrik tarafından temizlenemeyen ancak soğutma sırasında numunenin işlenmiş yüzeyi üzerinde katılaşan kalıntıların olduğunu tespit etmişlerdir. Beyaz katmanın oldukça sert olduğu ve dağılmaz olduğunu tespit etmişlerdir. Beyaz katman kalınlığının esas olarak vurum süresinden etkilendiğini ve vurum süresi arttıkça katman kalınlığının arttığını belirtmişlerdir. Vurum süresi arttıkça numuneye daha fazla ısı aktarıldığı için dielektrik sıvının erimiş malzemeyi temizleyemez hale geldiğini ve bu nedenle numunenin yüzeyinde biriktiğini belirtmişlerdir. İşlenmiş yüzeylerin incelenmesi sonucunda beyaz katmanlı yüzeylerde mikro çatlaklar olduğu görülmüştür. Bu çatlaklar yüzeyden başlayarak ana malzemeye doğru dik olarak aşağı

doğru ilerlermişlerdir. Çatlaklar çoğunlukla beyaz katman içinde sonlanmıştır. Nadiren ana malzemenin içine nüfuz ettiğini gözlemlemişlerdir. Sabit boşalım akımında vurum süresi artıkça yüzeyde çatlak yoğunluğunun artığını belirlemişlerdir. Diğer yandan eğer vurum süresi sabit tutulur, boşalım akımı arttırılırsa yüzey çatlak yoğunluğunda azalma olduğunu tespit etmişlerdir. 120 V sabit değerde tutulduğunda 6 – 9 μ s vurum süresiyle birlikte 12 – 16 A aralığında elektrik akımıyla işlem yapılırsa çatlak oluşumunun önlenebileceğini belirtmişlerdir [25].

Özerkan vd., dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve borik asit tozlarının yüzey pürüzlülüğüne, İİH, EAH, mikroyapı ve yüzey sertliğine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir Her iki toz karışımlı dielektrik sıvı için vurum süresi artıkça yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini tespit etmişlerdir. Borik asit tozlu çalışmada değişik toz konsantrasyonlarında aynı vurum süresi için saf gazyağı ile elde edilen yüzeylere oldukça yakın yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş, artan toz konsantrasyonu ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinde saf gazyağında elde edilenlere göre belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Borik asit tozlu çalışmalardan iyi sonuç elde edilememesinin sebebini, bu tozların iletkenliğinin düşük olmasına bağlamışlardır. Grafit tozlu çalışmada ise yüzey pürüzlülüğü, saf gazyağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre belirgin şekilde iyileşmiştir. Borik asit tozlu deneylere göre grafit tozlu deneyler daha iyi yüzey pürüzlülüğü vermiştir. Bütün toz karışımlı deneylerde, S_m ve R_z (DIN) pürüzlülük parametrelerinin toz konsantrasyonu ile az da olsa azalması krater çapının ve derinliğinin de azaldığını göstermektedir. Bu durum çekilen yüzey profil fotoğraflarındaki kraterler incelendiğinde de açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, grafit tozlu işlemelerde işleme aralığında oluşan toz köprüleri boşalım süresince daha fazla sayıda boşalım kanalı oluşturarak borik asit tozlu ve tozsuz çalışmalara göre aynı boşalım enerjisini birim alandaki işleme yüzeyine daha düşük yoğunlukta ileterek yüzey pürüzlülüğünü belirgin şekilde iyileştirmiştir. Yapılan deneylerde, borik asit tozlarının yüzey sertliği dışında saf gazyağı ile yapılan deneylere göre İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü açılarından belirgin bir üstünlük sağlamadığını tespit etmişlerdir [26].

Azhiri vd., çalışmalarında EET yöntemiyle işlenen iş parçalarının manyetik kuvvet, yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde oluşan katmanın kalınlığı ve yüzey sertliği gibi yüzey

özelliklerinin nasıl etkilediğini belirlemek için AISI D2 çeliğini işlemişlerdir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2.13’de gösterilmiştir. İşlemelerde manyetik akım yoğunluğu (0, 0.2 ve 0.4 T), boşalım akımı (5, 10 ve 15 A), vurum süresi (600, 800 ve 1000 μ s) ve devir sayısı (50, 100 ve 150 dev/dak) gibi parametreleri kullanarak Taguchi L₉ deney tasarımına göre deneyleri yapmışlardır. Şekil 2.8, elektro erozyon ile tornalama deney düzeneğini göstermektedir.

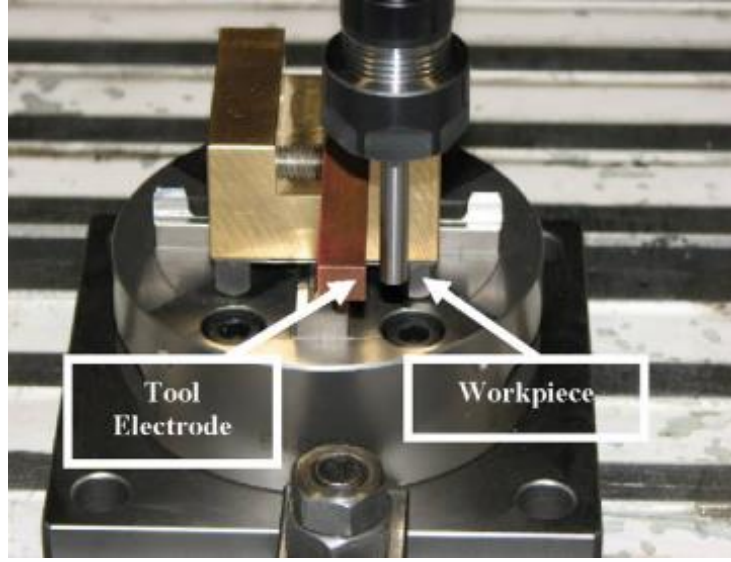


Şekil 2.8. Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği [27].

Deneyler sonucunda düşük yüzey pürüzlülüğü, düşük katman kalınlığı ve yüksek sertlik değerlerinin elde edilebilmesi için uygun işleme parametrelerinin belirlenmesinde gri ilişkisel analiz kullanılarak istatistiksel optimizasyon yapmışlardır. Deney sonuçlarını değerlendirildiğinde; manyetik akım yoğunluğu ve devir sayısının yüzey bütünlüğü üzerinde en etkin parametreler olduğunu tespit etmişlerdir. Boşalım akımının 5 A'den 15 A'e yükselmesi, yüzey pürüzlülüğünü ve katman kalınlığını arttırmıştır. Bununla birlikte, sertlik ile ilgili olarak boşalım akımının 10 A'e kadar artmasının sertliği arttırdığını ancak 15 A akımda sertlik değerlerinin büyük ölçüde azaldığını belirlemişlerdir [27].

Matoorian vd., çalışmalarında 1.3343 Yüksek Hız Çeliğinin EET sürecinin optimizasyonu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. İşleme parametreleri olarak boşalım akımı (2, 4 ve 6 A), vurum süresi (50, 150 ve 300 μ s), vurum bekleme süresi (20, 100

ve 180 μ s), voltaj (80, 120 ve 160 V), servo (30, 45 ve 60V) ve devir sayısını (15, 25 ve 40 dev/dak) kullanmışlardır. Deneyleri Taguchi L₈ deney tasarımına göre Şekil 2.9'de gösterilen deney düzeneğinde yapmışlardır. Yazarlar verimliliğinin ve maliyet etkinliğinin bir göstergesi olarak belirttikleri İİH'ın değerlendirmesini ve optimizasyonunu yapmışlardır. EET yönteminde İİH'ı etkileyen en önemli faktörler olarak boşalım akımı, devir sayısı, servo ve vurum süresini belirlemişlerdir. Yapılan optimizasyon ile de en iyi kombinasyon: 6A boşalım akımı, 50 μ s vurum süresi, 20 μ s vurum bekleme süresi, 120 V voltaj, 30V servo ve 40 dev/dak devir sayısı olarak belirlenmiştir [6].

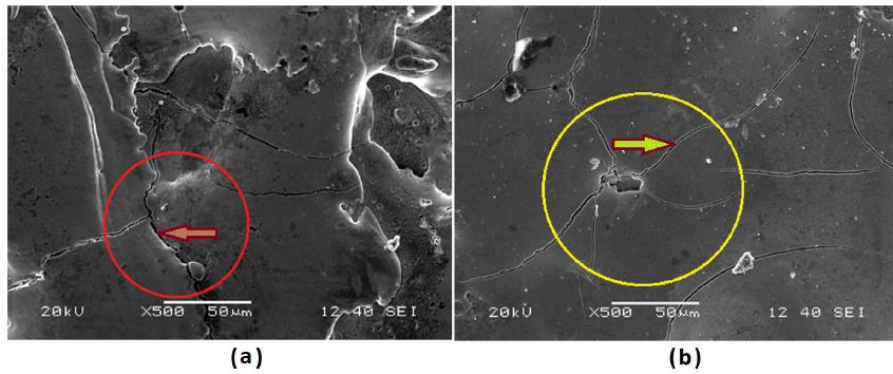


Şekil 2.9. Elektro erozyon ile tornalama deney düzeneği [6].

Llanes vd., EEİ elde edilen parçaların yorulma performansını iyileştirmek amacıyla iki farklı yüzey modifikasyonu üzerine çalışmışlardır. Kırılma ve yorulma mukavemetini artırmak için termomekanik işlemler (püskürtme, parlatma ve yüksek sıcaklıkta tavlama) ve sert kaplama işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen numunelere dört nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar her iki yaklaşımın da EEİ sert metallerin mekanik mukavemeti üzerinde belirgin bir artış yaptığını, ancak iyi bir yorulma mukavemetini sadece iki yöntemin birleşimiyle elde edebileceklerini söylemişlerdir. SEM görüntüleri incelendiğinde yorulma ömrünün artmasındaki ana faktör etkin artık gerilmelerin yapılan yüzey modifikasyonları sonucunda değişiklik göstermesine bağlamışlardır. Yazarlar EEİ yöntemi sonucu malzeme yüzeylerinde

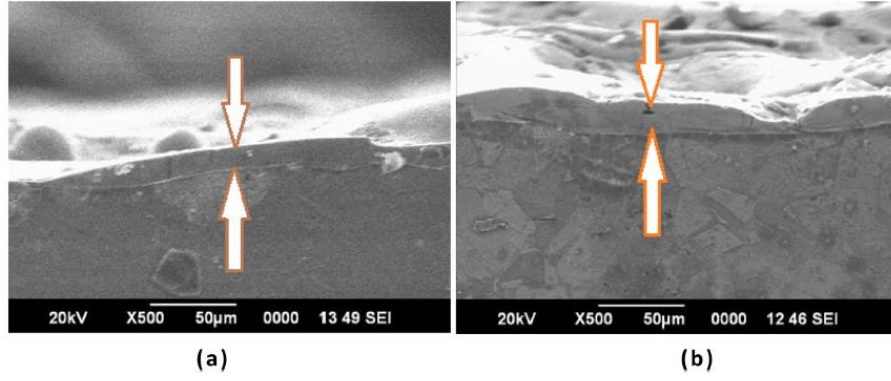
oluşan kusurları kumlama ve son parlatma işlemi ile basit bir şekilde iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir [28].

Datta vd., EEİ Inconel 825 malzemesini kriyojenik işlem görmüş bakır elektrot ile işlem görmemiş bakır elektrotlarla işlenmesi sonucu malzemenin yüzey bütünlüğünü ve metalürjik özelliğini analiz etmişlerdir. 50 x 50 x 5 boyutlarındaki Inconel 825 malzemesinin işlenmesi sonucu yüzeyi üzerinde oluşan beyaz tabakanın oluşumunun yanı sıra yüzeyde meydana gelen çatlaklıkların derecesini incelemişlerdir. Deneylerde boşalım akımı (I_p), vurum süresi (T_{on}) ve çevrim faktörü (τ) kontrol parametreleri olarak kullanılmıştır. Sabit parametreler ile işlenen ($I_p=10$ A, $T_{on}=100$ μ s ve $\tau= \%80$) Inconel 825 malzemesinin Şekil 2.10'daki SEM görüntülerini elde etmişlerdir. Kriyojenik işlem görmüş bakır elektrot ile işlenen parçaların yüzeylerinde oluşan çatlaklıkların yoğunluğunun işlem görmemiş bakır elektrot ile işlenen parçanın yüzeylerinde meydana gelen çatlaklara göre daha düşük ($\sim \%73$) olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.10. Inconel 825 malzemesi yüzeyinde meydana gelen çatlaklıkların görünümü ($I_p=10$ A, $T_{on}=100$ μ s ve $\tau= \%80$) a) işlem görmemiş bakır elektrot ile işlenen parça yüzeyi b) kriyojenik işlem görmüş bakır elektrot ile işlenen parça yüzeyi.

Yazarlar Şekil 2.11'de verilen SEM görüntülerine baktıklarında işlenen malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen beyaz tabaka kalınlığının kriyojenik işlem görmüş bakır elektrot ile işlenen parçaların yüzeyinde olduğundan daha kalın bir beyaz katman oluştuğunu fark etmişlerdir. Bunun sebebini kriyojenik işlemden sonra elektrot malzemesinin ısı transfer hızındaki artış olabileceğini belirtmişlerdir. Artan ısı aktarım hızı ile eriyen malzemelerin hızlı bir şekilde soğuması sonucu işlenmiş bölgenin üst yüzeyinde beyaz katmanın oluşmasına neden olmuştur [29].



Şekil 2.11. Inconel 825 malzemesi yüzeyinde meydana gelen beyaz katmanların görünümü ($I_p=6$ A, $T_{on}=300$ μ s ve $\tau= \%85$) a) işlem görmemiş bakır elektrot ile işlenen parça yüzeyi b) kriyojenik işlem görmüş bakır elektrot ile işlenen parça yüzeyi.

Wang vd., AISI 316L östentik paslanmaz çeliğin termal yük altında çatlak başlangıcını ve yayılımını incelemiştir. Dört noktadan eğmeli yorulma yükleme koşullarında, çatlak yapı oluşumunun yanı sıra çevrim sayısını büyük oranda etkilediğini tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklık değişimi kısa çatlaklardan oluşan yoğun çatlak ağına neden olurken, düşük sıcaklıkta yapılan testlerde ise sadece birkaç uzun çatlaklar oluştuğunu gözlemlemiştir. Düşük gerilme stresleri çevrim sayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen yoğun çatlak ağını ve yayılma sürecini hızlandırmıştır. Araştırmacılar elde ettikleri termal yorulma verileri ile izotermal mekanik yorulma testlerini karşılaştırdıklarında çok iyi bir tutarlılık göstermiş ve Fransız nükleer endüstrisinde kullanılan mevcut tasarım eğrileri ile de uyumlu olduğunu görmüşlerdir [30].

Soleimani vd., farklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde plazma nitrüleme parametrelerinin DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliğinin mikroyapısı ve yorulma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numunelere 450° C ve 550° C de 6 saat, 500° C de 3, 6 ve 9 saat nitrüleme işlemi uygulamışlardır. Yorulma deneylerini dönen eğilmeli yorulma test cihazını kullanarak yapmışlardır. Deneyler sonucunda plazma nitrüleme işleminin mikro-sertlik ve yorulma dayanımı değerlerinde önemli bir artışa yol açtığını tespit etmişlerdir. Ayrıca maksimum yorulma dayanımı (910 MPa) 6 saat boyunca 550° C' de plazma nitrülemeden sonra elde edildiği ve bu numunelerin yorulma ömrünün yaklaşık % 67 arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca SEM görüntüsü ile

tabaka kalınlığının sıcaklık ve zaman artıka arttığını, çekirdek mikroyapının değişmeden kaldığını gözlemlemişlerdir [31].

Sohar vd., yüksek krom alaşımlı AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kırılma yüzeyleri üzerine incelemeler yapmışlardır. Mikroskobik incelemelerde yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde balık gözüne benzer çatlak başlangıç oluşumları ve beş farklı yüzey morfolojisi tanımlamışlardır. Balık gözü tipi çatlakların sınırı nihai kırılmanın meydana geldiği bölgeler olmuştur. Ayrıca fraktografik değerlendirme verileri kullanarak stres yoğunluk faktörleri ΔK 'yı hesaplamışlardır. ΔK 'nın kısa yorulma çatlaklıklarının büyümesindeki eşiği temsil ettiğini görmüşler ve düşük ΔK değerlerinde bile yorulma süreçleri meydana gelmiştir. Hesapladıkları ΔK değerlerini daha sonra deneysel değerlerle karşılaştırdıklarında birbirlerine yakın gelen değerler bulmuşlardır [32].

Banerjee vd. yüksek çevrimli yorulma altında östenitik-martensitik yüksek karbonlu çeliğin yorulma ve kırılma davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Yorulma deneylerinde döner eğilmeli yorulma yöntemini kullanarak S-N grafiğini oluşturabilmek için malzemeye 700-1100 MPa yük uygulamışlardır. Kısa ömürlü numunelerin içyapılarını incelediklerinde balık gözüne benzer kusurlar tespit etmişlerdir. Stres yoğunluk faktörünün ölçülen değerleri, çelikler için çatlak büyümesinin eşiğ değerine yakın olan 5.2-5.75 MPa aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki artışın olumsuz etkisinin yanında hızlı çatlak ilerlemesi ve balık gözü şeklindeki oluşumların da yorulma ömrünü olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir. Elde ettikleri S/N eğrisine göre kısa ömürlü ($N < 10^6$) numunelerin yüzeyinde çatlaklar olduğunu, uzun ömürlü ($N > 10^6$) numunelerin ise iç yüzeylerinde çatlak olduğunu görmüşlerdir [33].

Jamshaid vd., havacılıkta kullanılan alüminyum alaşımı (Al 6082-T6) için ilerleme oranı (0.15, 0.2 ve 0.25 mm/dev), kesme hızı (1500, 2000 ve 2500 m/dak) ve kesme derinliği (1.25, 1.5 ve 1.75 mm) gibi üç farklı işleme parametrelerine göre değişimlerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini ve parametrelerin optimizasyonunu yapmışlardır. Numuneler; ISO 3685'e göre farklı işleme parametrelerinden kombinasyonlar seçilerek işlenmiştir. Dönel eğmeli yorulma testi için numuneler ISO 1143: 2010 standartlarına göre işlenmiştir. Kesici uçlar, Al 6082-T6 alaşımının

işlenmesi için önerilen Sandvik Coromant kataloğundan seçilmiştir. Tam faktör tasarımı deney düzeneği kullanılarak kesme parametrelerinin kombinasyonu için toplam 81 deney gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yorulma ömrünün artan ilerleme hızı ile azaldığı gözlenmiş olup, bu durum numunelerin yüzeyinde oluşan yüksek kalıntı gerilmelerine atfedilmiştir. Bununla birlikte, yorulma ömrünün daha yüksek kesme hızı ve kesme derinliğinde arttığı belirlenmiştir. Maksimum yorulma ömrünün elde edilebilmesi için yapılan optimizasyona göre ilerleme oranı = 0.15 mm / devir, kesme hızı = 2500 m / dak ve kesme derinliği = 1.75mm olarak belirlemişlerdir [34].

Liu vd., jet motoru parçalarında kullanılan 17-4 PH paslanmaz çeliğinin, işleme parametrelerinden kaynaklı işlenmiş yüzeylerinin yorulma ömrü üzerinde önemli değişiklikler meydana getirdiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada, işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve yorulma ömrü üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney yapmışlardır. İşlenmiş yüzeyin yorulma performansının, yüzey pürüzlülüğü, deformasyon sertleşmesi ve artık gerilmeler dahil olmak üzere yüzey bütünlüğü özelliklerinin etkileşimleri ile belirlendiği doğrulanmıştır. İşlenmiş yüzey altındaki yumuşatılmış tabaka ve artık gerilmeler tüm kesme koşullarında meydana gelmiş olup, parlatılmış numunelerle karşılaştırıldığında daha iyi yorulma ömrü elde edilmiştir. Plastik deformasyon ve sonuçta işlenmiş yüzey üzerinde sertleşme, kesme parametrelerinin her birinin artışıyla sürekli olarak artmış ve bu durum iş parçasının yorulma dayanımında önemli bir azalmaya neden olmuştur. İşleme parametrelerinin yüzey bütünlüğünü değiştirerek, yorulma dayanımını önemli ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir [35].

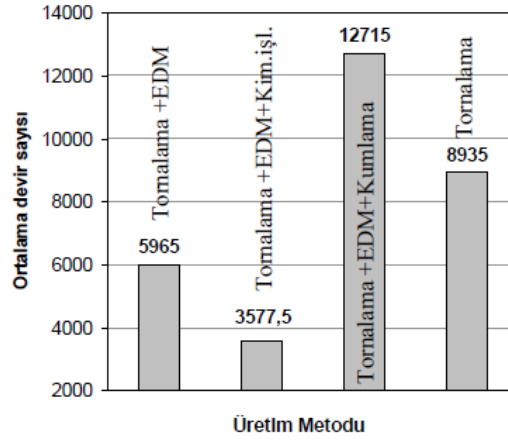
Li vd., farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip orta-karbonlu çeliklerin yorulma ömrünü, farklı S-N ve P-S-N eğrileri kullanarak tahmin etmişlerdir. Yorulma ömrünü hesaplamak için ortalama yüzey pürüzlülüğünün (Ra) orta karbonlu çeliğin yorulma ömrü üzerindeki etkisi ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra): 0,4 µm, 0,8 µm ve 1,6 µm olan üç grupta 75 yorulma testi kullanılarak araştırılmıştır. Yorulma testlerine dayanarak S-N eğrileri ve P-S-N eğrileri oluşturulmuştur. Orta karbon çeliğin yorulma ömrü, Tanaka-Mura çatlak başlatma yaşam modeli, Paris yasasını kullanan çatlak yayılma ömrü modeli ve S-N eğrilerinin malzeme sabitlerine dayanılarak tahmin edilmiştir. Sunulan yorulma ömrü tahmini formülasyonunu doğrulamak için altı tane

yorulma testi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, sunulan modelin farklı yüzey pürüzlülüğünde orta-karbonlu çeliklerde ortalama yorulma ömrünün tahmin edilebilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir [36].

Javidi vd, ilerleme hızı ve takım ucu yarıçapının, tornalamada yüzey bütünlüğü ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çelik malzemelerde ısı işlem sonrasında elde edilen yüzey kalitesinin yanında doğru formun elde edilmesi amacıyla işlenmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. Yüzey kalitesine yorulma dayanımı, korozyon direnci, aşınma miktarı vb. gibi özelliklerin etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Kesme hızı, ilerleme hızı ve takım ucu radyusu gibi çeşitli parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde büyük etkisinin var olduğu bilinmektedir. Ortaya çıkan sonuçlara göre kalıntı gerilmenin yorulma ömrüne olan etkisinin, yüzey pürüzlülüğünün etkisinden daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada; 34CrNiMo6 nın yorulma davranışının tornalama işlem parametreleri ve yüzey kalitesi arasındaki ilişkisini tanımlamışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün aynı ilerleme hızında, küçük yarıçap uçlu takımlar kullanıldığı zaman büyük uçlu takımlara göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Basma kalıntı gerilmesinin artırılmasıyla yorulma ömrü de artmaktadır [37].

Baş vd., çalışmalarında tornalama, tornalama + EDM, tornalama + EDM + kumlama ve tornalama + EDM + kimyasal aşındırma ile hazırlanan 4 grup numune yorulma testine tabi tutularak üretim yönteminin 90MnCrV8 soğuk iş takım çeliğinin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu numunelere dönen eğilmeli yorulma testleri uygulanmıştır. Tornalama + EDM'ye tabi tutulmuş numuneler genelde aynı devir sayısında kırılmışlardır. Ancak tornalama ve tornalama + EDM + kumlama işlemi ile üretilmiş numuneler arasında devir sayısında büyük farklar görülmüştür. Tornalama + EDM + kimyasal işleme ile işlenmiş numunelerde ise bu fark orta düzeyde görülmüştür. İşlem esnasında üretim parametrelerinin değişim göstermesi, sonuçta oluşacak ürünün de yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerini de büyük oranda etkilediğini belirlemişlerdir. Tornalamadan sonra yapılan EDM işleminde, işlem esnasında üretim parametreleri sabit tutulabildiği için genel olarak bu yöntemle üretilen bütün numunelerden benzer yorulma ömrü elde edilmiştir. Her bir yöntem için üretilen 4 numunenin yorulma sonuçlarının ortalaması Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu

sonuçlardan da görüldüğü gibi tornalamadan sonra yapılan EDM işlemi malzemenin yorulma dayanımını düşürerek daha düşük ömre sahip olmasına sebep olmuştur [38].



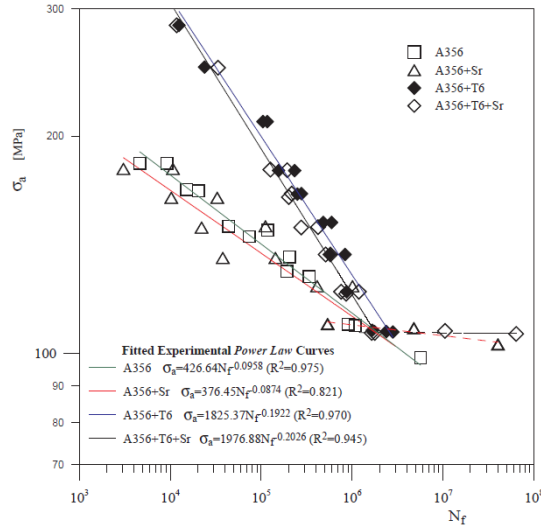
Şekil 2.12. Her bir üretim yöntemi için numunelerden elde edilmiş yorulma dayanım değerlerinin ortalamaları.

Choudhary vd. EEİ tezgahında Nimonic 75 alaşımının farklı işleme parametreleri kullanarak yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşleme deneylerinde takım kutuplaşması (-, +), akım (6, 8 ve 10 A), vurum süresi (60, 90 ve 120 μ s) ve voltaj (40, 50 ve 60 V) parametrelerini kullanarak Taguchi L₁₈ deney tasarımını göre deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda takım kutuplaşmasının, vurum süresinin ve akım parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en etkili parametreler olduğunu tespit etmişleridir. Negatif takım kutuplaşması ile işlenen yüzeylerin pozitif takım kutuplaşması ile işlenen yüzeylere göre daha pürüzsüz olduğu görülmüştür. Düşük yüzey pürüzlülüğünü negatif takım kutuplaşmasından, 8A akım, 60 μ s vurum süresi ve 40 V voltaj parametrelerinden elde etmişlerdir [39].

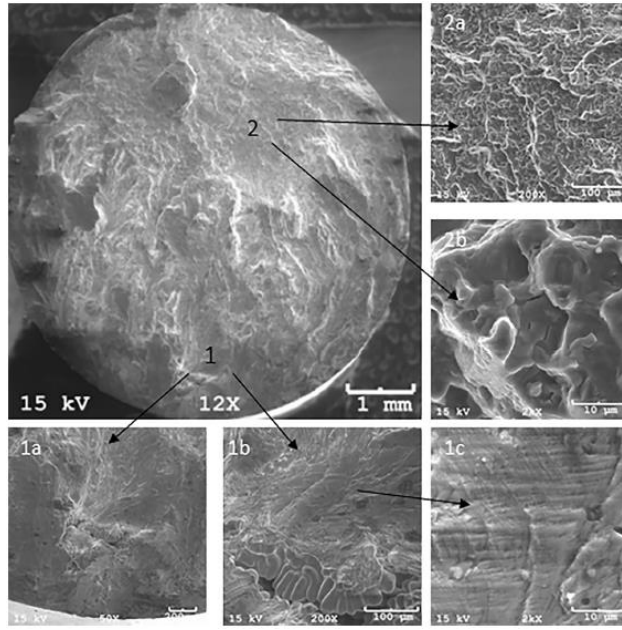
Kushwaha vd., EEİ'de Ti-6Al-4V alaşımını boşalım akımı (10, 20, 30, 40 ve 50 A), vurum süresi (50, 100, 200, 500 ve 1000 μ s) gibi farklı işleme parametrelerini kullanarak işlemişlerdir. Deneyler sonucunda İİH ve EAH yanında iş parçasının yüzey bütünlüğü, yüzey pürüzlülüğü, yüzey çatlak yoğunluğu, beyaz tabaka kalınlığı ve mikro sertlik gibi özelliklerini değerlendirmişlerdir. Boşalım akımının artmasıyla İİH, EAH ve Ra değerleri artmıştır. Kıvılcım enerjisi boşalım akımı ile doğru orantılı olduğundan; akımdaki artış, daha yüksek derecede malzeme erozyonunu oluşturduğundan dolayı yüksek İİH ve düşük yüzey kalitesi oluştuğunu belirlemişlerdir. Ayrıca boşalım enerjisi sadece iş parçası malzemesinin bir bölümünü

değil aynı zamanda takım elektrotunu da erittiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, artan vurum süresi, iş parçasında ve takımda önemli ölçüde karbon göçüne neden olmuştur. Bu nedenle, vurum süresindeki artış ile İİH ve EAH'da azalma gözlemlenmiştir. Sert ve kırılğan karbür tabakalarının düzgün olmayan bir şekilde birikmesi, iş parçasının yüzey yapısını olumsuz etkilemiştir. İş parçası yüzeyindeki çatlaklar, boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla artış göstermiştir. Artan kıvılcım enerjisi, kalın beyaz tabakanın birikmesini desteklemiştir. Beyaz tabakanın ana malzemenin büyük bir kısmından sertleşmeye neden olduğunu belirlemişlerdir. Boşalım akımı 20 A'den 30 A'e yükseldiğinde beyaz tabaka kalınlığı da 32.35 µm'den 42.64 µm'ye yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla beyaz tabaka kalınlığı da artış göstermiştir. Beyaz tabakanın kalınlığını sırasıyla 100 µs, 200 µs ve 1000 µs vurum süresinde 41.52 µm, 47.16 µm ve 74.04 µm olarak belirlemişlerdir. Beyaz tabaka içinde karbür ve oksit oluşumu, işlenmiş yüzeyin altında belirli bir derinliğe kadar daha yüksek mikro sertlik değeri oluşturmuştur. Daha sonra mikro-sertlik değerlerinin malzemenin merkezine doğru yaklaştıkça azaldığını tespit etmişlerdir. Malzemenin yüzeyinde oluşan bu tip sertleşmenin malzemenin aşınma direncini arttırdığını belirtmişlerdir [40].

Haskel vd. A356 alüminyum alaşımının dönen eğilmeli yorulma testlerindeki davranışını incelemişlerdir. Deney numunelerine strosyum ilave ederek ve T6 ısıtım işlem yöntemlerini uygulayarak dört farklı (A346, A356+Sr, A356+T6 ve A356+T6+Sr) çeşitte numune hazırlamışlardır. Dönen eğilmeli yorulma sonuçlarına göre Şekil 2.13'de gösterilen S/N diyagramına göre en iyi yorulma ömrünü A356+T6 koşulundaki malzemede elde ettikleri ve stronsiyum eklenerek elde edilen alaşımların biraz daha düşük performans gösterdikleri tespit edilmiştir. Alaşımın statik ve döngüsel özellikleri arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Isıtım işlem görmüş T6 alaşımları yüksek mukavemeti nedeniyle yorulma ömründe daha iyi davranış göstermiştir. $N=2 \times 10^6$ yük döngüsünde dört malzeme türünün de neredeyse aynı gerilmede koptukları görülmüştür. Bunun nedeni olarak da alaşımların içyapılarındaki gözeneklerin artmasından kaynaklı içyapı kusurları olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.14'de gösterilen kopan yüzeylerden çekilen SEM görüntülerini incelediklerinde ise çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve kopma olmak üzere üç farklı bölgenin meydana geldiğini belirlemişlerdir [41].



Şekil 2.13. A356 alüminyum alaşımlarının S/N diyagramı.



Şekil 2.14. 6023 döngüden sonra kopan A356 + T6 + Sr örneğinin SEM görüntüleri: son kopma bölgesi (ayrıntılar 1), yayılma ve son kopma bölgesi (ayrıntılar 2).

Liu vd, ASP 23 takım çeliğinin dalma elektro erozyon tezgahında rastgele büyük boşalım gerilimi uygulanarak işlenmesi sonucu oluşan artık kalıntı gerilmesini simülasyon etmek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Deney parametreleri olarak 50 μ s duraklama süresi ile 30 A boşalım akımı sabit tutulmuş, üç farklı voltaj (20, 30 ve 40 V) ve 1000 boşalım gerilmesi uygulamışlardır. Çalışmalarında hem bölgesel artık kalıntı gerilmesini hem de yüzeyin altındaki artık kalıntı gerilmeleri araştırmışlardır.

Ortalama artık kalıntı gerilmesi iş parçası yüzeyinde 1269 MPa değerlerinde ölçülür iken yüzeyden yaklaşık 12 µm derinlikte artık kalıntı gerilmesi 2422 MPa değerlerine kadar yükseldiğini ve daha sonra yaklaşık 50 µm derinlikte ise kademeli olarak sıfıra yaklaştığını tespit etmişlerdir. Yani maksimum artık kalıntı gerilmesi üst yüzey yerine yüzeyden yaklaşık 10 ile 20 µm derinlikte oluşmuştur. Yüzeydeki düşük artık kalıntı gerilmesini iş parçası yüzeyinde oluşan yüksek yüzey pürüzlülüğüne bağlamışlardır. Boşalım voltaj değerlerinin kalıntı gerilmesi üzerindeki etkisine baktıklarında ise 20 V' tan 40 V' a yükseltildiğinde ortalama artık kalıntı gerilmesi değerlerinde küçük artış olduğu ama yüzeyin altında oluşan artık kalıntı gerilmelerin 12 µm' den 28 µm' ye kadar uzadığını gözlemlemişlerdir. Yüzeyde oluşan artık kalıntı gerilme değerlerinde ise yaklaşık olarak 1270 MPa' dan 334 MPa değerine önemli ölçüde düşüş gerçekleşmiştir. Bunun nedeni olarak daha yüksek boşalım voltajının iş parçasından daha fazla malzeme kopartması ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğünün oluşması gösterilmiştir. EEİ' de daha düşük artık kalıntı gerilmesi elde etmek için daha düşük boşalım enerjisinin tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [42].

Knez vd. yüksek mukavemetli S1100Q çeliğinin düşük devirli yorulma ömrünü belirlemek için deneyler yapmışlardır. ASTM E 606 standardına göre hazırladıkları yorulma test cihazında gerilme oranını R=-1 olarak uygulamışlardır. Ayrıca matematiksel model kullanarak elde ettikleri tahmini yorulma ömrünü deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Yorulma ömür deneylerini eksenel gerilme ve dönel eğilmeli yorulma olmak üzere iki farklı şekilde yapmışlar ve matematiksel model ile elde edilen tahmini ömür değerlerini karşılaştırmışlardır. Eksenel gerilme testlerinin dönel eğilmeli testlere göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile matematiksel sonuçlar arasında uyum olduğunu söylemişlerdir [43].

Paramanik vd. Ti-6Al-4V alaşımının tel elektro erozyon tezgahındaki işleme parametrelerinden vurum süresi, vurum bekleme süresi ve tel gerginliğinin yorulma ömrü, çatlak başlangıcı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde değişken parametreler olarak vurum süresi (4, 7, 10 ve 12 µs), vurum bekleme süresi (15, 40, 60 ve 80 µs) ve tel gerginliğini (1300, 1450, 1600 ve 1750 N) kullanmışlardır. Vurum süresinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelediklerinde gerilme genliğinin artması ile yorulma ömrünün azaldığını gözlemlemişlerdir. En

düşük gerilme genliğinde 7 ve 12 µs vurum sürelerinde işlenen malzemelerin yorulma ömrünün düşük olduğu, 4 µs işlenen malzemelerin ise daha uzun yorulma ömrü performansı olmuştur. Vurum bekleme süresinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelediklerinde düşük gerilme genliğinde ve yüksek vurum bekleme sürelerinde işlenen parçaların yorulma ömrünün yüksek olduğu tespit etmişlerdir. Ancak gerilme genliği artırıldığında ise vurum bekleme süreleri yorulma ömrünü azalmıştır. Tel gerginliğine bakıldığında yüksek gerilim genliğinde düşük yorulma ömrünün olduğu gerilim genliğinin düşmesiyle yorulma ömrü performansının arttığını tespit etmişlerdir [3].

Gu vd. AISI 52100 yüksek karbonlu çeliğe kalsiyum alüminat inklüzyon (metal olmayan kalıntılar) dahil ederek yorulma ömrü deneysel ve teorik (\sqrt{area}) olarak araştırılmıştır. Yorulma deney sonuçlarına göre tüm çatlak başlangıç yerleri malzemenin içerisinde meydana gelmiştir. Çatlaklar hem çelik matris homojenliğinden hem de metalik olmayan inklüzyonlar nedeniyle meydana gelmiştir. Çatlak başlama bölgelerinde gözlemlenen metalik olmayan inklüzyon tipleri içerisinde kalsiyum alüminat inklüzyonların yorulma ömrüne en fazla etki eden madde olmuştur. Yorulma çatlağı başlangıç bölgesi yakınında gözlemlenen kalsiyum alüminat inklüzyon boyutlarının 12.5 µm ile 33.2 µm arasında değiştiğini ve bu boyutların yorulma ömrü üzerinde belirgin bir şekilde olumsuz etkiye sahip oldukları görülmüştür. \sqrt{area} modeli ile kalıntı gerilmelere sahip mikroyapı temelli kalsiyum alüminat inklüzyonların yorulma ömrü üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir. Ancak bu modelin artık gerilmelerin ihmal edildiği deneysel veriler ile tutarlı olmadığı görülmüştür [44].

Garb vd. alüminyum alaşımlı AlSi7-Cu0.5Mg T6w dökümünün yorulma dayanım sonuçlarını Murakami' nin \sqrt{area} modeli ile değerlendirmişlerdir. Yorulma deney numuneleri T6 ısıl işlem ve iki farklı ötektik değiştirici Stronsiyum (Sr) ve Sodyum (Sa) uygulanarak dört farklı malzeme elde edilmiştir. Hata büyüklük alanı dikkate alınarak Murakami modeli tarafından belirlenen yorulma ömrü sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile tahmini sonuçlar arasındaki fark %10' luk sapma içerisinde kalmıştır [45].

Schönbauer vd. küçük kusurlu üç farklı martensitik paslanmaz çeliğin (17-4PH, X20Cr13 ve AISI403) yorulma ömrünü araştırmışlardır. Yorulma deneyleri çeşitli yapay kusurlar içeren (korozyon çukurları, tekli ve çoklu delinmiş delikler, keskin çentikler ve öncesinden çatlamış delikler) numuneler ile yapılmıştır. Deney sonuçlarını Murakami'nin \sqrt{area} modeli ile karşılaştırmışlardır. Kritik kusur büyüklüğünü, eşik sınırı belirlemek için farklı yük oranlarında dönel eğilmeli yorulma testleri yapmışlardır. Kritik kusurların boyutu belirli bir değerden (17-4PH için 50 μm ve X20Cr13 için 100 μm) daha büyük çaplı deliklerin varlığında yorulma mukavemeti tahmin edilenden önemli ölçüde daha yüksek olmuştur. Buna karşılık çevresel boyutları yaklaşık 750 μm kadar büyük olan keskin çevresel çentikler, korozyon çukurları ve çok delikli kusurlar benzer kırılma mekaniği yaklaşımı göstermişlerdir. Eşik gerilim yoğunluk faktör aralığı ΔK_{th} sabit değer haline geldiğinde küçük ile büyük kusurlar arasındaki geçiş boyutu 80 μm ile 166 μm arasında kalmıştır. Kritik kusurların boyutu (\sqrt{area}) artan ortalama gerilme yükleri ile küçük kusurlara karşı azalan hassasiyet ile yük oranına bağlı olduklarını tespit etmişlerdir. Ayrıca küçük kusurların paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımı üzerindeki etkisinde çentik boyutunun önemli olduğunu belirlemişlerdir. Küçük kusurların varlığında \sqrt{area} modeli yorulma ömrünü tahmin etmek için iyi bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [46].

Literatür incelemesi sonucunda; AISI L2 takım çeliğinin elektro erozyon ile tornalama (EET) yöntemiyle işlenmesi sonucunda işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve işlenmiş parçanın yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesini bir bütün olarak ele alınan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma yapılarak, iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesinde etkili olan parametreleri belirleyerek iş parçalarının yorulma dayanımını artırmak amaçlanmıştır.

BÖLÜM 3

TEORİK TEMELLER

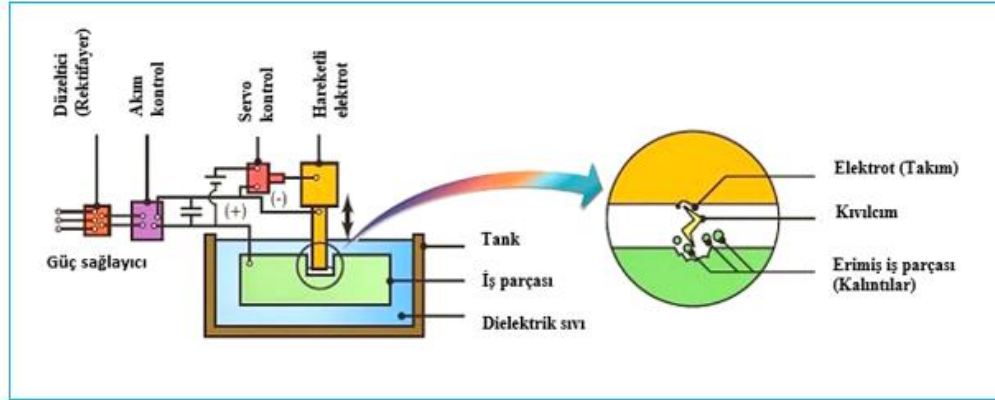
3.1. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı bir işleme yöntemi prensibine sahiptir. Bu yöntemde, bir dielektrik sıvı ortamında takım ve iş parçası arasında temas olmadan meydana gelen elektriksel kıvılcımlar tarafından üretilen ısı ile şekillendirme yapılmaktadır [5]. İş parçasının yüzeyine uygulanan kıvılcım, noktasal olarak erime ve buharlaşmaya neden olur ve küçük metal parçacıklarının iş parçasından kopmasını sağlar [6,7].

EEİ ile elektriksel iletken yöntemi, çok yüksek sertlik ve mukavemetli, karmaşık geometrili malzemeleri kolaylıkla işleyebilmesi açısından modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya gelmiştir [47]. EEİ yöntemi çeşitli kalıplarda, küçük pompalar, motorlar, robotlar, nükleer güç reaktörlerinin parçalarında, biyomedikal cihazlar gibi elektromekanik sistemlerde kullanılır. Özellikle EEİ yöntemi; kompleks geometrili parçalar, silindirik veya prizmatik mikro takımlar, mikro boyutlu kanal veya delikli parçaların imalatında yaygın olarak uygulanmaktadır [48,49]. Aynı zamanda yüksek ölçü hassasiyeti ve yüzey bütünlüğü gerektiren bu parçalar, temel işleme prensibi aynı kalmak koşuluyla elektro erozyon ile delme, taşlama, dalma, tel ile kesme ve tornalama gibi çeşitli uygulamaları sayesinde imal edilebilmektedir [50,51].

EEİ'nin temel çalışma prensibi Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Temel olarak, elektrik enerjisi kullanılarak takım elektrotu ve iş parçası arasında meydana gelen bir dizi durağan ve geçici elektrik boşalımı termal enerjiye dönüşerek iş parçası yüzeyinden küçük parçacıklar kopararak takımın geometrisini parçaya yansıtır [53,54]. Hem takım hem de iş parçası iletken olmalı ve dielektrik sıvıya daldırılmalıdır. Genellikle

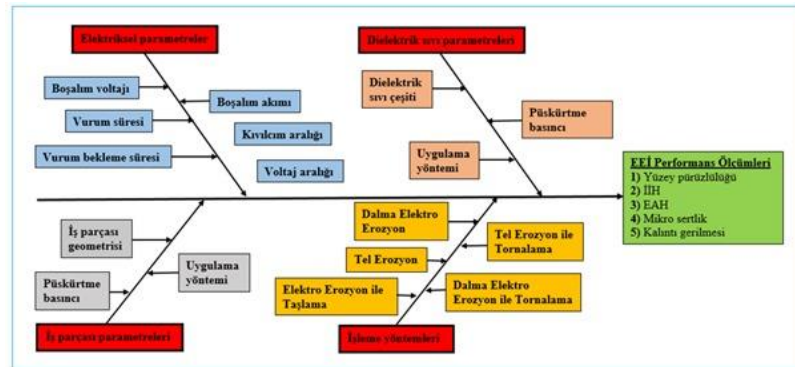
dielektrik sıvı olarak hidrokarbon yağı veya gazyağı kullanılmaktadır [55]. Dielektrik sıvı; düşük viskozite, yüksek dielektrik dayanım, hızlı geri kazanım ve etkili temizleme yeteneğine sahip olmalıdır. Aksi takdirde iş parçası ve takım arasındaki kalıntılar ile temas oluşumu meydana gelir bu da kısa devre oluşturup tezgahın durmasına sebep olur.



Şekil 3.1. EEİ çalışma prensibi [52].

3.1.1. İşleme Parametreleri

EEİ parametreleri, elektriksel ve elektriksel olmayan parametreler olarak iki kategoride sınıflandırılabilir. Elektriksel parametreler arasında boşalım voltajı, boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi, kıvılcım aralığı yer alırken; elektriksel olmayan parametreler de ise püskürtme basıncı, takım/iş parçası dönüşü, dielektrik sıvı çeşidi gibi parametreler bulunmaktadır [50,56]. EEİ süreçlerindeki sebep ve etki diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Bu süreçte işleme çıktılarına etkileyen en önemli parametreler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.2. EEİ süreçlerindeki sebep ve etki diyagramı [56].

- *Boşalım Enerjisi (V)*: İş parçası yüzeyinden talaş kaldırılmasında kullanılan önemli bir parametredir. Boşalım enerjisi, kıvılcım aralığı ile dielektrik sıvısının kırılma dayanımıyla ilgilidir. Akım iş parçası yüzeyine akmadan önce, takım ve iş parçası arasında iyonizasyon yolu oluşana kadar voltaj artar, akım akmaya başladığında voltaj azalır ve çalışma boşluğu sabitlenerek iş parçası yüzeyinden malzemelerin buharlaşmasına neden olur. Boşalım enerjisi, eşleştirilmiş takım/iş parçası malzemesine ve işleme koşullarına bağlıdır.
- *Boşalım Akımı (A)*: Kıvılcım boşalması sırasında meydana gelen akım değeridir. Amper birimi cinsinden ölçülen en önemli elektriksel parametre olarak kabul edilir. Genellikle yüksek frekanslı doğru akım taşıyan palslar şeklinde devreye verilerek, iş parçasından küçük parçacıklar şeklinde kontrollü olarak talaş kaldırma işlemi gerçekleştirir. Boşalım akımı arttıkça iş parçası yüzeyinden talaş kaldırma miktarı artarken yüzey kalitesi kötüleşmektedir.
- *Vurum süresi (Ton)*: Kıvılcımlanma yoluyla malzemenin çıkarılması için akımın verildiği süredir. Vurum süresi mikro saniye cinsinden ölçülen süredir. Bu süre zarfında akımın takımdan iş parçasına geçmesine izin verilerek talaş kaldırma işlemi gerçekleştirir. Vurum süresinin artması iş parçasından daha fazla talaş kaldırılmasına sebep olurken, iş parçası yüzeyinde daha geniş kraterler ve derin çukurların oluşmasına neden olacaktır.
- *Vurum bekleme süresi (Toff)*: Akım beslemesinin kısıtlandığı zaman aralığıdır. Vurum bekleme süresi mikro saniye cinsinden ölçülen süredir. Vurum bekleme süresi boyunca iş parçası malzemesine akım uygulanmadığından talaş kaldırma işlemi olmayacaktır. Bunun yerine öncesinde işlenmiş olan bölgelerdeki kalıntıların uzaklaştırılması işlemi gerçekleşecektir. Vurum bekleme süresi arttıkça takım ve iş parçası arasındaki kalıntıların uzaklaştırılması verimli bir şekilde yapılabileceğinden dolayı sonraki aralıkta verimli kıvılcım boşalımları gerçekleşecektir.
- *Kıvılcım aralığı*: İşleme esnasında takım ile iş parçası arasındaki mesafedir. Bu boşlukta kıvılcım, malzemenin iletkenliğine bağlı olarak gerçekleşir. Kıvılcım aralığı hem verimli işleme için hem de oluşan kalıntıların verimli bir şekilde temizlenmesi için işleme süresi boyunca korunmalıdır. Kıvılcım boşluğunun korunması için servo ya da step motorlar kullanılmaktadır.

- *Dielektrik sıvı:* EEİ sırasında kıvılcım dielektrik sıvının mevcudiyetinde takım ve iş parçası arasındaki boşlukta gerçekleşir. Yaygın olarak gazyağı, iyonlaştırılmış su, hidrokarbon yağı dielektrik sıvılar olarak kullanılmaktadır. Bu sıvılar; yüksek dielektrik dayanımı, etkili yıkama kabiliyeti, düşük viskozite ve hızlı geri kazanım gibi özelliklere sahip olmalıdır. Kıvılcım boşluğundaki artan sıcaklık nedeniyle dielektrik iyonize olur ve plazma durumuna ulaşarak buharlaşma yoluyla talaşı kaldırır.
- *İş parçası ve takımın dönmesi:* Dönme hareketi, dielektrik sıvının dolaşımı ve çalışma yüzeyi üzerindeki sıcaklık dağılımı üzerinde olumlu etkiye sebep olmaktadır. Dönme hareketiyle işleme bölgesinden daha fazla kalıntı parçacıklarının uzaklaştırılması ve iş parçasının daha hızlı bir şekilde soğutulması kolaylaşmaktadır.

3.1.2. EEİ Yönteminde Temel Performans Karakteristikleri

EEİ yönteminde iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve bağlı aşınma (BA) olmak üzere üç temel performans değerlendirilmesi yapılmaktadır.

- *İş parçası işleme hızı (İİH):* Birim zamanda iş parçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmidir. İİH değeri, iş parçası toplam aşınma hacminin (İTAH) toplam işleme süresine (TİS) bölünmesi ile edilmektedir. (Eşitlik 3.1).

$$\text{İİH [mm}^3\text{/dak]} = \text{İTAH [mm}^3\text{]} / \text{TİS [dak]} \quad (3.1)$$

- *Elektrot aşınma hızı (EAH):* EEİ'de elektrottan da bir miktar malzeme kaybı gerçekleşir. EAH, birim zamanda elektrottan aşınan malzeme hacmidir. EAH değeri, elektrot toplam aşınma hacminin (ETAH) toplam işleme süresine (TİS) bölünmesi ile elde edilmektedir (Eşitlik 3.2).

$$\text{EAH [mm}^3\text{/dak]} = \text{ETAH [mm}^3\text{]} / \text{TİS [dak]} \quad (3.2)$$

- *Bağlı aşınma (BA):* Bağlı aşınma (BA), EAH değerinin İİH değerine oranıdır. Eşitlik 3.3'e göre hesaplanmaktadır [57].

$$BA (\%) = (EAH / \ddot{I}H) \times 100 \quad (3.3)$$

3.2. EEİ PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ

3.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, iş parçasında istenilen geometriyi elde edebilmek amacıyla uygulanan işleme parametreleri sonucu iş parçası yüzeyinde oluşan izlerdir. Yüzey pürüzlülüğü, makine elemanı parçalarının kalitesini belirlemedeki en önemli özelliklerden biridir. Düzgün ve kaliteli bir yüzey elde edildiğinde, makine elemanlarının yorulma mukavemetinde ve korozyon direncinde artış gözlemlenmektedir. Bu sebeple işlem öncesi iş parçası için istenilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tespiti önem arz etmektedir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde kullanılan terimler ve parametreler ise;

Örneklem uzunluğu (lr): Dalgalanma ile pürüzlülüğü ayırmada kullanılan nominal dalga boyudur.

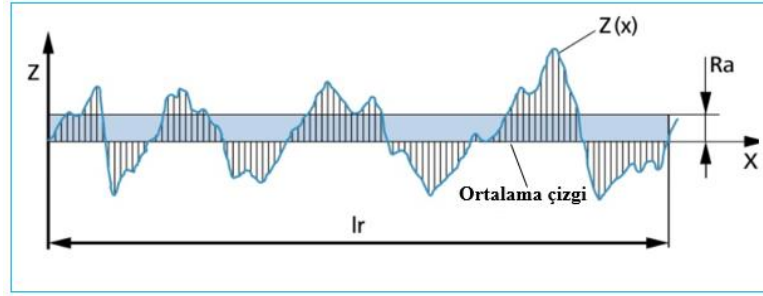
Değerlendirme uzunluğu (ln): Yüzey parametrelerinin değerlendirildiği uzunluktur.

Ortalama çizgi: Hangi yüzey sapmalarının ölçüleceğini belirten referans çizgidir.

Profil piki: Profilin bir kısmında, ortalama çizginin üzerindeki maksimum yüksekliktir.

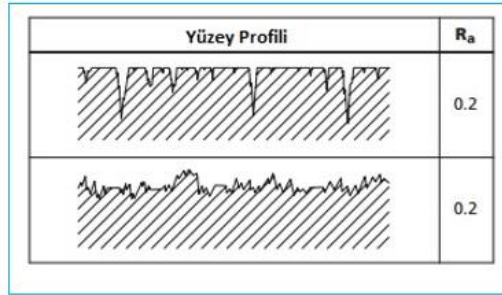
Profil vadisi: Profilin bir kısmında, ortalama çizginin altındaki maksimum derinliktir.

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra): Ortalama pürüzlülük (Ra), pürüzlülük profili boyunca profil ortalama çizgisinden sapmalara (Zx) ilişkin tüm değerlerin aritmetik ortalamasıdır. Ra yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Ra yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi [58].

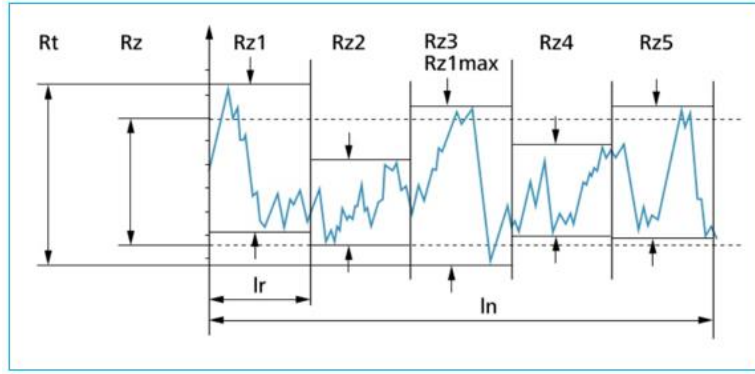
Ancak ortalama pürüzlülük parametresi, pürüzlülüğü ölçülen yüzeyin yapısı hakkında tam bir bilgi vermek için yeterli olmayabilir. Örneğin; Şekil 3.4’de gösterilen iki farklı yüzeyin ortalama pürüzlülük değeri aynı olmasına rağmen, pürüzlülük ölçümü gerçekleştirilen bu iki yüzey aslında farklı özelliklere sahip yüzeylerdir. Bu sebeple, iş parçalarının yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde yalnızca ortalama pürüzlülük değerini (R_a) dikkate almak çok doğru bir yaklaşım olmayabilir.



Şekil 3.4 Aynı R_a değerine sahip farklı yüzey şekilleri.

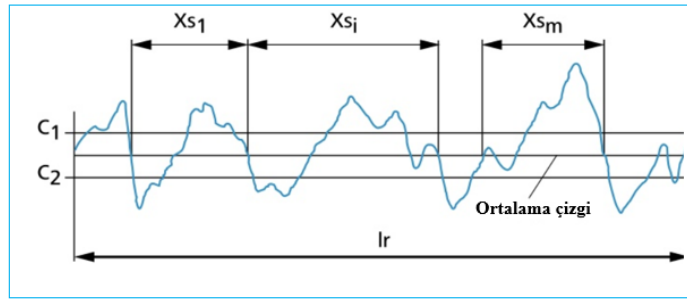
Maksimum profil yüksekliği (R_z): Maksimum profil yüksekliği, değerlendirme uzunluğu içindeki en büyük tepe yüksekliği ile en büyük vadi derinliği arasında elde edilen R_z profil yüksekliklerinin ortalama değeridir. Genellikle beş referans uzunluğu bulunmaktadır ancak bu sayı modern ölçüm ekipmanları ile değişebilir. En yüksek sapmayı gösteren referans uzunluğundaki R_z değeri, R_{zmax} veya R_{max} olarak adlandırılır (Şekil 3.5) [59].

Toplam profil yüksekliği (R_t): Toplam profil yüksekliği, (genellikle beş referans uzunluğu kapsar) değerlendirme uzunluğu içindeki en büyük profil tepe yüksekliği ile en büyük profil vadi derinliği yüksekliklerinin toplamıdır (Şekil 3.5) [59].



Şekil 3.5 Rz ve Rt yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi [58].

Profil elemanlarının ortalama genişliği (S_m): Şekil 3.6'da gösterildiği gibi ölçüm uzunluğundaki pürüzlülük dalga tepe noktaları arasındaki genişliklerin ortalama değeridir.



Şekil 3.6. S_m yüzey pürüzlülüğünün şematik gösterimi [58].

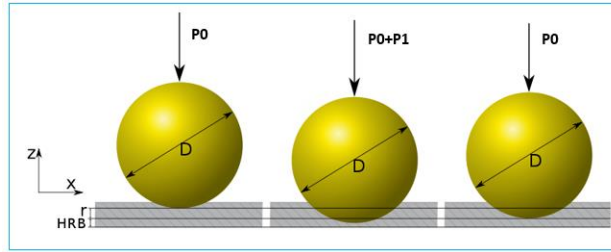
3.2.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri

Sertlik, bir malzemenin kalıcı şekil değiştirmeye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Bu konuda en efektif sertlik ölçüm yöntemleri, numune üzerinde oluşturulan fiziksel izlerin üzerinde yapılan ölçümler doğrultusunda yapılan değerlendirmelerle elde edilen ölçümlerdir. Bu kapsamda yapılan ölçümler yüzey sertliği olarak adlandırılmakta olup ölçümde kullanılan başlıca yöntemler: Rockwell, Brinell ve Vickers olarak öne çıkmaktadır.

Rockwell sertlik ölçme yöntemi: Rockwell sertliğinin değeri (RSD) birimsiz bir sayı olup bu değeri elde etmek için konik uç, batıcı uç veya bilye şeklinde farklı uçlar kullanılmaktadır. Farklı deney yöntemleriyle yapılan ölçüm sonucu elde edilen farklı

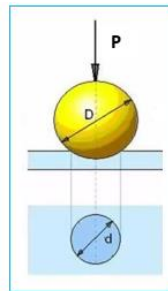
düzeydeki sertlik değerleri RSD-A, RSD-B, RSD-C, RSD-D gibi farklı simgelerle tanımlanmaktadır. Rockwell sertlik ölçümünde malzemenin sertlik değerine göre uç çeşidi ve kullanımı farklılaşmaktadır.

Bu yöntemde batma derinliği ölçüleceği için yüzey pürüzlülüğü sonuçları etkileyebilir. Bunu gidermek için önce batıcı uç küçük bir yükü (P_0 =ön yük) malzemeye daldırılarak alet sıfır düzeyine ayarlanır. Daha sonra toplam yüke tamamlanacak şekilde ana yük (P_1) uygulanır. Son olarak ana yük (P_1) kaldırılır (Şekil 3.7). Meydana gelen kalıcı izdeki derinlik artışı bulunarak mevcut göstergeden Rockwell sertlik değeri okunur.



Şekil 3.7. Rockwell sertlik ölçümünün şematik gösterimi [60].

Brinell Sertlik Ölçme yöntemi: Brinell sertlik ölçme metodu, çekme gerilimi 150 kg/mm^2 den az olan demir, çelik ve metal olmayan malzemelere uygulanır. Bu sertlik ölçme metodunda değişik çaplı küresel çelik bilyalar kullanılır. Bilya çapları ve uygulanacak ağırlık, sertliği ölçülecek malzemenin cinsi ve kalınlığına göre seçilir. Kalın parçalar için uygulanacak ağırlık $187,5$ ilâ 3000 kg arasında değişmektedir. Şekil 3.8'de gösterilen şekilde uygulanan (P) ağırlığı, küresel çelik bilyanın batan kısmının alanına (A) oranladığımızda (BSD) sertliği elde edilir (Eş. 3.4) [60].



Şekil 3.8. Brinell sertlik ölçümünün şematik gösterimi [60].

$$BSD = P / A \quad (3.4)$$

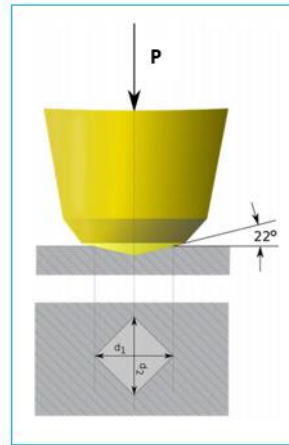
İz alanı, bilya çapı (D) ve iz çapı (d) cinsinden yazıldığında, Bilya iz alanı Eşitlik 3.5 ile hesaplanır.

$$A = \frac{\pi.d}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}), \quad mm^2 \quad (3.5)$$

Alan formülünü Eşitlik 3.4'de yerine koyduğumuzda Birinel sertlik formülü Eşitlik 3.6 elde edilir.

$$BSD = \frac{2P}{\pi.d (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad kg/mm^2 \quad (3.6)$$

Vickers sertlik ölçüm yöntemi: Vickers yöntemin kapsamında 136° tepe açısına sahip olan bir baskı elemanı kullanılarak belirlenen yük altında malzemeye bastırılır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi bastırılan baskı elemanının bıraktığı dörtgen izin köşegenleri arasındaki mesafe malzemenin sertlik değeri hakkında bilgi sağlamaktadır. Vickers sertlik değerinin bulunmasında Eşitlik 3.7 kullanılmaktadır.



Şekil 3.9. Vickers sertlik ölçümünün şematik gösterimi [60].

$$VSD = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (3.7)$$

Burada P uygulanan yükü (kg), d iz köşegenlerinin ortalaması (mm) olup $d=(d1+d2)/2$ formülü ile hesaplanır. d1 ve d2 sırasıyla ölçülen köşegen uzunluklarıdır.

Bu kapsamda farklı bölgelerden alınan dörtgenlerin köşegen uzunlukları ölçülerek ortalama köşegen uzunluğu bulunur. Bu ortalama uzunluk formülde yerine konularak malzeme sertlik değeri elde edilir. Vickers sertlik ölçümünde kullanılan ağırlığın vickers denkleminde ötürü bir önemi olmayıp alınan ölçümde ortaya çıkan sertlik yükün değerine bağlı değildir. Bu kapsamda 1 ile 120 kg arasındaki ağırlıklar kullanılabilir. Belirlenen yük numune üzerinde 15-20 sn tutulduktan sonra, baskı ucu numunenin üzerinden kaldırılarak deney tamamlanmaktadır. Vickers sertlik ölçüm yöntemi hem sert hem yumuşak malzemeler için uygun bir ölçüm yöntemi olup genellikle hassasiyet gerektiren ölçümlerde tercih edilmektedir. Vickers sertlik yönteminin hassas olmasından dolayı numunenin ölçüm alınacak bölgesi oksitlerden, mekanik pürüzlerden arındırılmış olmalıdır. Parça yüzeyinin pürüzsüz ve parlak olması gerekmektedir. Bundan dolayı ölçüm öncesi mekanik yollarla temizleme ve parlatma işlemine tabi tutulur. Bununla birlikte yapılan ölçümlerdeki doğruluk yüksek olduğu gibi tüm malzeme tipleri için tek tip batıcı uç kullanılmaktadır. Diğer birçok yöntemin aksine sertlik ölçümünde metallerde kullanabildiği gibi seramik malzemelerde de kullanılabilir.

3.3. TAKIM ÇELİKLERİ

Demir alaşımları, öncelikle demir-karbon esaslı olan sade karbonlu çelik alaşımlarını, takım çeliklerini ve dökme demirleri içermektedir. Geniş kullanım alanı olan takım çelikleri, su verme ve temper ısıl işlem ile yüksek sertlik elde edilebilen yüksek karbonlu çeliklerdir. Bu çelikler, talaş kaldırmak için kesici takımların imalatında, yüksek dayanım, sertlik, tokluk veya yüksek sıcaklık direnci gibi özellikler gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Takım çeliklerinin kimyasal bileşiminin çok geniş aralıklarda olması bu çeliklerin diğer çelik grupları ile kesişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle takım çeliklerinin kimyasal bileşimine göre sınıflandırılması mümkün olmadığı için sınıflama ana kullanım alanına göre yapılmaktadır. DIN 17350 normunda kullanım alanına göre yapılan sınıflandırmada, takım çelikleri; soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri adı altında

toplanmıştır. Bu çelikleri birbirinden ayıran özellikleri, malzeme özelliklerini etkileyen kullanım sıcaklığı ve malzemenin temperleme sıcaklığıyla sertliğinin değişimidir [61].

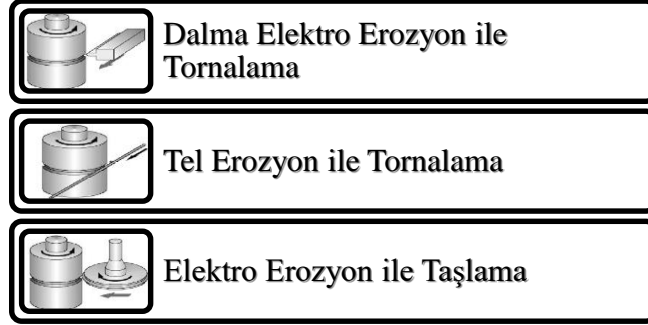
3.3.1. Soğuk İş Takım Çelikleri

Soğuk iş takım çelikleri; işlem sıcaklığı 200 °C'nin altında çalışan iş parçalarının talaşlı ve talaşsız imalatında kullanılır. Soğuk iş takım çelikleri, metalik veya metalik olmayan malzemeler için kesme kalıpları, soğuk deformasyon ve plastik şekillendirme kalıpları yapımında en çok tercih edilen çelik grubudur. Bu kalıplarda darbe olmadığında tokluk düşük olabilir. Fakat darbeye maruz kalan kalın sac kesen makas ağızları, zımbalar veya soğuk makaslarda tokluğu yüksek olması, kırılma ve atma gibi risklerin minimuma indirilmesi gerekir. Bu nedenle bu kalıplar genelde basma, aşınma, bükme ve kayma yüklenmeleri altında çalıştıkları için sertlik, aşınma direnci ve tokluk gibi önemli özellikleri olan soğuk iş takım çeliklerinden imal edilirler. Sertlik ve aşınma dayanımı, soğuk iş takım çeliklerinin en önemli özelliğidir. Sertlik de mikroyapıya bağlıdır. Sertlik sadece matris yapıdan gelebildiği gibi aynı zamanda karbürlere ve kalıntılara da bağlı olabilir. Bu alaşımlı çeliğin mikroyapısındaki martenzit, kalıntı östenit, karbür miktarı ve dağılımı malzemenin 5 sertliğini belirleyen en önemli unsurlardır. Bu çelikler genelde; kesme takımları, delme zımbaları, makine bıçakları, cıvata perçin ve somunları, kağıt ve plastik bıçakları, kazıma bıçakları, sıvama kalıpları vb. makine parçalarının veya sistemlerin imalatında kullanılmaktadır. Soğuk iş takım çelikleri de yapısına ilave edilen alaşım elementleri miktarı ve üretim aşamasında uygulanan ısı işlemler dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır [61].

3.4. ELEKTRO EROZYON İLE TORNALAMA TEKNİĞİ

Elektro erozyon ile tornalama (EET) yöntemi, klasik EEİ tezgâhlarına takım ve/veya iş parçasından en az birini döndürmek amacıyla döner bir eksen eklenerek silindirik formlar oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. EET; havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli, sıcaklığa dayanıklı, sert, kırılma ve işlenmesi zor olan silindirik formlar ve helisel profiller üretmek için kullanılmaktadır [62].

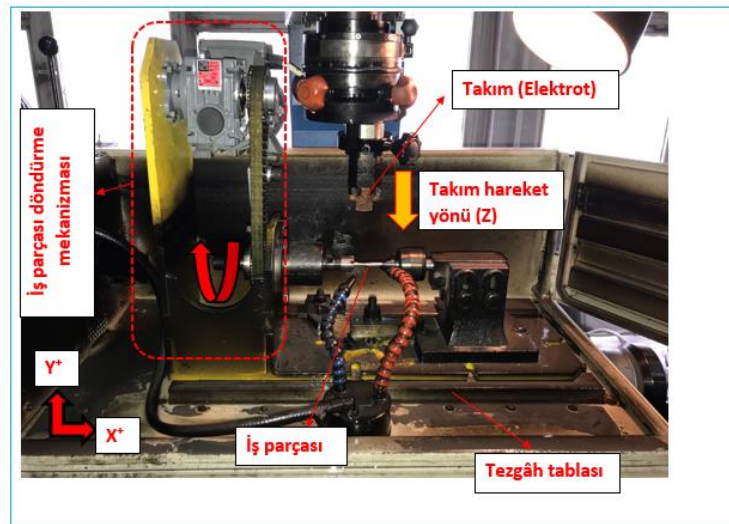
EET yönteminde Şekil 3.10’da gösterildiği gibi üç farklı işleme yöntemi ile karşılaşılmaktadır. Yöntemlerin ikisinde takım ve iş parçasından en az birinin dönmesi sonucu işleme yapılırken diğerinde ise hem takım hem de iş parçasının dönmesi ile silindirik formların işlenmesi yapılabilmektedir.



Şekil 3.10. Elektro erozyon ile silindirik profilleri işleme yöntemleri.

3.4.1. Dalma Elektro Erozyon İle Tornalama

Klasik dalma elektro erozyon tezgâhında silindirik geometriye sahip iş parçalarını işleyebilmek amacıyla döner mekanizma tezgâhın ana tablasına monte edilerek C ekseninde dönme hareketi sağlanır ve böylece elektro erozyon ile tornalama işlemi yapılır. Bu yöntemde takım (elektrot) sabit olup dönme hareketini iş parçası yapmaktadır. Şekil 3.11’de klasik dalma elektro erozyon tezgâhına monte edilmiş C ekseninde dönme hareketini sağlayan mekanizma görülmektedir.

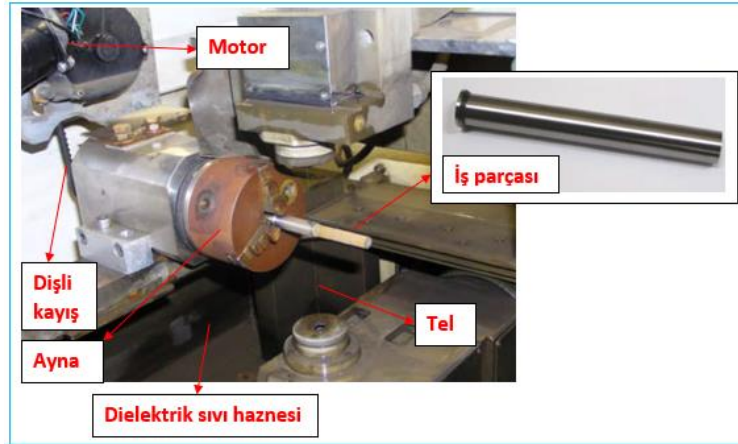


Şekil 3.11. Dalma elektro erozyon tezgâhında tornalama mekanizması.

Burada silindirik parçada elde edilecek geometri takıma verilmekte olup, takım Z ekseninde doğrusal hareket yaparken dönen iş parçasının (C eksen) üzerine profil aktarılmaktadır.

3.4.2. Tel Erozyon İle Tornalama

Tel erozyon ile işleme, günümüzde yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan işleme yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Elektriksel olarak iletken olan bütün malzemelerde sertliğe bakılmaksızın termal enerji kullanımı yoluyla işleme yapabilmektedir. Bu tezgâhlarda, farklı elektriksel kutuplara bağlanan tel elektrot, iş parçasına yaklaştırıldığında elektriksel boşalımınla yüksek bir sıcaklık meydana gelmekte ve yerel metal ergime yolu ile talaş kaldırılmaktadır. Özellikle havacılık, nükleer ve otomotiv endüstrilerinde işlenmesi zor malzemeleri işlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çapaksız parça işlenebilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün diğer imalat yöntemlerine göre az olması önemli avantajlarından. Bu yüzden son yıllarda klasik tel erozyon tezgahına Şekil 3.12’de gösterildiği gibi bir dönme hareketini yapan mekanizma eklenerek silindirik geometriler elde edilebilmektedir.

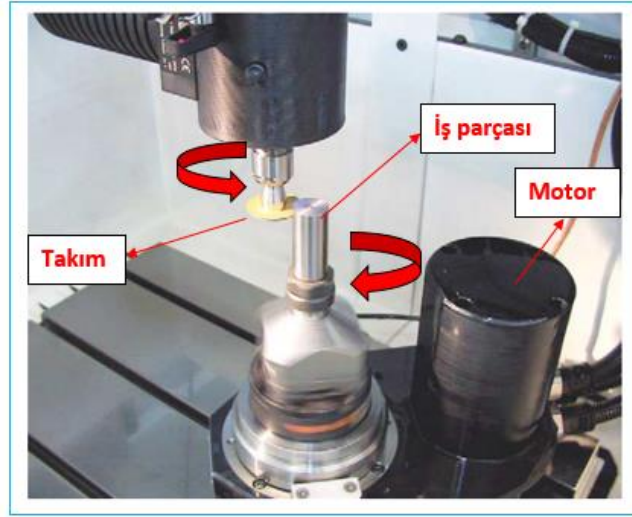


Şekil 3.12. Klasik tel erozyon tezgâhında tornalama mekanizması [63].

3.4.3. Elektro Erozyon İle Taşlama

Şekil 3.13’de gösterildiği gibi elektro erozyon ile taşlama, sert metal işlemede yaygın olarak kullanılan ve geleneksel işleme yöntemi ile gerçekleştirilemeyen iş parçalarında

kullanılan temassız bir işleme yöntemidir. İşlenecek olan parçanın geometrisi ne olursa olsun elektriksel olarak iletken olan tüm malzemeleri işlemek için elektro erozyon prensibine göre çalışmaktadır [64].



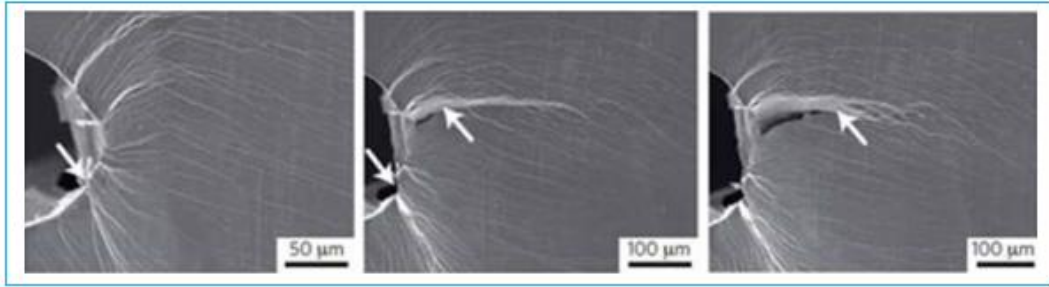
Şekil 3.13. Elektro erozyon ile taşlama mekanizması [65].

3.5. YORULMA TEORİSİ

Malzemeler kullanıldıkları yere göre değişen çeşitli yükler altında tekrarlı gerilmelere (dönme, eğilme, titreşim gibi) maruz kalabilmektedir. Meydana gelen gerilmeler akma dayanımının altında olmasına rağmen, çok sayıda tekrarlanan gerilmeler sonucunda malzemenin kopmasına yorulma denir [66].

Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Alman mühendis August Wöhler tarafından 1860'lı yıllarda yapılmıştır [67,68]. Demiryolu vagonlarının aksları üzerinde yapılan bu sistematik çalışmalarda Wöhler, beklenmedik aks kırılmalarını araştırmak için aksların çalışma sırasında maruz kaldığı tekrarlanmalı yükleri taklit eden bir cihaz geliştirmiş ve çalışmalarının sonucunu 1867 yılında duyurmuştur [69,70]. Deney sonuçlarına göre, yorulma olaylarında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Wöhler'in geliştirdiği, eksenleri gerilme değeri (S) ve kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayısından (N) oluşan S-N diyagramları kullanılarak, gerilme aralığı limiti altındaki gerilme değerlerinde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir [67].

Yorulma olayı, değişken yükler altında malzemenin yüzeyinde çatlak oluşması, çatlak yayılması ve bunu takiben malzemenin kopma-kırılma olayı olmak üzere üç safhadan oluşur. Şekil 3.14’de yorulmaya maruz kalan bir malzemenin yüzeyinde oluşan çatlak başlangıcı ve yayılması görülmektedir.



Şekil 3.14. Yorulma olayında çatlak başlangıcı ve yayılması [68].

- Çatlak başlangıcı: Yorulma çatlak; genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çukurda, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerlerde başlar. Çatlak oluşumu için genellikle yeterli derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi, uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması ve uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı gibi ana etken gereklidir [68].
- Çatlak ilerlemesi: Yorulma çatlakları genel olarak malzeme yüzeyinden başlayarak, kayma hatları ile orta kısımlara doğru ilerler. Ayrıca malzemenin içindeki mikro çatlaklar ve çatlak ucunda oluşan gerilme yığılması, çatlak ilerletebilecek seviyede ise çatlak ilerler. Uygulanan gerilme, çatlak ilerlemesi için yetersiz ise malzemede yorulma olayı gerçekleşmez. Uygulanan gerilme, çatlak ilerlemesine neden olacak kadar büyük ise çatlak malzemenin zayıf bölgelerinden ilerlemeye başlar. Böylece yıpranma yavaş yavaş tüm kesite yayılır. Bu çatlak yayılması esnasında büyük ve belirleyici bir uzama veya büzülme görülmez [68].
- Kırılma: Yıpranma sebebiyle ayrışma işlemi yeterli derecede ilerledikten sonra, kesitin geri kalan kısmı uygulanan yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme ani bir şekilde kopar. Yorulma olayı malzemede önemli bir plastik şekil değiştirme yapmadığından ve uyarı vermeden, elastikiyet limitinin

altındaki gerilmelerde malzemenin ani olarak kırılması veya deforme olması sebebiyle tehlikelidir [68].

3.5.1. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

Makine elemanı parçalarının yorulma dayanımı birden fazla faktörün etkisi altında kalmaktadır. Bu faktörlerin etki şeklinin bilinmesi ve bu etki şeklini göz önünde tutarak hareket edilmesiyle yorulma deneylerinde daha yüksek sonuçların elde edilmesi mümkün olacaktır. Böylelikle deney sonuçlarını daha iyi bir şekilde yorumlanarak, yorulma etkisine maruz kalan bir malzeme daha elverişli koşullar altında kullanılmış olacaktır. Deney koşulları ile ilgili belli başlı yorulma ömrü faktörleri şunlardır:

Malzemenin cinsi ve bileşim etkisi: Malzemelerin çekme dayanımındaki artış genellikle yorulma dayanımına da yansımaktadır. Bu yüzden malzemelerin çekme dayanımının artışına sebep olan her işlem malzemenin yorulma dayanımını da artırır. Örneğin; çeliklerde alaşım elementleri, uygun ısıl işleme malzemenin sertleştirilmesi gibi işlemler malzemenin statik çekme dayanımının yanı sıra yorulma dayanımını da artırmaktadır [71].

Yüzey özelliklerinin etkisi: Yorulma; çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve kırılma olmak üzere üç aşamadan meydana gelmektedir. Çatlak oluşumu genellikle malzemelerin dış yüzeylerinden başlamaktadır. Bunun sebebi normal yüklemeler altında genellikle maksimum gerilmelerin yüzeylerde meydana gelmesidir. Malzemelerin yüzeylerindeki düzensizlikler çentik etkisi yaratacağından bu bölgelerde gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Bu durum yüzeyde çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Bu yüzden iş parçalarının yüzeyleri işlemeden sonra parlatılarak yorulma dayanım sınırı yaklaşık olarak %15-%40 arasında artırılır. Ek olarak yüzey sertliği de malzemenin yorulma dayanımını etkilemektedir. Yüzeyi sertleştirilmiş bir malzemenin yorulma dayanımı, yüzey sertliği çatlak oluşumunu güçleştireceğinden dolayı daha yüksektir. Bu yüzden özellikle çeliklerde sementasyon ve nitrasyon gibi işlemler yapılarak yüzey sertleştirilmesi yapılmaktadır [71,72].

Çentik Etkisi: Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Parça kesitinde görülen bu tür süreksizlikler gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak başlangıcına neden olurlar. Çentik etkisi, çentiğin şekil ve boyutlarına bağlıdır. Çizelge 3.1’de çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi görülmektedir [73].

Çizelge 3.1. Yorulma deneyi numunesinde çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanımı sınırına etkisi [71].

Çentik Şekli ve Boyutu	Yorulma Dayanımı Sınırının Azalması (%)
250 mm yarıçaplı yiv	0
25 mm yarıçaplı yiv	5
6 mm yarıçaplı yiv	10
Küçük kavisli çıkıntı	25
90° açılı çıkıntı	50
90° açılı V çentik	65

Mühendislik uygulamalarında, yorulma dayanımının saptanması için daha gerçekçi bir yaklaşım, gerilme konsantrasyonlarının etkisini göz önünde bulundurmadır. Bu bağlamda, bazı faktör veya katsayılar tanımlanmıştır. Bunlardan birisi (Kf) ile gösterilip “Çentik Faktörü” veya “Yorulma Dayanımını Küçültme Faktörü” adını alır ve Eşitlik 3.8 ile hesaplanmaktadır.

$$Kf = \frac{\text{Çentiksiz Yorulma Dayanım Sınırı}}{\text{Çentikli Yorulma Dayanım Sınırı}} \quad (3.8)$$

Gerilmelerin etkisi: Yorulma deneylerinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle aksenal gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakındır. Burulma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar çok farklıdır. Uygulamada parçaya gelen gerilmeler deneylerdeki gibi sabit genlikli ve sabit periyotlu değillerdir. Böyle bir durum göz önünde bulundurulursa, zaman zaman aşırı gerilmelerin uygulandığı görülür. Aşırı gerilmeler de yorulma ömrünü kısaltır. Ancak bu konuda karar verebilmek için istatistiksel hesaplamadan faydalanılır. Deney öncesinde numunede oluşan kalıcı iç gerilmeler de yorulma olayına etkiler. Genellikle numune yüzeyinde oluşturulan basma yönünde kalıcı iç gerilmeler, yorulma dayanımı sınırı ve yorulma ömrünü arttırlar. Yüzeyde kalıcı basma gerilmelerini oluşturmada kullanılan ticari yöntemlerden biri, yüzeylerin küçük

pasolarla haddelenmesidir. Diğer bir yöntem ise yüzeyin aşırı hıza sahip çok küçük elik bilyalarla dvlmesidir [73].

Korozyonun etkisi: Korozyonun kimyasal etkisi ile yorulmanın mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına “Korozyonlu Yorulma” olayı denir. Yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması, yorulma dayanımını azaltır. Burada korozyonun neden olduğu yüzeydeki çok küçük oyuklar (pürüzler) entik etkisi yaparak, malzemenin yorulma dayanımının düşmesine neden olurlar. Korozyon ve yorulma olayının beraber oluştuğu durumlarda, yorulma dayanımında çok büyük düşüşler görülür. Korozyonun buradaki etkili rolü çatlak teşekkülü ve çatlağın ilerlemesini hızlandırmasıdır. Korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansın etkisini de değiştirmektedir. Normal deneylerde 10.000 çevrim/dk nın altındaki frekanslarda, deney sonuçları frekanstan etkilenmemektedir. Koroziif ortamlarda, frekansın etkisini azaltmak için mümkün olduğu kadar yüksek hızlarda çalışılmalıdır. Küçük hızlarda, deney zamanı uzayacağından korozyon daha etkili olacak ve frekansın etkisini dolaylı olarak etkileyecektir [73].

Sıcaklığın etkisi: Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Ancak sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik hassasiyetini arttırmaktadır. Oda sıcaklığının üzerine yapılan deneylerde, genellikle sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir. Sadece düşük karbonlu eliklerde 200 – 300 °C arasında yorulma dayanımında artış görülür. Bu olay 200 – 300 °C arasında düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaşlanmasına uğrayarak çekme dayanımlarının artmasına bağlıdır. Deney sıcaklığı belirli bir sıcaklığa çıktığında sürünme olayı daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde (transgranüler), srnmede tane sınırında (intergranüler) olmaktadır. Makine parçalarının kullanılma esnasında sıcaklık değişimlerine uğramaları, ısısız gerilmelere yol açarak yorulmaya neden olabilirler. şayet bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlamasına yol amışsa bu olaya “Isıl (Termal) çok” adı verilir. Ama atlama çok sayıda tekrarlanan ısısız gerilmeler sonucunda oluşmuşsa bu olaya “Isısız (Termal) Yorulma” adı verilir [73].

Frekansın etkisi: Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesinlikle saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200 ile 10.000 çevrim/dk'lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerde, alüminyum alaşımlarında ve bakırda çok yüksek deney hızlarında Yorulma Dayanımı Sınırının da yükseldiği görülmüştür. Çok düşük deney hızlarında da Yorulma Dayanımı Sınırının azaldığı kabul edilmektedir [71]. Öte yandan çok yüksek frekanslarda, malzemede oluşan ısılarda kısa zamanda yayılması, yorulma dayanımı sonuçlarını olumsuz yönde etkileyeceği kabul edilmektedir [73].

3.5.2. Yorulma Deney Türleri

Makine elemanları çalışma esnasında değişik gerilme ve şiddete maruz kalabilmektedir. Bu tür gerilmelerin düzgün periyodlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek, teknik yorumlar yapılabilmektedir. Bu yüzden yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında bilgiler edinebilmek için genellikle dört farklı yorulma deney türü uygulanmaktadır. Bunlar:

- Eksenel gerilmeli yorulma deneyi: En basit sistem olan bu tip deneyde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune eni boyunca da üniform olarak dağılır. Bu tip etkilerin olduğu uygulamalara en iyi örnek, içten yanmalı motorların bağlantı rotlarıdır. Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleri de oldukça etkilidir.
- Eğme gerilmeli yorulma deneyi: Bu deney türü kendi arasında ikiye ayrılır.

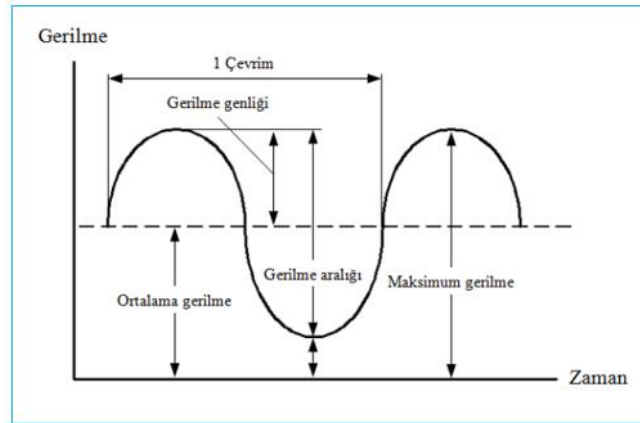
- a) Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi
- b) Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi

Birinci deney türünde, numune nötr bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek, taşıtlarda kullanılan yaprak yaylarıdır (makas yayları). İkinci deney türünde, numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere örnek olarak, hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir.

- Burulma gerilmeli yorulma deneyi: Burada deney numunesi, sabit bir eksene göre tekrarlanan burulma gerilmesi altındadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burulma gerilmeleri oluşur.
- Bileşik gerilmeli yorulma deneyi: Yukarıda sayılan farklı türdeki gerilmelerin ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusudur. Uygulamada en çok, eğme-burma gerilmeli ve aksenal-burma gerilmeli bileşik durumlar gözlenmektedir. Motorların krank mili başlıklarında gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.

3.5.3. Yorulma İle İlgili Terimler

Çevrim: Birçok deney cihazında zamanla sinüs dalga değişimini gösteren yük (gerilme) uygulanır. Şekil 3.15’de görülebileceği gibi gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir.



Şekil 3.15. Yorulma deneyindeki periyodik yüklemeye eğrisi [74].

Maksimum Gerilme (S_{max}): Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmelerdir. Çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri negatif (-) işaretlerle gösterilir.

Minimum Gerilme (S_{min}): Uygulanan gerilmeler içinde en düşük cebirsel değere sahip olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme (S_m): Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalaması olan gerilmedir (Eşitlik 3.9).

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (3.9)$$

Gerilme Aralığı (S_r): Maksimum ve minimum gerilme arasındaki cebirsel farktır (Eşitlik 3.10).

$$S_r = S_{max} - S_{min} \quad (3.10)$$

Gerilme Genliği (S_a): Gerilme genliği, gerilme aralığının yarısıdır. Başka bir deyişle maksimum ve minimum gerilmenin cebirsel farkının yarısıdır (Eşitlik 3.11).

$$S_a = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (3.11)$$

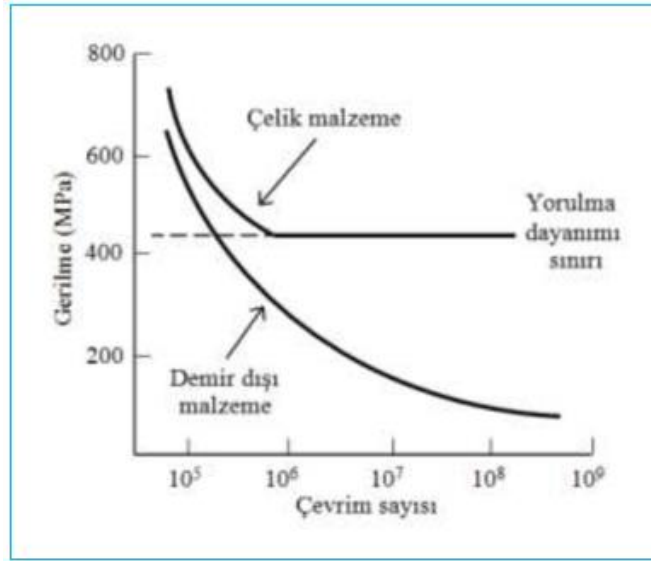
Gerilme Oranı (R): İki türlü gerilme oranı tanımlanır. En çok kullanılanı R ile gösterilip, minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranıdır (Eşitlik 3.12). İkincisi A ile gösterilip, gerilme genliğinin ortalama gerilmeye bölünmesiyle elde edilir (Eşitlik 3.13).

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \quad (3.12)$$

$$A = \frac{S_a}{S_m} \quad (3.13)$$

S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı): Bu eğrinin ilk şekli Wöhler tarafından 1858-1860 yılları arasında bulunduğu için buna Wöhler Eğrisi de denmektedir [67]. Bu diyagram birbirinden farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S-N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8-12 numune kullanılır. Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına ya da kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir.

Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur. Şekil 3.16’da görülen tipik S-N diyagramlarında gerilme eksenini ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya maksimum gerilme (S_{max}) ya minimum gerilme (S_{min}) ya da gerilme genliği (S_a) kaydedilir. Çevrim sayısını gösteren apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır. Şekilde 3.16’da demir ve demir dışı malzemeler için S-N eğrisi görülmektedir [74].



Şekil 3.16. Demir ve demir - dışı malzemelere ait tipik S–N diyagramı.

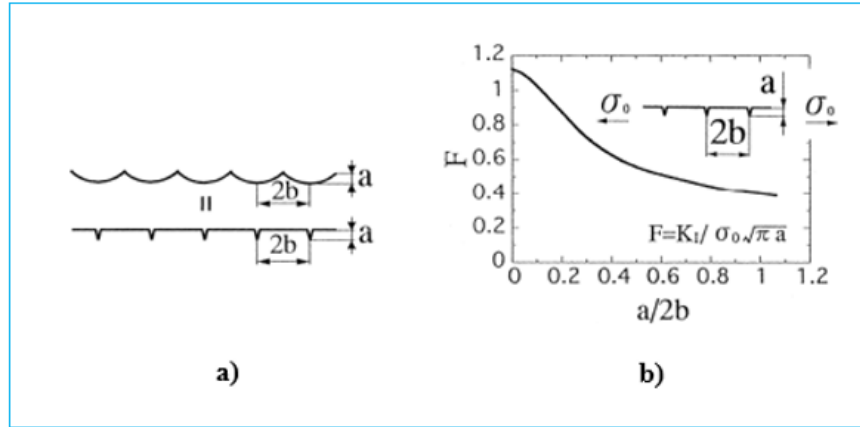
Yorulma Dayanımı: Malzemenin N çevrim sonunda çatlama (veya kopma) gösterdiği gerilme olarak tanımlanır. Bu değer bazı hallerde benzer numunelerin N çevrimde dayanabileceği gerilmenin medyan ortalaması olarak alınır. Bazı hallerde ise ortalama gerilme sıfır iken ($S_m=0$) N çevrimde benzer numunelerin % 50’sinin dayanabileceği gerilme olarak alınır.

Yorulma Sınırı: S-N diyagramında eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmeye “Yorulma Sınırı” veya “Yorulma Dayanım Sınırı” denir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir.

Yorulma Ömrü: Bazen numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama (veya kırılma) gösterdikleri N çevrim sayılarının medyan ortalaması şeklinde tanımlanır.

3.6. MURAKAMI MODELİ İLE YORULMA ÖMRÜ TAHMİNİ

Mühendislik malzemelerinde yorulma ömrünü azaltan çeşitli faktörler ve kusurlar vardır. Özellikle, kusurlar kritik boyutuna ulaştığında malzemelerde hasar mekanizmaları çok hızlı meydana gelir. Kritik kusur boyutunun; malzemenin sertliği, yüzey kalitesi, yüzey ve yüzey altındaki mikroyapı değişimleri ve imalat sonrası farklı tabakaların oluşumu ile değiştiği bilinmektedir [1,75]. İmalat sonrası tespit edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kullanılması ile \sqrt{area} modeli yardımıyla teorik yorulma ömrü tahmin edilebilmektedir. Bu modelde, Şekil 3.17a'da gösterildiği gibi periyodik bir pürüzlülük çentiklerinin yorulma hasarını tetikleyen çatlak hasarına eşdeğeri ve Şekil 3.17b'de ise periyodik yüzey çatlaklıkları için gerilme yoğunluğu faktörü ΔK_{th} eğrisini pürüzlülük tepe vadi profilinin derinliğine ve genişliğine bağlı olan geometrik bir düzeltme faktörü olarak tanımlanmıştır [75].



Şekil 3.17. a) Periyodik yüzey pürüzlülüğü çentikleri ve eş değer çatlakları, b) Periyodik yüzey çatlakları için gerilme yoğunluk faktörü.

Bu modele göre sınır gerilme faktör aralığı ΔK_{th} sadece iki pürüzlülük parametresi kullanılarak tahmin edilebilmekte olup, Eşitlik 3.14'de verilmiştir [76]. Bu parametrelerden birincisi \sqrt{area} (pürüzlülük dalgasının tepe vadi arasında kalan alanın karekökü), ikincisi yüzeyin Vickers sertlik değeridir.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (HV + 120) (\sqrt{area})^{1/3} \quad (3.14)$$

Dış kuvvetlerin etkisinde pürüzlülük tepe vadi bölgelerindeki gerilme yoğunluğu (gerilme yığılması) faktör aralığının maksimum değeri ΔK Eşitlik 3.15 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta K = f \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (3.15)$$

Burada yüzey pürüzlülükleri için $f=0.65$, iç çatlaklar veya kusurlar için $f=0.5$ olarak alınmaktadır. Murakami'nin önerdiği kestirim modelinde $R=-1$ (gerilme oranı) olarak tanımlanmıştır. Yani tam değişken dinamik yorulma durumu göz önünde bulundurulmuştur. Burada " \sqrt{area} " ifadesi yüzeydeki profil dalgalarını ifade eden hata boyutudur. Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17 genel yorulma ömrü formülünde pürüzlülük tepe ve çukur değerlerinin hangi aralıkta olduğunu göstermektedir. Bu durumda:

$a/2b < 0.195$ koşulunda,

$$(area)^{1/2}/2b \cong 2.97(a/2b) - 3.51(a/2b)^2 - 9.74(a/2b)^3 \quad (3.16)$$

$a/2b > 0.195$ koşulunda,

$$(area)^{1/2}/2b \cong 0.38 \quad (3.17)$$

Yorulma sınır gerilme değeri ise " σ_w " Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15 birleştirilerek Eşitlik 3.18 ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_w = \frac{1.43 (HV+120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \left[\frac{1-R}{2} \right]^2 \quad (3.18)$$

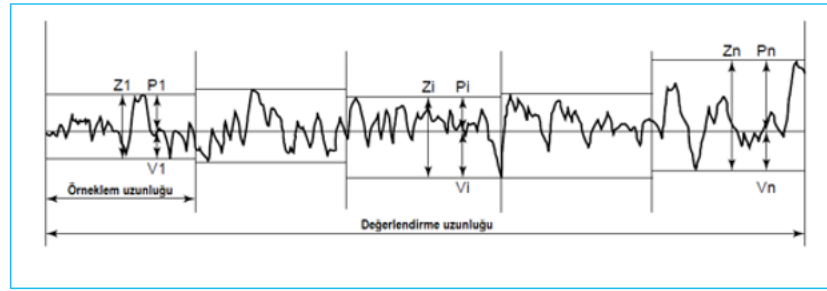
Gerilme hassasiyet faktörü ise Eşitlik 3.19 ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4} \quad (3.19)$$

Murakami, geliştirdiği \sqrt{area} modelinde a ve 2b terimleri ile tanımlamış olduğu yüzey pürüzlülük dalgasının genişliği ve derinliğini ifade eden parametreler olarak Rz ve Sm değerlerini kullanmıştır. Yorulma modelinde Sm pürüzlülük değerini, Rz değerini ise a terimini ifade etmektedir. Şekil 3.19’da gösterilen her örneklem uzunluğu içindeki profil tepe yüksekliği “ P_i ” ve vadi derinliği “ V_i ” nin toplamıyla “ Z_i ” elde edilir (Eşitlik 3.20). Değerlendirme uzunluğu içindeki tepe ve çukur değerlerinin ortalaması ise Rz değerini vermektedir (Eşitlik 3.21).

$$Z_i = P_i + V_i \quad (3.20)$$

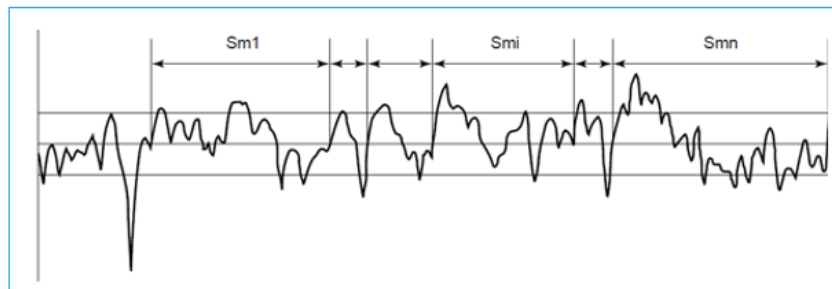
$$Rz = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n)/n \quad (3.21)$$



Şekil 3.18. Yüzey pürüzlülüğünün maksimum yüksekliği.

Sm değerleri ise Şekil 3.19’da gösterildiği gibi ölçüm uzunluğuunda pürüzlülük dalga tepe noktaları arasındaki genişliklerin ortalaması olup, Eşitlik 3.22 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (3.22)$$



Şekil 3.19. Yüzey pürüzlülüğünün tepe noktaları arasındaki genişliğin ortalaması.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. MALZEME VE EKİPMANLAR

Tezin amaçlarından ilki EET yöntemi ile işlenebilirliği incelemek, ikincisi ise işlenen soğuk iş takım çeliğinin işleme parametrelerinin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini tespit etmektir. Bu sebeple deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme, ekipmanlar ve yöntemler hakkındaki bilgiler bu bölüm içerisinde detaylı olarak verilmiştir.

4.1.1. EEİ Tezgahı

Deneysel çalışmalarda Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Takım Tezgahları Laboratuvarında bulunan FURKAN marka, M25 A tip endüstriyel dalma elektro erozyon tezgahı kullanılmıştır (Şekil 4.1). Bu tezgâh piyasada en yaygın kullanılan dalma EEİ tezgâh modellerinden birisidir. Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



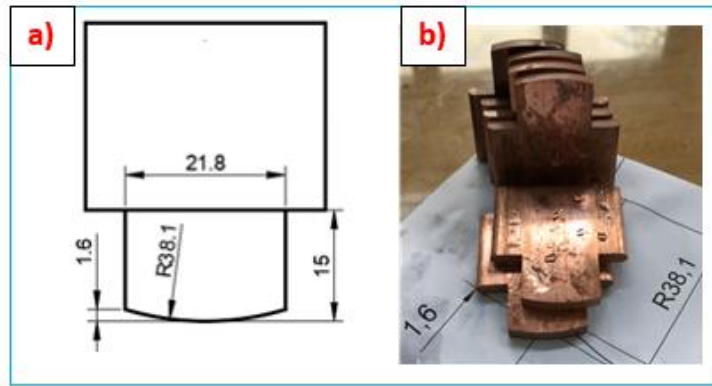
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan M25 A dalma elektro erozyon tezgahı.

Çizelge 4.1. M25 A dalma elektro erozyon tezgahının genel özellikleri.

JENERATÖR	
Güç 220 V, 50 Hz, 3f	3 KVA
Maksimum sürekli çalışma akımı	25 A
Güç seviyesi kontrolleri	5 Kademe; 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1
Maksimum aşınmasız talaş kaldırma	Cu+/Çelik- 150 mm ³ /dak Gr+/Çelik- 170 mm ³ /dak
En ince yüzey	1,5 µm (Ra)
MAKİNA GÖVDESİ	
İş tablası ölçüleri (XY)	550x250 mm
Tabla hareket ölçüleri (XY)	300x200 mm
Tambur skala bölüntüsü	0,02 mm
İş haznesi	860x470x280 mm
Maksimum iş parçası ölçüleri (XYZ)	660x410x200 mm
Z EKSENİ	
Otomatik kafa mekanizması	Yüksek hassasiyetli, özel tasarım servo
Hareket kursu	160 mm
Okuma hassasiyeti	0,01 mm
Kaba hareket	200 mm

4.1.2. Elektrot (Takım)

Deneyleerde bakır elektrotlar kullanılmıştır. Bu elektrotlar elektro erozyon yöntemi ile ASTM E466 standartlarında yorulma numunesi işlemlerinde kullanılmak üzere Şekil 4.2a'da gösterilen ölçülerde hassas olarak işlenerek Şekil 4.2 b'de gösterilen şekilde hazırlanmıştır. Takımların belirtilen ölçülerde kesilmesi işlemi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan tel erozyon tezgâhında yapılmıştır.



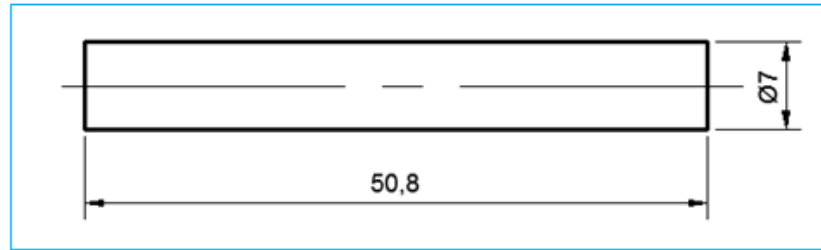
Şekil 4.2. a) Takımın boyutları, b) Tel erozyon tezgahında işlenmiş takımlar [4].

4.1.3. İş Parçası Malzemesi

Deneyleerde imalat sanayisinde özellikle itici pim, delici zımba, kılavuz, matkap, sabitleme pimi, kesici takım ve cerrahi takımların imalatında yaygın olarak kullanılan AISI L2 soğuk iş takım çeliği (115CrV3) kullanılmıştır. Yüksek aşınma direncine sahip soğuk iş takım çelikleri yüksek mukavemet ve yüksek tokluk özelliğine sahiptir. AISI L2 soğuk iş takım çeliği malzemesinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Deney numuneleri 7mm çapında 50,8 mm boyunda CNC torna tezgâhında hazırlanmıştır. Deney numunelerinin şematik görünümü ise Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 AISI L2 soğuk iş takım çeliği malzemesinin kimyasal kompozisyonu.

Çelik Kalitesi DIN 1.2210	Kimyasal Kompozisyonu (%)							Isıl İşlem Durumunda	
	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Tavlama HB	Sertleştirme HRC
Minimum	1,10	0,20	0,15	0,50	0,07	0	0	-	58
Maksimum	1,25	0,40	0,30	0,80	0,12	0,03	0,03	223	64

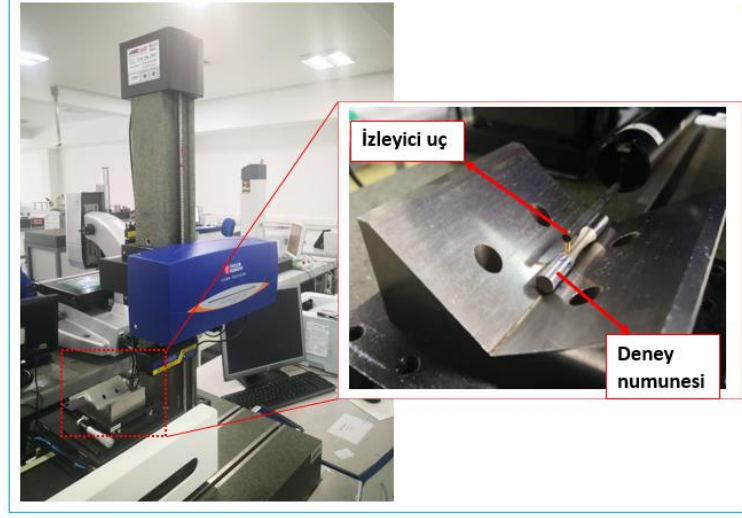


Şekil 4.3. Deney numunesinin boyutları.

4.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Orta Doğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş.’de bulunan Talysurf PGI tip pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde her deney numunesinden 3’er adet Ra, Rz, Rt ve Sm yüzey pürüzlülük parametreleri kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 4.4’de

numunelerden biri üzerinden ölçüm alınırken, numunenin ve cihazın algılayıcı iğne ucunun konumlandırılması görülmektedir.



Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü cihazı.

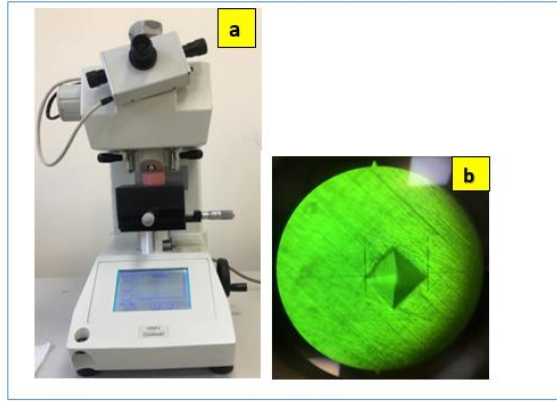
4.1.5. Mikro Sertlik

Deney numunelerinin mikroskop altında incelenebilmesi için numune hazırlama işlemleri kapsamında bakalite alma işlemi uygulanmıştır. Bakalite alma işleminin öncelikli amacı şekilsiz ve tutulması zor parçaların mikroskop altında incelenebilmesi için uygun hale getirilmesidir. Bir diğer amacı ise numune hazırlama esnasında önemli köşe/kenar ve yüzeylerde oluşabilecek deformasyonlardan korumaktır. Deney numuneleri Şekil 4.5’de gösterilen malzemeler ile, soğuk sertleştirme reçinesi ile bakalite (kalıba) alma işlemi yapılmıştır. Mikro sertlik ölçülecek yüzeylere sırasıyla 120, 400, 800, 1200 ve 2500 nolu kaba ve ince zımparalar kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Soğuk bakalite alma işlem sıralaması.

Bakalite alınan deney numunelerinden Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak mikro sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Şekil 4.6a’da gösterilen SHIMADZU marka sertlik cihazında yapılmıştır. Ölçümlerde birim alana 0.1 kg yük uygulanarak, tepe açısı 136°’lik elmas piramit uç batırılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6b). Deney numunelerinin her birinde 20 µm aralık ile dıştan merkeze doğru yedi farklı noktadan mikro sertlik ölçümü yapılmıştır.

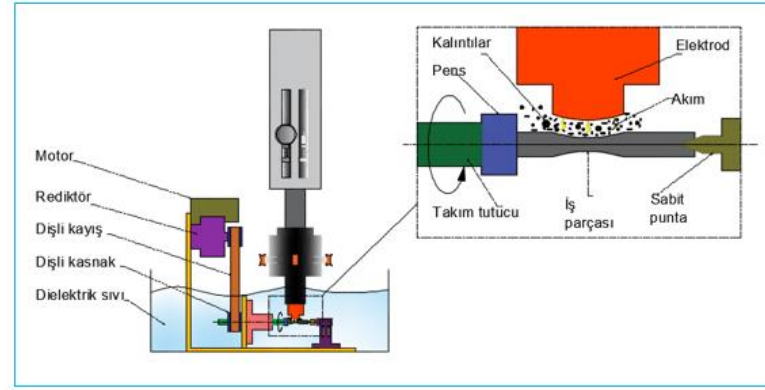


Şekil 4.6. a) SHIMADZU Vickers sertlik cihazı, b) Deney numunesinde oluşan iz.

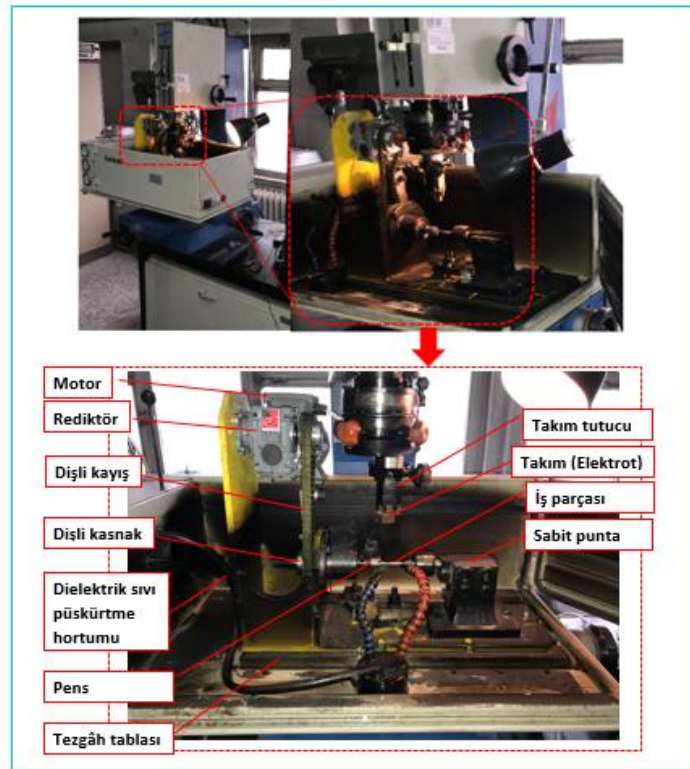
4.2. DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI VE İMALATI

DeneySEL çalışmada, klasik dalma elektro erozyon tezgâhında silindirik geometriye sahip iş parçalarını işleyebilmek amacıyla döner mekanizma tasarlanıp, elektro erozyon tezgahının iş tablasına monte edilerek tornalama deneyleri yapılmıştır. Dalma

elektro erozyon tezgahındaki tornalama mekanizmasının çalışma prensibi Şekil 4.7’de ve tezgaha monte edilmiş görünümü ise Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Tasarlanan dalma EET deney düzeneğinin şematik görünümü [4].



Şekil 4.8. EET deney düzeneği.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi tasarlanan sistemde elektrik motoru, dielektrik sıvının içerisinde kalmayacak şekilde yapılmıştır. Elektrik motorundan alınan dönme hareketi, dişli kayış vasıtasıyla hassas işlenmiş pensli tutucuya aktarılmıştır. İş parçasının bir ucu pense bağlanırken diğer tarafı sabit punta ile desteklenmiştir. İş

parçasının paralelliği ve salgısı, 0.001 mm hassasiyetli kompratör ile kontrol edilerek kalibre edilmiştir. Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Furkan M25 A model dalma elektro erozyon tezgahında yapılmıştır. Tezgah sinyal jeneratörü, 3 kVA kapasitede ve açık devre voltajı 80 V özdeş darbelerden oluşacak şekilde ayarlanmıştır. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmış olup, 2 bar püskürtme basıncı ile takım iş parçası arasındaki boşluğa yanal püskürtme uygulaması yapılarak işleme artıklarının uzaklaştırılması sağlanmıştır.

4.3. DENEY TASARIM VE ANALİZ

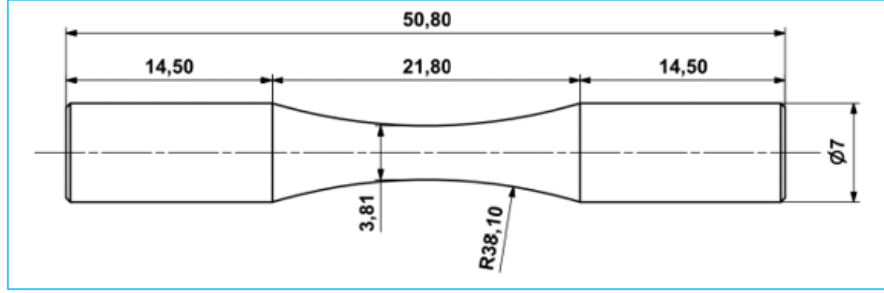
Deney tasarımından önce, farklı dönme hızlarında (20-300 dev/dak aralığında) EET ile ön deneyler gerçekleştirilmiş ve işlenmiş numunelerin pürüzlülüğü ölçülmüştür. Pürüzlülük değerinin literatürde bahsedildiği gibi artan dönme hızıyla arttığı, ancak Ra değerleri ölçümlerine göre %0,8'lik bir farkın olduğu gözlenmiştir. Böylece, gerçek deneyler sırasında elektrik tüketimini azaltmak için dönme hızı 60 dev/dak olarak seçilmiştir. Yapılan ön deneyler ve literatür taraması ile üç farklı boşalım akımı (3, 6 ve 12 A), vurum süresi (3, 6 ve 8 μ s) ve bekleme süresi (5, 6 ve 7 μ s) işleme parametreleri olarak belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen işleme parametreleri için Taguchi L₉ dikey dizisine göre deney tasarımı oluşturulmuş ve EET deneyleri Çizelge 4.3'e göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Deney tasarımı.

Deney no	Boşalım akımı (A)	Vurum Süresi (μ s)	Bekleme süresi (μ s)
1	3	3	5
2	3	6	6
3	3	8	7
4	6	3	6
5	6	6	7
6	6	8	5
7	12	3	7
8	12	6	5
9	12	8	6

4.4. YORULMA DENEY NUMUNESİ

Yorulma deneyleri için ASTM E-466 standardına göre yorulma deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numunesinin teknik resmi Şekil 4.9’da verilmiştir. Her işleme parametresinden 15 adet deney numunesi hazırlanmıştır.

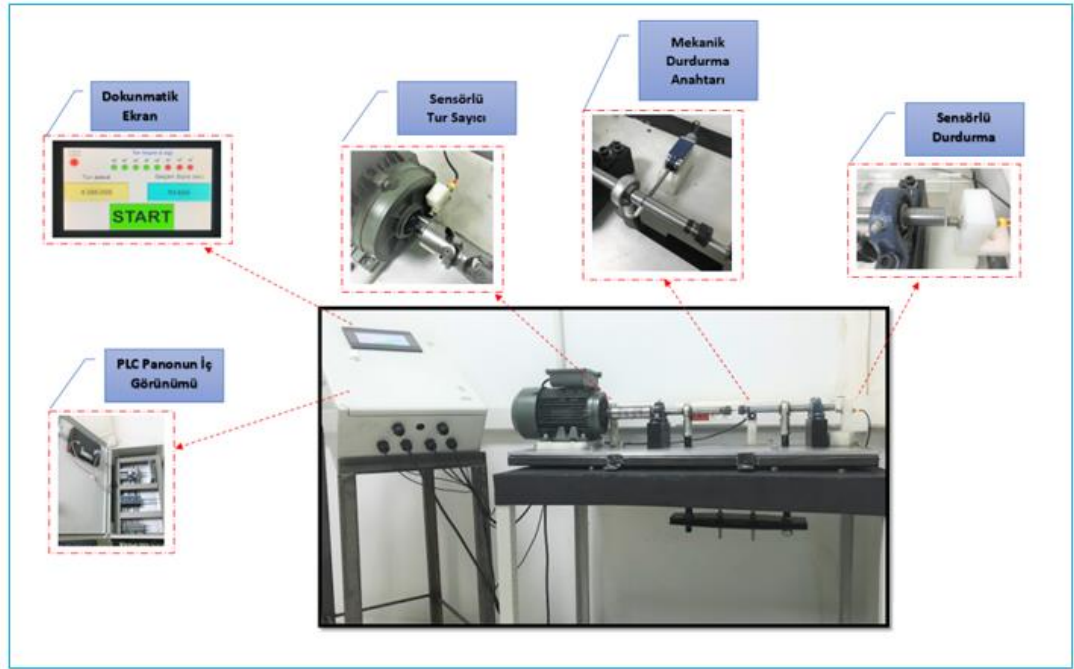


Şekil 4.9. ASTM E-466 yorulma deney numunesi boyutları.

Yorulma numunesi deneyin amacına ve kullanılan yorulma test cihazının türüne göre değişik şekil ve boyutlarda olabilmektedir. Yorulma numunesi temel olarak; test bölgesi (en dar bölge), geçiş bölgesi ve tutuculara bağlanan sap kısmı olmak üzere üç bölümden oluşur. Numunenin test bölgesi kritik gerilmenin oluşturulduğu bölüm olması sebebiyle numunenin en önemli kısmıdır.

4.5. YORULMA DENEY CİHAZI

Yorulma deneylerinde, dönel eğilmeli yorulma cihazı kullanılmıştır. Dönel eğilmeli yorulma test cihazı ve elemanlarının görünümü Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. Yorulma test cihazı genel görünüşü ve elemanları.

Yorulma test cihazının şaft hızı 2800 dev/dak ile çalışmaktadır. Deneylerde $R = -1$ değişken yükleme durumu uygulanmıştır. Yorulma deneylerinde ilk yüklemeler (gerilmeler) malzemenin çekme dayanımının %70'i oranında yapılmıştır. Uygulanan gerilme sonrasında numunenin kaç çevrimde kırıldığı test cihazının üzerinde bulunan PLC ekrandan tespit edilmiştir. Belirlenen her bir yük değeri için kopma ya da sonsuz ömür çevrim sayılarının ortalaması alınarak S-N (Wöhler) diyagramı oluşturulmuştur.

4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)

Yorulma deneyleri sonucu kırılan numunelerin kırılma nedenleri, kırılma şekilleri ve yüzey durumlarının incelenebilmesi için numunelerin kırılan kesit yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca takım yüzeyi üzerindeki element kompozisyonu tanımlamak için EDS analizi yapılmıştır. SEM ve EDS analizlerinde G.Ü.T.F. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu ve EDS aparatı.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışmada dalma EET yöntemi ile AISI L2 soğuk iş takım çeliğinin ASTM E-466 standartlarında yorulma numunelerinin üretilmesi için farklı işleme parametrelerine göre oluşturulan Taguchi L₉ deney tasarımına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), maksimum profil yüksekliği (Rz), profil elemanlarının ortalama genişliği (Sm), mikro sertlik ve yorulma ömrü gibi işleme performans çıktılarının parametrelere göre değişimleri araştırılmıştır. Taguchi L₉ deney tasarımına göre elde edilen İİH, EAH, Ra, Rz, Sm ve Vickers sertlik sonuçları Çizelge 5.1’de toplu olarak verilmiştir.

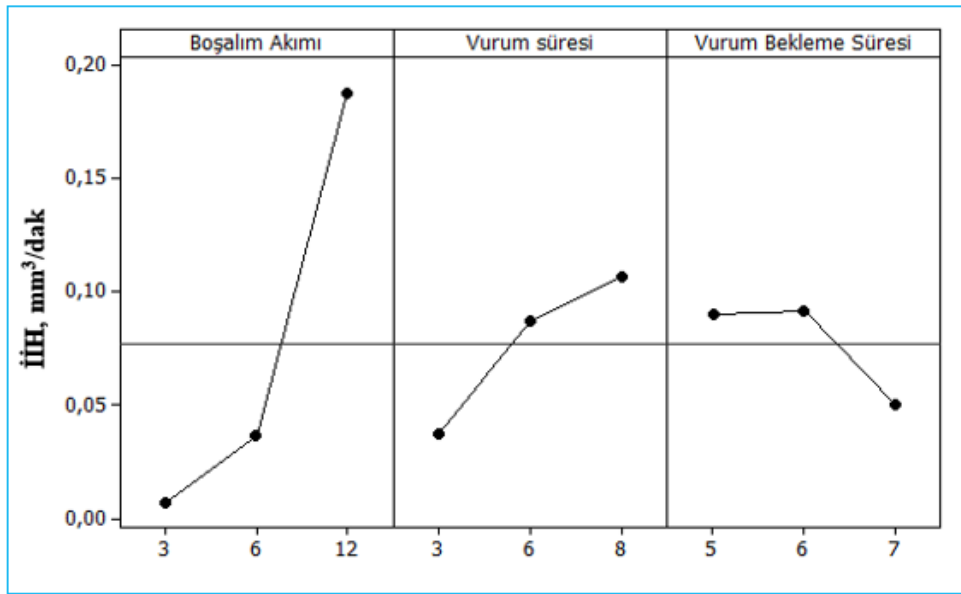
Çizelge 5.1. Dalma EET deney sonuçları.

Deney no.	Boşalım Akımı (A)	Vurum süresi (µs)	Vurum bekleme süresi (µs)	İİH (mm ³ /dak)	EAH (mm ³ /dak)	Ra (µm)	Rz (µm)	Sm (µm)	Vickers sertlik (HV)
1	3	3	5	0,0058	0,00016	2,2673	14,039	164,486	674
2	3	6	6	0,0069	0,00025	2,7568	18,898	247,375	724
3	3	8	7	0,0084	0,00032	3,2614	16,873	355,753	705
4	6	3	6	0,0098	0,00185	3,4292	20,885	215,041	688
5	6	6	7	0,0461	0,00093	4,5076	24,541	267,934	735
6	6	8	5	0,0548	0,00051	4,7037	23,802	304,866	742
7	12	3	7	0,0965	0,01529	3,5661	21,202	272,493	748
8	12	6	5	0,2094	0,00785	5,8929	32,877	293,961	729
9	12	8	6	0,2573	0,00312	7,3766	36,012	398,187	734

5.1. İŞ PARÇASI İŞLEME HIZI (İİH)

Şekil 5.1’de görülebileceği gibi, boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla İİH’nin arttığı görülmektedir [77-79]. Bu durum daha yüksek enerji yoğunluğuna bağlanabilir, bu da elektrottan iş parçasına daha fazla termal enerji aktarılması anlamına gelir. Yani, boşalım akımının artışı ile artan termal enerji, birim zamanda iş parçasının yüzeyinde

yüksek miktarda erime ve buharlaşma nedeniyle daha derin ve daha geniş kraterlere neden olmaktadır. Diğer yandan EET sırasında iş parçasının dönme hareketi ile dielektrik sıvı dolaşımının artması, elektrot ve iş parçası arasındaki kalıntıların hızlı bir şekilde işleme bölgesinden uzaklaşmasını kolaylaştırmaktadır [13]. Bu oluşum, işleme kalitesini arttırarak daha fazla malzemenin çıkarılmasını sağlar. Vurum bekleme süresinin ise İİH üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. İş parçasından talaş kaldırma işlemi dışında kalma süresi, vurum bekleme süresinin artışı ile arttığından ve aynı zamanda iş parçasının dönme hareketi de bu durumu desteklediğinden dolayı İİH'in azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ayrıca, Şekil 5.1'de İİH değerlerinin artan vurum bekleme süresi ile düzensiz bir eğilimde olduğunu göstermektedir. İİH değerlerindeki düzensiz eğim, temel olarak deneysel tasarım nedeniyle vurum bekleme süresinin rastgele dağılımına bağlanabilir.

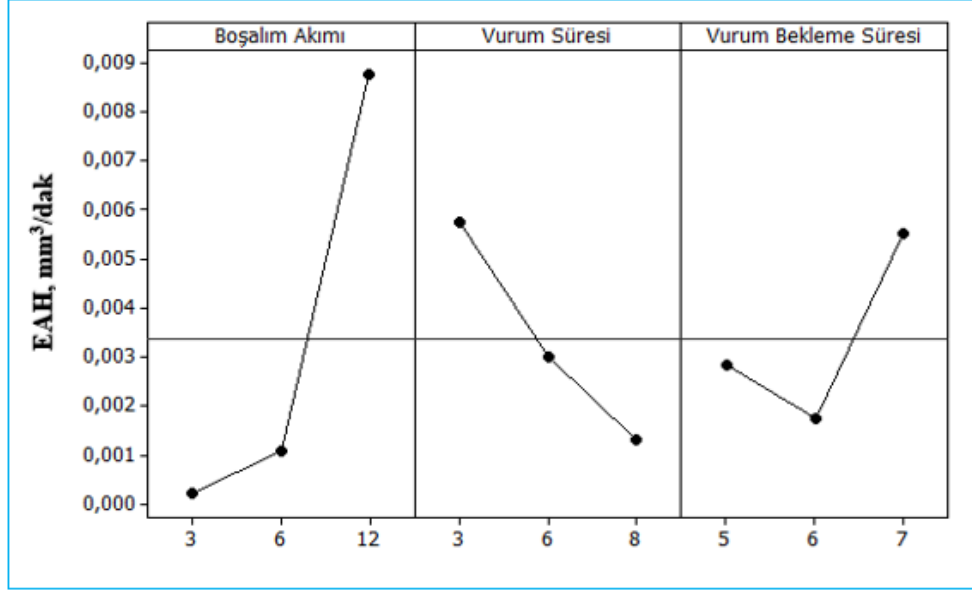


Şekil 5.1. İş parçası işleme hızı ana etki grafiği.

5.2. ELEKTROT AŞINMA HIZI (EAH)

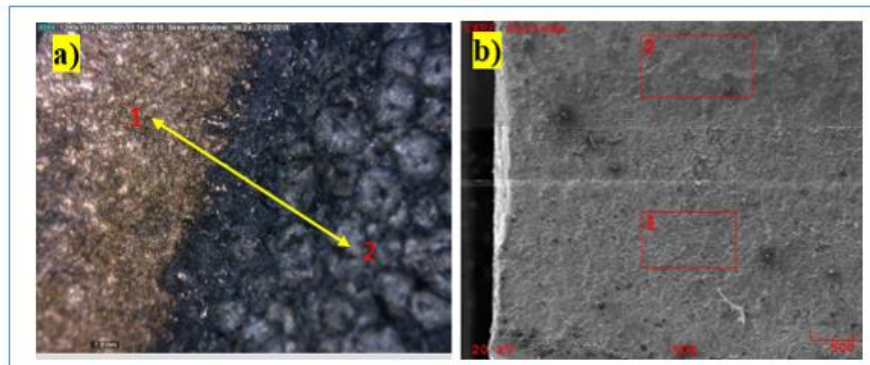
Şekil 5.2 incelendiğinde, boşalım akımının arttırılmasıyla EAH'ın arttığı görülmektedir. Enerji boşalımı sırasında akım iletkenini ve ısı üretimini etkileyen takım ve iş parçası arasında bir plazma kanalı oluşmaktadır. Bu durumun da yüksek miktarda ergime ve termal erozyonun elektrot yüzeyinde oluşan sıcaklığı arttırdığı ve termal deformasyonun artmasına ve takımın aşınmasına neden olduğu görülmektedir

[80,81]. İlaveten, iş parçasının profil geometrisinden dolayı takım temas alanındaki artışa bağlı olarak takımdaki (elektrot) sıcaklık dağılımının sürekli olarak artmasına ve bu da termal deformasyonun artmasına katkıda bulunmuştur.

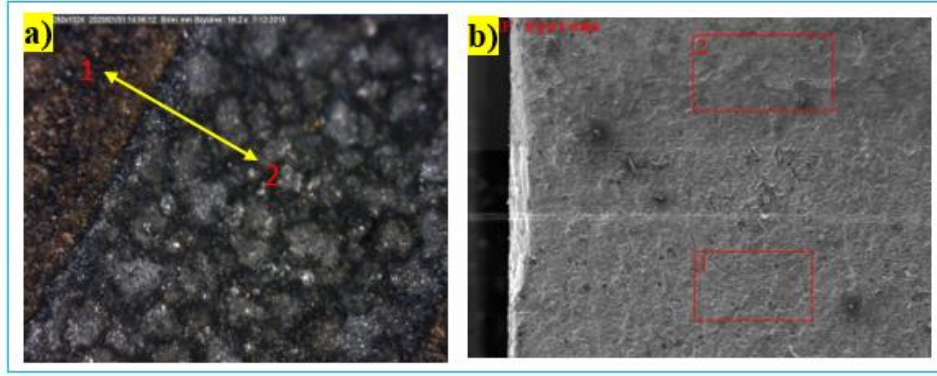


Şekil 5.2. Elektrot aşınma hızı ana etki grafiği.

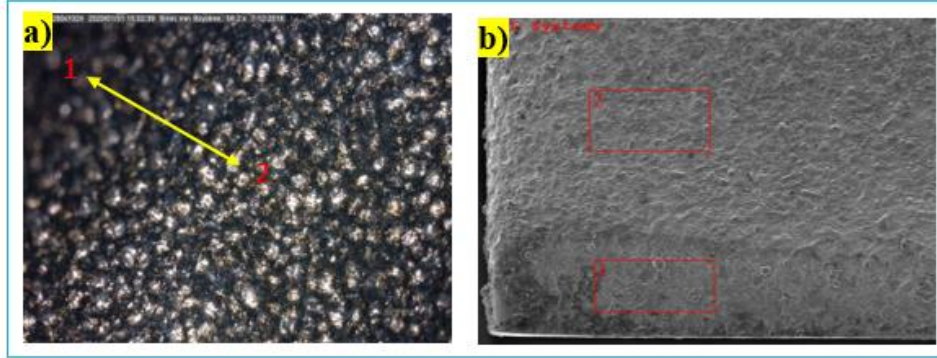
Vurum süresi 3 μ s'den 8 μ s'ye çıkartıldığında takım aşınmasında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dielektrik sıvı olarak kullanılan gaz yağının hidrokarbon bazlı bir sıvı olmasından dolayı, karbonun EEİ sırasında gaz yağından iş parçasına ve/veya takım yüzeyine aktarılmasından kaynaklanmaktadır [82]. Vurum süresinin artmasıyla birlikte daha fazla karbon atomu yayılmıştır ve bu oluşum elektrot üzerinde takım aşınmasını azaltan koruyucu bir film oluşturmuştur [83].



Şekil 5.3. 3 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü [4].



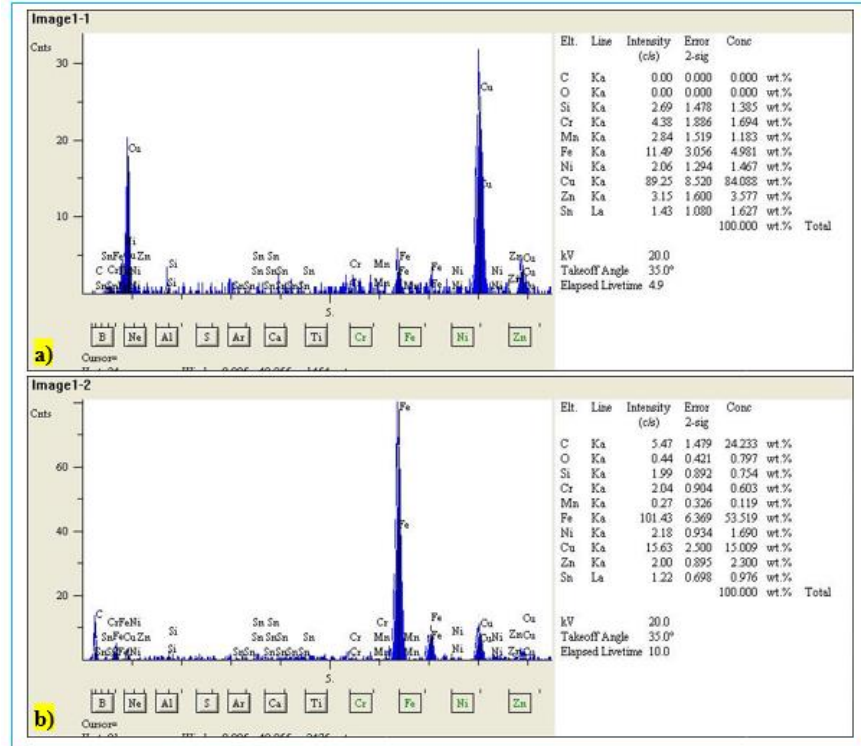
Şekil 5.4. 5 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü.



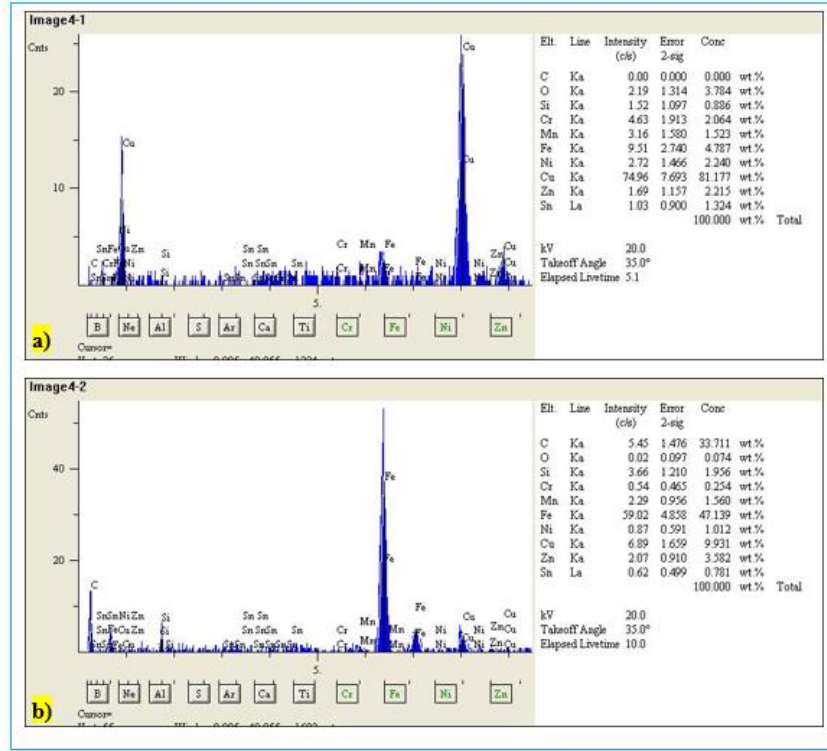
Şekil 5.5. 7 nolu deneyde kullanılan elektrotun yüzeyi; a) Dijital görüntü, b) SEM görüntüsü.

Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de, sırasıyla 3, 5 ve 7. deneylerde kullanılan elektrotların yüzey görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntülerde 1 nolu bölgeler takımın aşınmamış yüzeyini, 2 nolu bölgeler ise işleme sırasında aşınan bölgeleri göstermektedir. Ayrıca şekillerde belirtilen 1. ve 2. bölgeler EDS analizi sonuçlarında kullanılan takım yüzeyi görüntüleridir. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de EDS analizleri sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekillerde a) olarak ifade edilen grafikler takımın işlenmemiş bölgesinin analizi, b) olarak ifade edilen grafikler ise takımın aşınmış bölgesinden alınan analiz değerlerinin sonuçlarını göstermektedir. Şekillerdeki a) ve b) analiz değerleri karşılaştırıldığında, elektrot aşınma yüzeyinde C ve Fe varlığı yoğun olarak gözlenmiştir. Bu oluşum, takım dayanımını artırarak takımın daha az aşınmasına neden olmuştur.

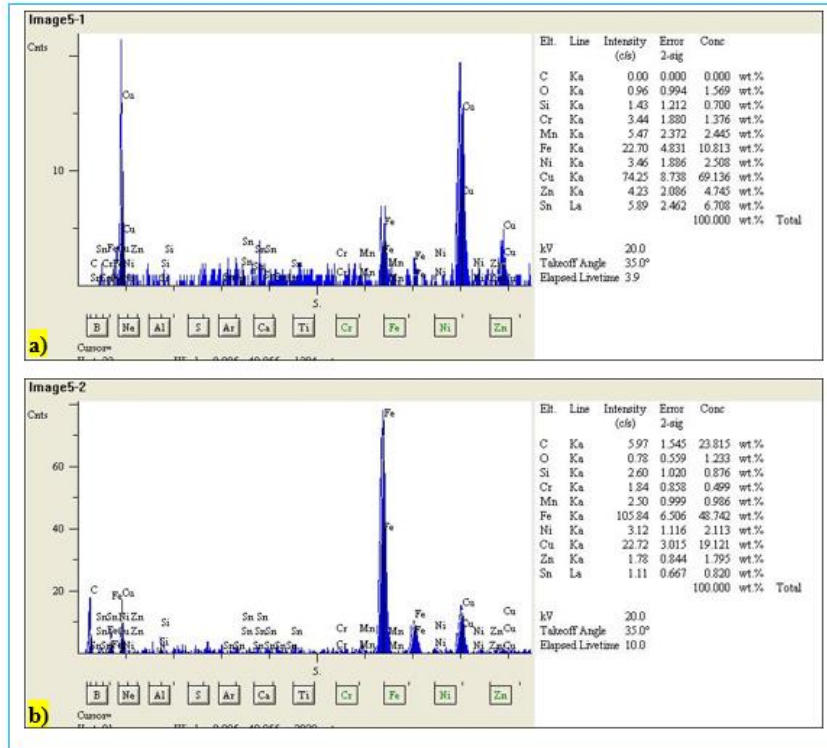
Şekil 5.2'ye göre vurum bekleme süresinin artmasıyla takım aşınmasının düzensiz bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Vurum bekleme süresi en yüksek değere ulaştığında, takım aşınmasının arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, oluşturulan deney tasarımında (Çizelge 4.8) boşalım akımının en yüksek ve vurum süresinin en düşük kombinasyonda olmasıdır. Yani serbest kalan kalıntıların ve/veya karbon parçacıklarının iş parçasının dönme hareketi yapmasından dolayı takım yüzeyine yapışma miktarının azalmasından kaynaklanmıştır [38]. Ek olarak, işlemede kullanılan takım geometrisi dışbükey dairesel bir yüzeye sahip olduğundan, işlemin başında doğrusal olarak kabul edilebilecek küçük bir alanda kıvılcımlar oluşturur. Bu nedenle, EET işlemi sırasında önceden belirlenmiş dalma derinliğine ulaşıldığında, takımın tüm yüzey alanı işlemede kullanılmaktadır. Başka bir deyişle işleme sırasında, takım ve iş parçası arasındaki değişen geometri nedeniyle kıvılcım sayısı ve termal deformasyon sürekli artmaktadır. Sonuç olarak, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı EET işlemi sırasında düzensiz bir takım aşınması meydana gelmiştir.



Şekil 5.6. 3 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi [4].



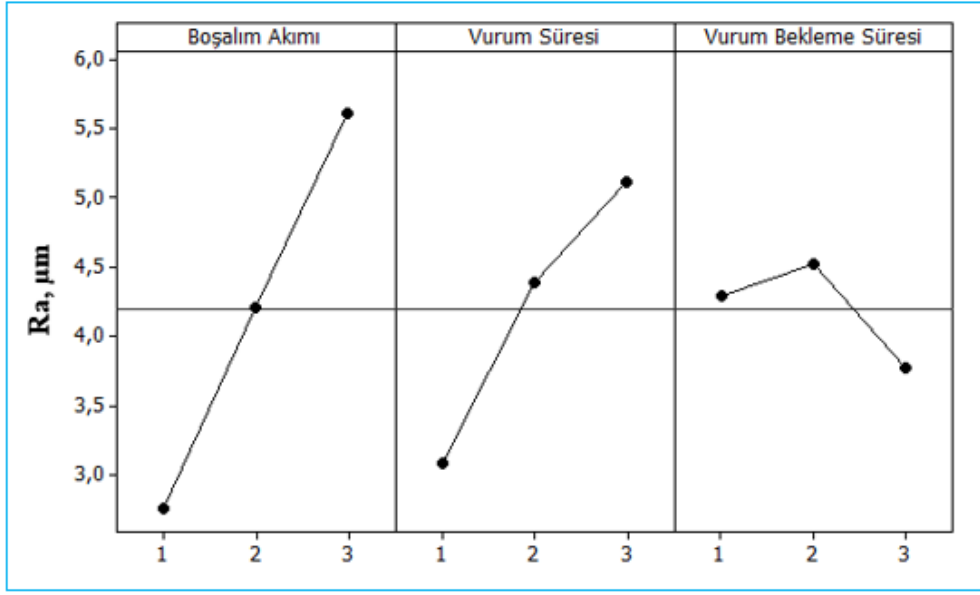
Şekil 5.7. 5 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi.



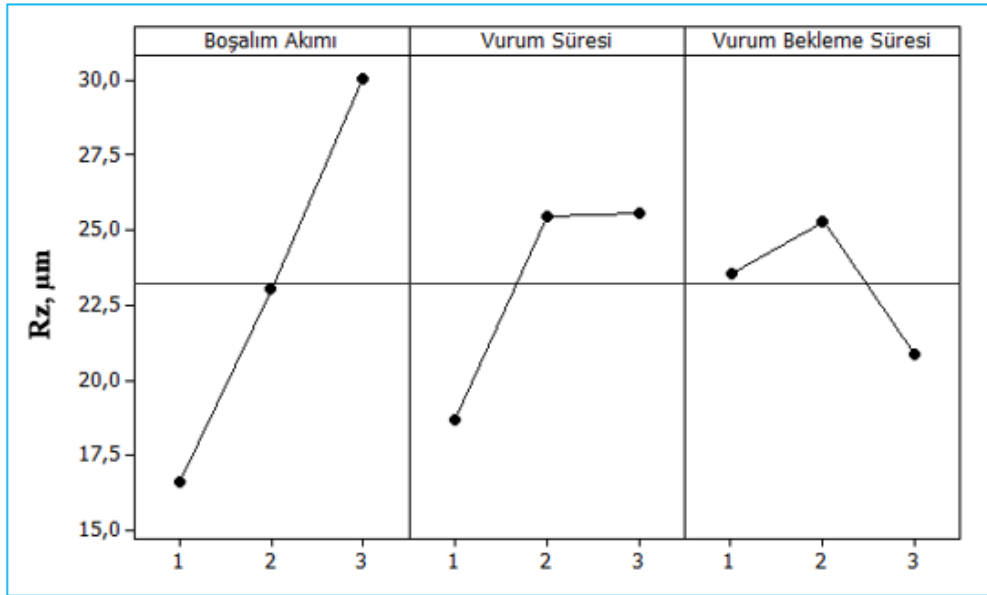
Şekil 5.8. 7 nolu takımın EDS analizi a) Takım yüzeyi, b) Aşınma bölgesi.

5.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİNİN (Ra, Rz, Sm) DEĞERLENDİRİLMESİ

Boşalım akımını artırarak iş parçasına daha fazla termal enerji aktarılması iş parçasından daha fazla talaş kaldırılmasına neden olmaktadır. Böylece, iş parçası yüzeyinde daha derin ve daha geniş kraterler oluşur ve bu oluşum yüzey pürüzlülük değerinde bir artışa neden olur [10,84,85]. Şekil 5.9 incelendiğinde geleneksel dalma EEİ'de olduğu gibi, dalma EET yönteminde boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla Ra değeri artış göstermiştir. Ayrıca, işlenmiş yüzeylerin yüzey morfolojisi Şekil 5.12' de gösterilmiştir. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi, işlenmiş parçaların yüzey morfolojisi, vurum süresi artığında Ra değerlerinin de doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Vurum süresinin artışından kaynaklanan yüksek termal deformasyon, yüzeyde oluşan kraterin derinliğinde ve genişliğinde belirgin bir artışa ve dolayısıyla Ra değerinin artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte Ra değerleri, vurum bekleme süresindeki artışa paralel bir eğilim göstermemiştir. Bu durumun, Taguchi deney tasarımıyla kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 5.1 incelenecek olursa, vurum bekleme süresi seviyelerinin rastgele dağılması nedeniyle yüzey pürüzlülüğü önce artmış sonra azalmıştır. Ayrıca, vurum bekleme süresi arttıkça kıvılcımın düşme süresi her akım değerinde değişmiştir. Boşalım süresinin artmasıyla birlikte, iş parçası yüzeyi daha uzun süre ısı etkisinde kalmış ve erime miktarı kademeli olarak artmıştır. Sonuç olarak, bu durum Ramasawmy ve Blunt [86] tarafından belirtildiği gibi işlenmiş yüzey üzerinde çok yönlü düzensiz ve rastgele dağılmış daha derin kraterler oluşturarak Ra değerinin artmasına sebep olmuştur. Şekil 5.12' de gösterilen üç nolu deneyin yüzey morfolojisi dikkatle incelendiğinde, yukarıda belirtilen sonucu destekler nitelikte bir krater oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Öte yandan, boşalım akımındaki artışa rağmen yedi nolu deneyde olduğu gibi, vurum bekleme süresinin arttırılmasıyla daha fazla işlemenin yapılmadığı zaman iş parçası yüzeyinde daha sığ yapıda kraterler oluşmuştur [87].



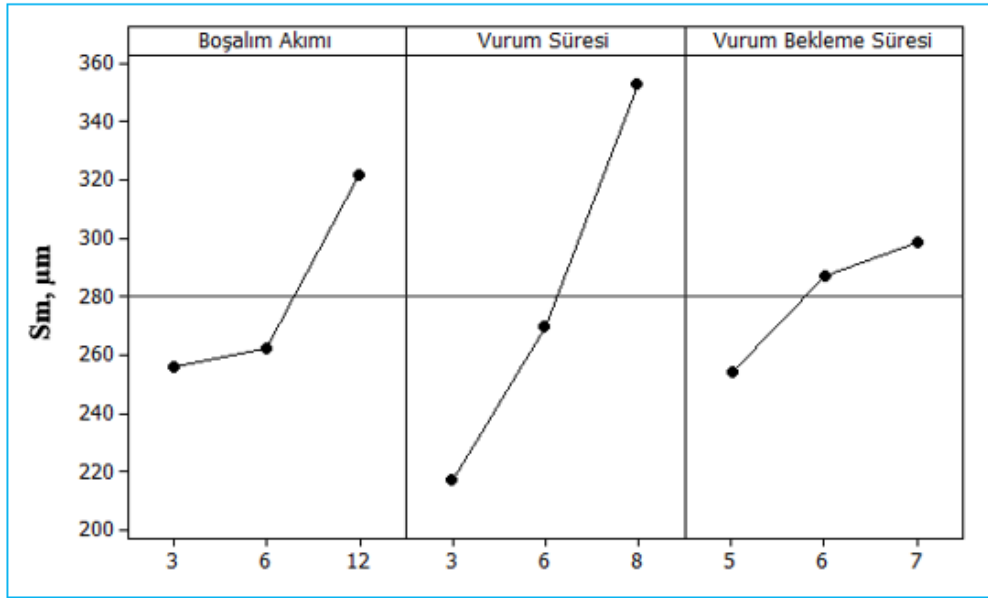
Şekil 5.9. Ra değerinin işleme parametrelerine göre değişimi.



Şekil 5.10. Rz değerinin işleme parametrelerine göre değişimi.

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi, boşalım akımının artışıyla Rz değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı, vurum süresi ve bekleme süresinin artışı ile Rz’nin önce artma sonra azalma şeklinde bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek Rz değeri 36.012 µm ile 12 A, 8 µs vurum süresi ve 6 µs bekleme süresi işleme değerlerinde; en düşük Rz değeri 14.039 µm ile 3 A, 3µs vurum süresi ve 5 µs bekleme süresinde elde edilen yüzeylerden ölçülmüştür. Ayrıca, boşalım akımına göre Rz’nin değişimi

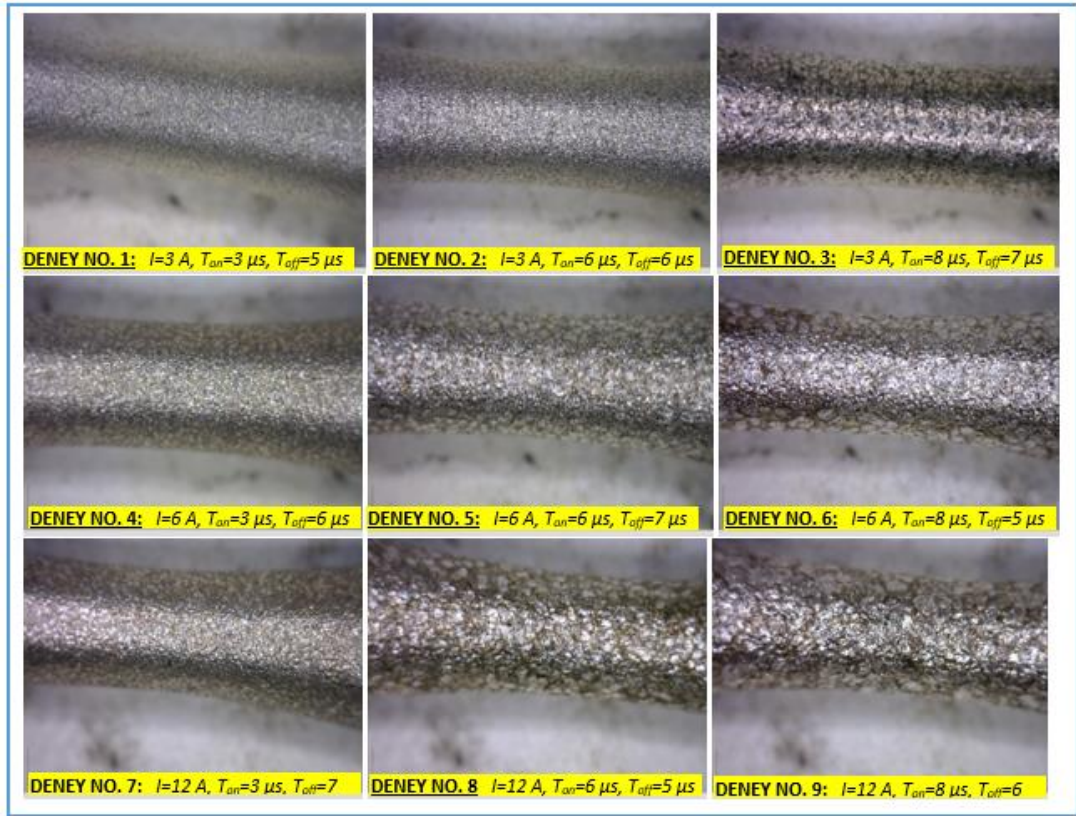
değerlendirildiğinde, vuruş süresinin artmasıyla en büyük değişim 12 A değerinde %41.1 olarak elde edilmiştir. Sırasıyla 3 A ve 6 A değerlerinde ise Rz değerinin değişim oranları %16.8 ve %15.01 olarak hesaplanmıştır. Rz değerindeki bu değişim, boşalım akımının artmasıyla artan kıvılcım sayısı sonucunda iş parçası yüzeyinde daha fazla ısıl deformasyon meydana geldiğine işaret etmektedir. Aynı zamanda vuruş süresinin artışıyla artan boşalım enerjisi nedeniyle iş parçası yüzeyinde daha uzun süreli ergitme ve buharlaşma meydana gelir [86,88]. Böylece daha derin kraterlerin olduğu yüzey morfolojisi oluşarak pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Diğer yandan, Çizelge 5.1’de bekleme süresinin maksimum değerinde Rz değerinde bir azalma gözlenmekte olup, bu azalma bahsedilen deneyde vuruş süresinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.11. Sm değerinin işleme parametrelerine göre değişimi.

En yüksek Sm değeri 398.187 µm olarak 12 A, 8 µs vuruş süresi ve 6 µs bekleme süresi ile işlemede; en düşük Sm değeri 3 A, 3µs vuruş süresi ve 5 µs bekleme süresinde 164.486 µm olarak ölçülmüştür (Çizelge 5.1). Boşalım akımına göre Sm değerlerindeki oransal değişim değerlendirildiğinde, vuruş süresinin artmasıyla 3 A değerindeki işlemlerde Sm artışı %53.76 ile en yüksek değerde çıkmıştır. Sırasıyla 6 A ve 12 A değerlerinde ise Sm değerinin değişim oranı %29.5 ve %31.5 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.11 incelendiğinde, işleme parametreleri seviyelerinin artmasıyla Sm değerlerinin belirli bir oranda arttığı görülmekte olup, en etkin parametrenin vuruş

süresi olduğu söylenebilir. Boşalım akımı ve vurum süresindeki artış ile yüksek enerjiye sahip kıvılcımların oluşması nedeniyle iş parçası yüzeyinden daha derin ve geniş kraterlere sahip bir yüzey morfolojisinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu durum geleneksel elektro erozyon ile işlemenin fiziksel mantığı ile uyumlu olup, Çoğun ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir [78]. Farklı parametreler kullanılarak EET yöntemiyle işlenen numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12. 50X büyütülmüş yüzey görüntüleri.

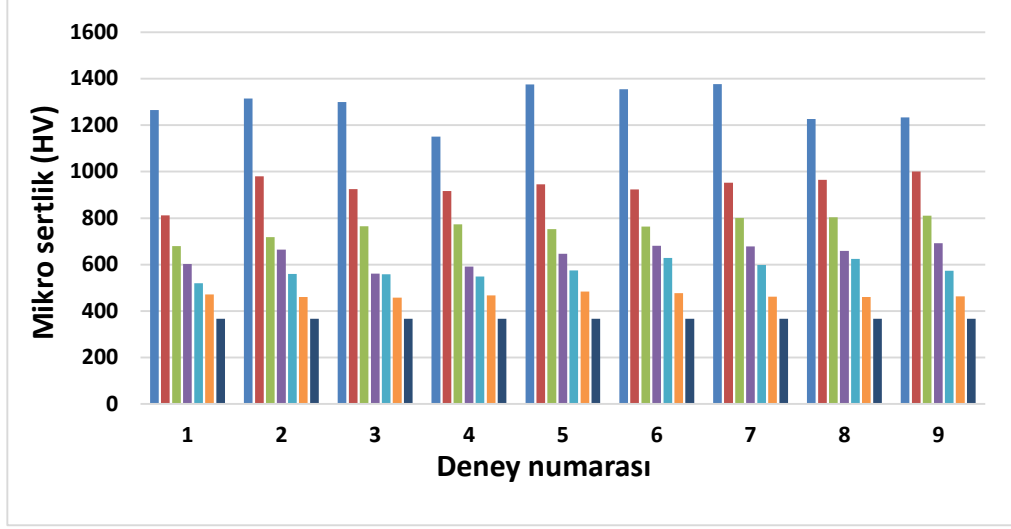
5.4. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

İşlemeler esnasında uygulanan farklı işleme parametrelerine bağlı olarak iş parçasının yüzeyinden merkeze doğru 20 μm mesafe aralıklarla 7 farklı yerden yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge 5.2’deki değerler baz alınarak yüzeyden merkeze doğru ölçülen mikro sertlik değerlerindeki değişim Şekil 5.13’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.13 incelendiğinde; tüm işleme deneyleri için, işlenmiş yüzeyin hemen altında deformasyona uğramış yerden deformasyona uğramamış malzemeye doğru gidildikçe mikrosertlik değerlerinin azalıp malzemenin ortalama sertlik değerine (367 ± 10) ulaştığı gözlenmiştir. Konuyla ilgili önceki çalışmalarda da aynı eğilim görülmüştür [89-93]. Araştırmacılar, işlemeden sonra işlenmiş yüzeye en yakın bölgede en yüksek sertlik değerinin elde edilmesinin plastik deformasyona bağlı olarak bir çalışma sertleşmesinden (work-hardening) kaynaklandığını vurgulamıştır [90]. Literatürde, işlenmiş yüzey altında deformasyonların sebep olduğu işleme karşılık olarak bir çalışma sertleşmesi katmanı şekillenebileceği ifade edilmiştir [90]. Ezugwu, mikrosertlik değerlerinin malzemenin içine doğru gidildikçe azalarak ortalama sertlik değerine yaklaşımının sebebinin ise termal sıcaklıktan kaynaklandığını ortaya koymuştur [92]. Bosheh, işlenmiş yüzeydeki sertliğin yüksek çıkmasının termal etkilerden kaynaklandığını ve ayrıca işleme sırasında, yüksek yüzey sıcaklık seviyelerinin ani/hızlı soğuma ile şekillenmiş katmanın sertliğinde bir artışa sebep olduğunu ileri sürmüştür [91].

Çizelge 5.2. Mikro sertlik değerleri.

Deney no.	Mikro sertlik (± 10 HV)						
	1	1265	812	679	602	520	471
2	1315	980	718	665	560	461	367
3	1300	925	765	561	559	458	367
4	1150	916	773	592	549	468	367
5	1375	946	753	647	575	484	367
6	1354	923	764	681	629	477	367
7	1376	952	801	678	598	462	367
8	1226	964	804	659	625	460	367
9	1233	1001	811	692	574	463	367

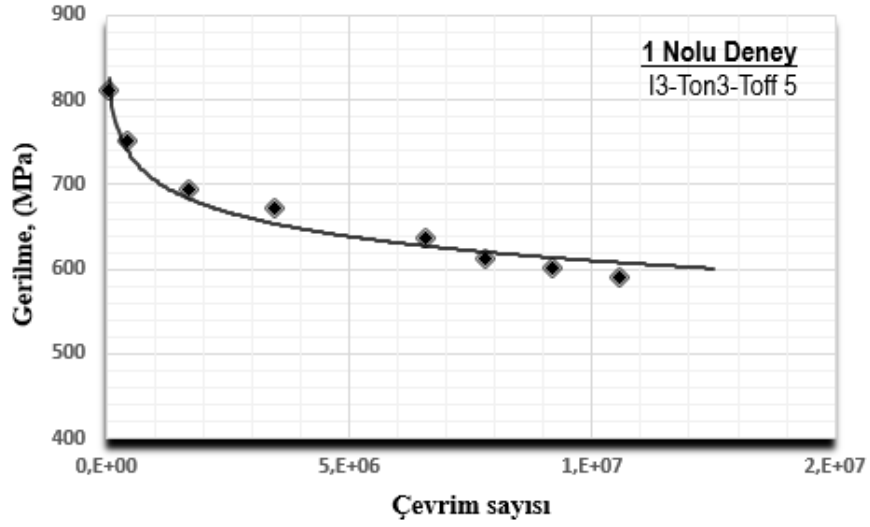


Şekil 5.13. Mikro sertlik değerleri.

Tez çalışmasında da literatüre benzer sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerden sonra yapılan ölçümlerde, işlenmiş yüzeye en yakın bölgelerde en yüksek mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Yüzeye en yakın bölgelerden ölçülen en yüksek mikro sertlik yaklaşık 1300 HV değerinde olmuştur. Malzemenin içine doğru gidildikçe mikro sertlik değerlerinin azaldığı ve malzemenin normal sertlik değerine yaklaştığı tespit edilmiştir.

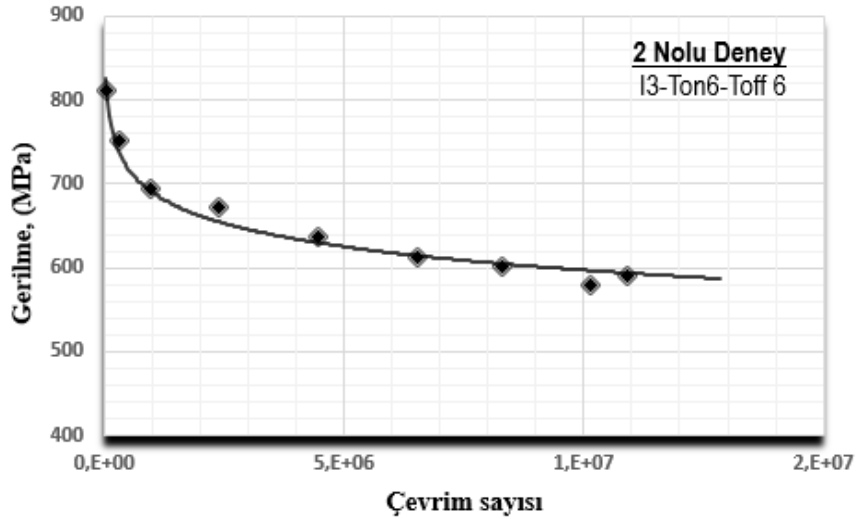
5.5. DENEYSEL YORULMA ÖMRÜ

EET yöntemi ile AISI L2 soğuk iş takım çeliğinin farklı işleme parametrelerine göre oluşturulan ASTM E-466 standartlarındaki yorulma numunelerine, dönel eğilmeli yorulma deneyleri yapılarak gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramları elde edilmiştir. Deneylerde yorulma test cihazına iş parçası malzemesinin çekme dayanımı olan 1158 MPa değerinin 2/3 ile 1/3 oranları arasında farklı gerilme değerleri uygulanmıştır. Taguchi L₉ deney tasarımına göre işlenen deney numuneleri için elde edilen yorulma S-N diyagramları Şekil 5.14 - Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.14. 1 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

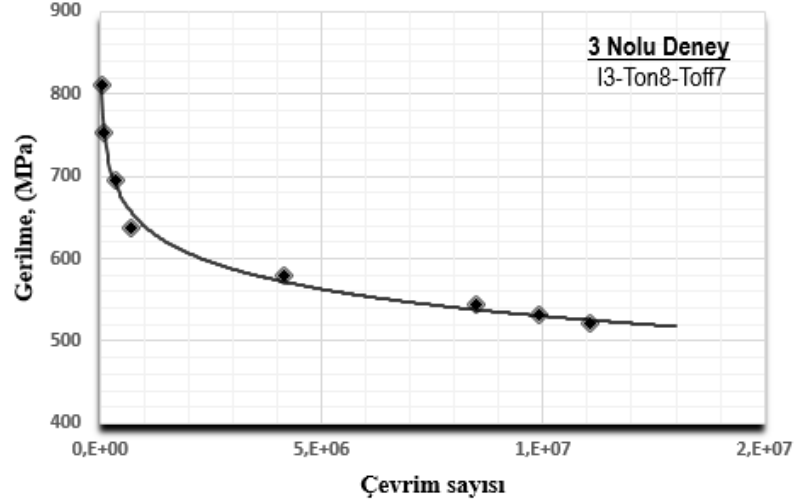
Şekil 5.14 deney sonuçlarına göre, deney numunesi çekme dayanımının %60 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında iş parçasının koptuğu, %52 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %50 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



Şekil 5.15. 2 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

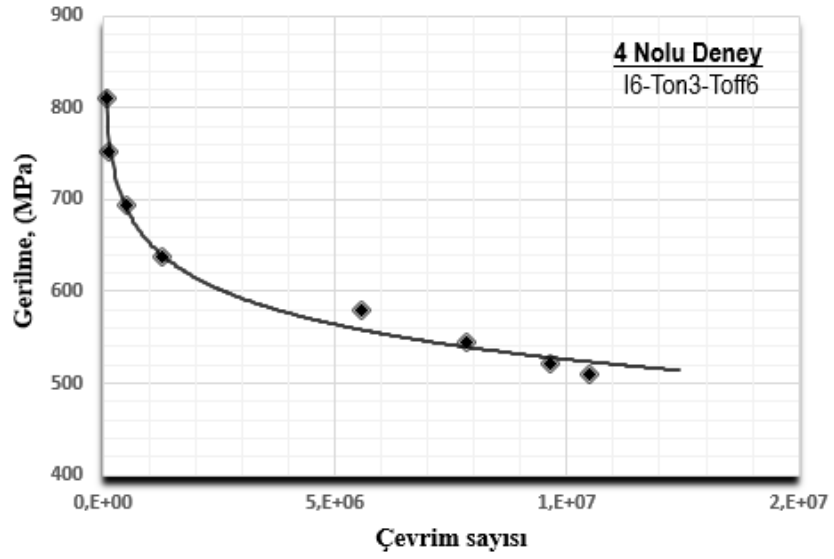
2 nolu yorulma dayanım deney sonuçları 1 nolu deney sonuçları ile benzer bir sonuç sergilemiştir. Şekil 5.15 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %58 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrimde iş parçasının koptuğu, %52

oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %50 oranındaki gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



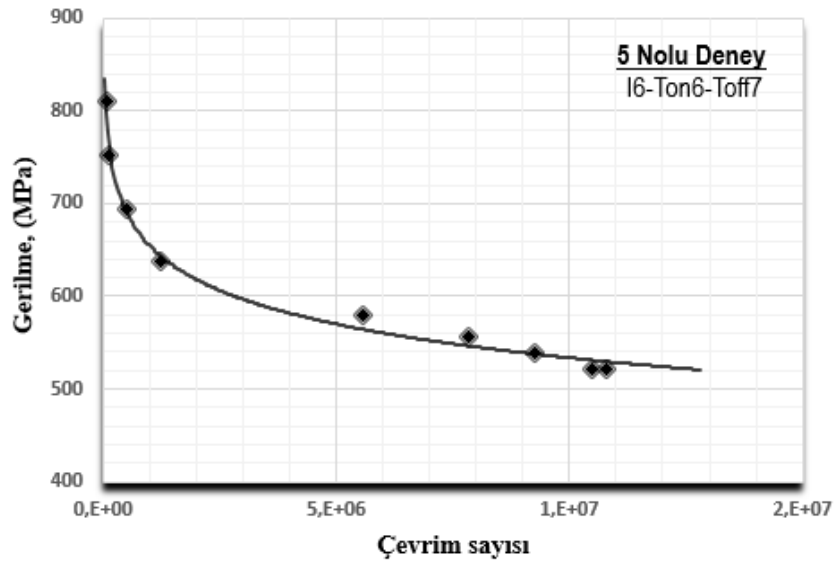
Şekil 5.16. 3 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.16 yorulma dayanım deney sonuçları, iş deney numunesi çekme dayanımının yaklaşık %55 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %46 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %45 oranındaki gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir. 3 nolu deney numunesi aynı boşalım akımında işlenen 1 ve 2 nolu deney numunelerinden daha düşük yorulma dayanımı sergilemiştir. Bu durum 3 nolu deneyde uygulanan yüksek vurum süresinin kullanılması nedeniyle iş parçası yüzeyinde daha uzun süreli ergitme ve buharlaşmanın oluşması ve böylece daha derin kraterlerin meydana gelmesinden dolayı oluşan yüksek pürüzlülük değerlerinden kaynaklanmıştır [20,94,95].



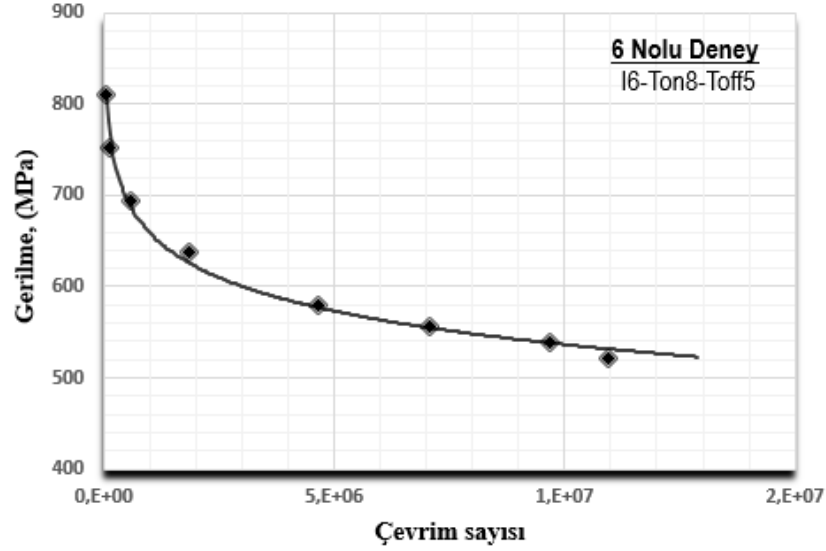
Şekil 5.17. 4 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.17 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %60 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %45 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %43 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



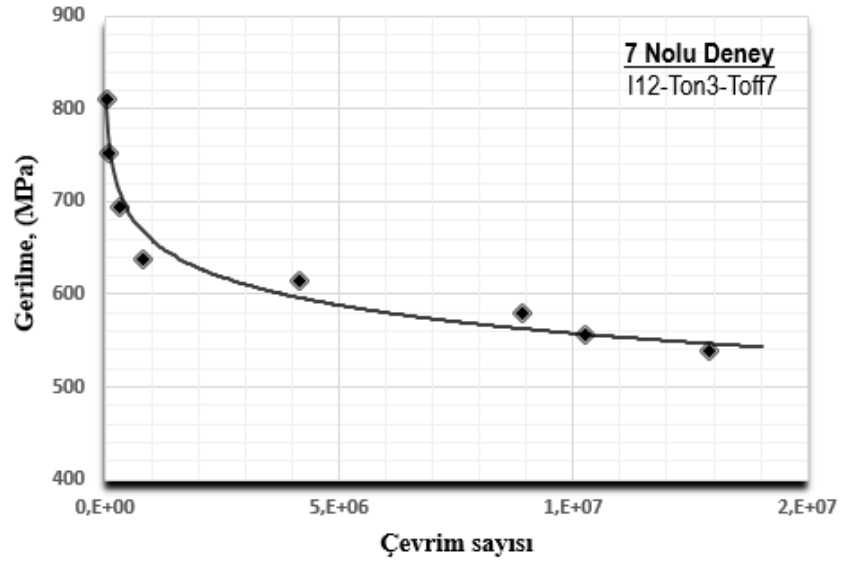
Şekil 5.18. 5 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.18 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %60 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %46 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %45 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



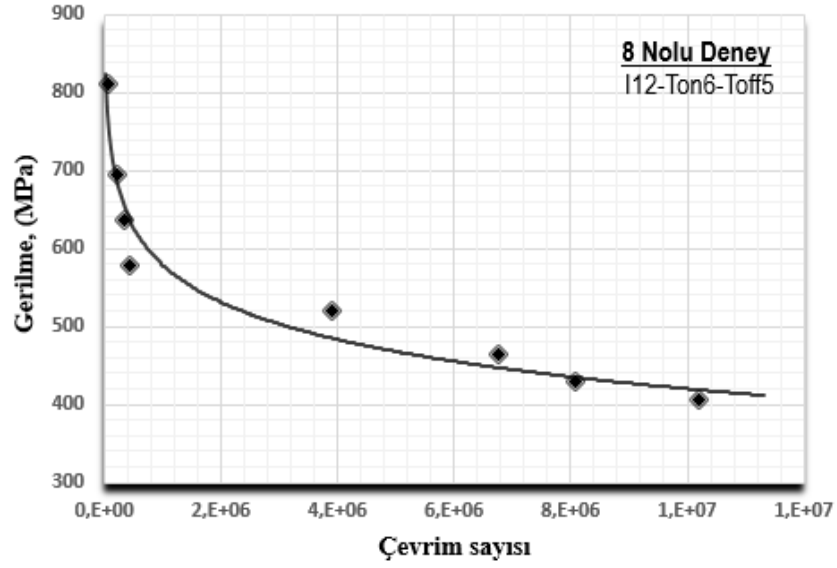
Şekil 5.19. 6 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.19 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %60 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %46 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %45 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



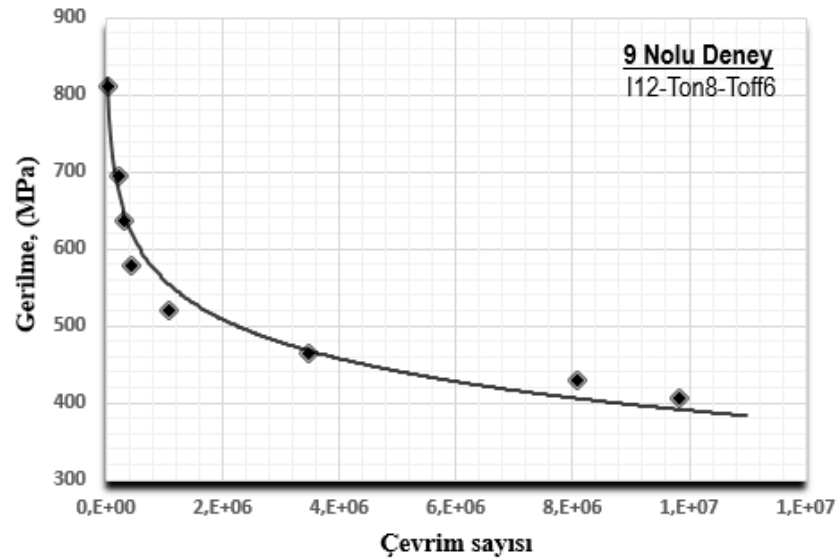
Şekil 5.20. 7 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.20 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %60 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında iş parçasının koptuğu, %53 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %48 oranındaki gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir. 7 nolu deney numunesi aynı boşalım akımında işlenen 8 ve 9 nolu deney numunelerinden daha yüksek yorulma dayanımı sergilemiştir. Bu durum 7 nolu deneyde uygulanan düşük vurum süresi ile yüksek vurum bekleme süresi kombinasyonu kullanılması sonucunda deney numunesi yüzeyinde daha az süreli ergitme ve buharlaşmanın olması ve yüzeyin daha iyi temizlenmesi nedeniyle daha az kraterlerin meydana gelmesinden dolayı oluşmuştur.



Şekil 5.21. 8 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

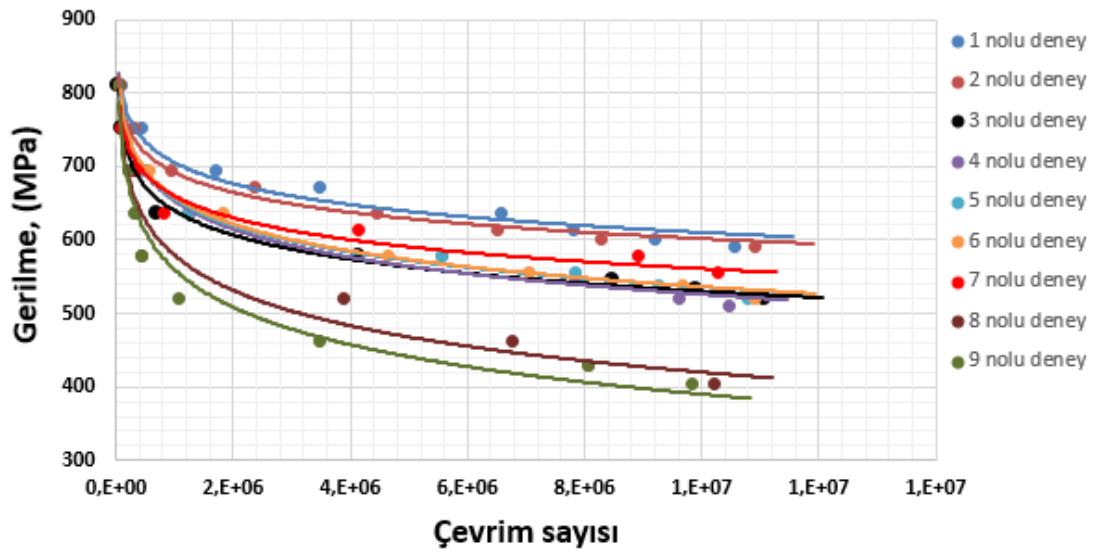
Şekil 5.21 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %50 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %37 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %35 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.



Şekil 5.22. 9 nolu deney numunesinin S-N diyagramı.

Şekil 5.22 incelendiğinde, deney numunesi çekme dayanımının %50 oranına kadar olan gerilme değerlerinde 10^5 çevrim sayısında deney numunesinin koptuğu, %35 oranına kadar olan gerilme değerlerinde ise 10^6 çevrimde koptuğu görülmüştür. Ancak yaklaşık %33 oranındaki gerilmelerde yapılan deneylerde malzeme hasara uğramadan 10^7 çevrim sayısı elde edilmiştir.

Ayrıca tüm deney numunelerinin yorulma dayanım sonuçlarını gösteren S-N diyagramı Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23. Deney numunelerinin karşılaştırılmış S-N diyagramı.

Şekil 5.23’ de görüldüğü gibi 1 nolu deney numunesinin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu, 2 nolu deney numunesinin de yakın bir dayanım gösterdiği görülmektedir. Ancak aynı boşalım akımına sahip olan 3 nolu deney numunesinin 12 A boşalım akımı ile işlenen 7 nolu deney numunesinden daha düşük yorulma dayanımı göstermiştir. EET yöntemiyle işlenen iş parçalarının yorulma dayanımının belirlenmesinde boşalım akımı kadar vurum süresinin de etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

5.6. TEORİK YORULMA ÖMRÜ

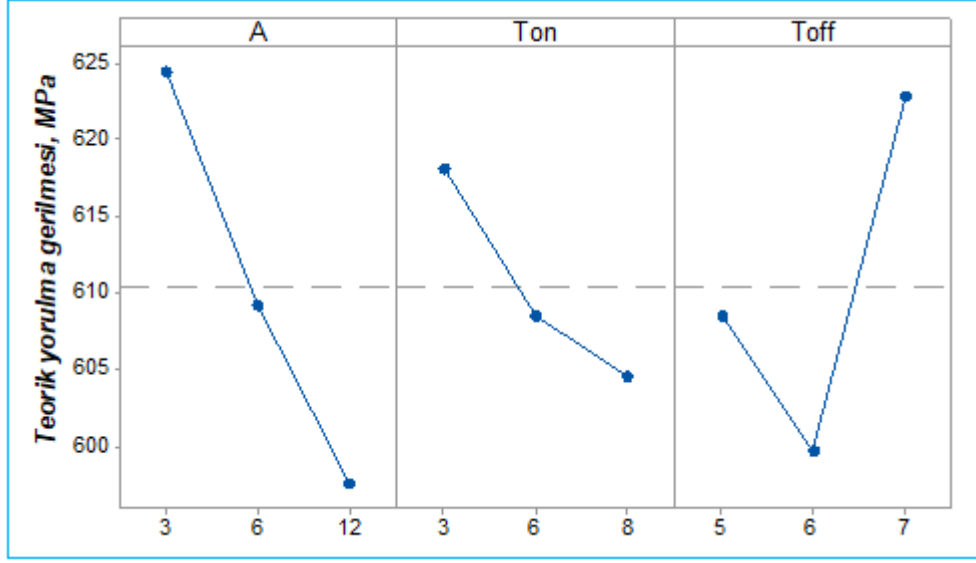
Elektro erozyonla tornalama deneylerinde kullanılan farklı işleme parametrelerine bağlı olarak oluşturulan deney tasarımı ve yorulma ömrü tahmininde kullanılan

maksimum pürüzlülük yüksekliğinin ortalaması (Rz), pürüzlülük profilindeki tepe noktaları arasındaki mesafelerin ortalaması (Sm) ve mikro sertlik (HV) değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak işlenen parçaların yorulma ömrü ile eşik gerilme şiddeti faktörü değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne göre teorik yorulma ömrü modelinde, Rz değeri işlenen parçanın yüzeyindeki krater derinliğini, Sm değeri ise dalgalı krater yapısının tepe noktaları arasındaki mesafeyi yani kraterin genişliğini temsil etmektedir. Yorulma hasarının tetiklenmesinde bu iki faktör \sqrt{area} modeli için en uygun yüzey pürüzlülük parametreleri olarak değerlendirilir. Makine elemanları dış yükler etkisinde kaldığında, çatlak başlangıcının Şekil 3.18’de görülen pürüzlülük tepe-vadi bölgelerinden başladığı ve en yüksek gerilme yığılmasının bu bölgelerde meydana geldiği bilinmektedir [75,96].

Çizelge 5.3. Teorik yorulma gerilmesi ve ΔK_{th} değerleri.

Deney No	\sqrt{area} (μm)	Teorik yorulma gerilmesi (MPa)	Eşik gerilme şiddeti faktörü
1	36.493	623.428	8.680
2	49.985	628.836	10.246
3	46.934	621.167	9.807
4	52.990	596.185	10.001
5	62.991	612.945	11.210
6	62.756	618.349	11.288
7	55.929	634.720	10.939
8	80.732	583.985	12.091
9	92.654	574.093	12.733

Elde edilen teorik yorulma ömrü sonuçlarının EET yöntemi işleme parametrelerine göre değişimini analiz etmek için Şekil 5.24’deki ana etki grafiği oluşturulmuştur.

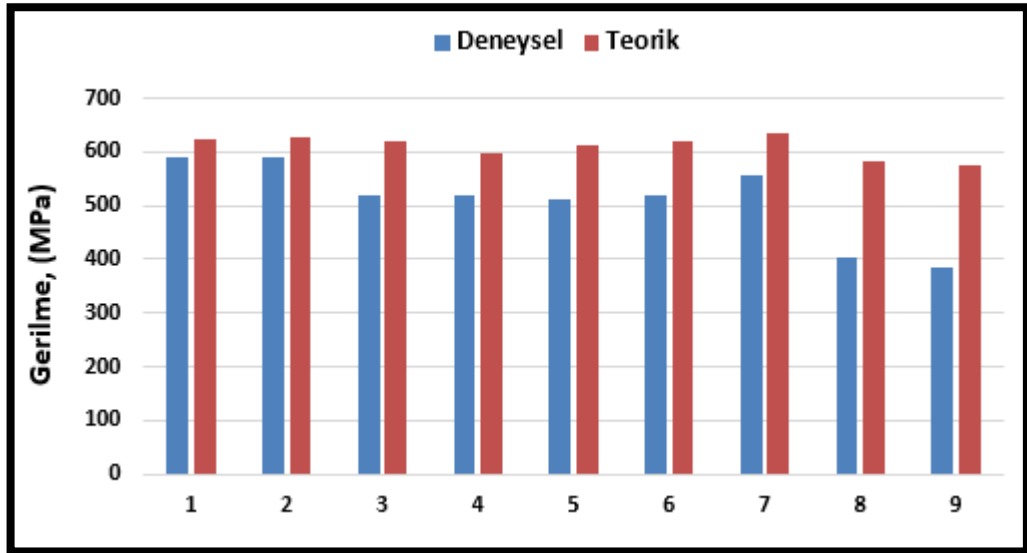


Şekil 5.24. Teorik yorulma gerilmesinin ana etki grafiği [96].

Şekil 5.24 incelendiğinde, boşalım akımı ve vurum süresindeki artışın teorik yorulma ömrünün azalması yönünde bir etkide bulunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bekleme süresinin belli bir değerden sonra yorulma ömrüne pozitif bir katkı sağladığı görülmektedir. 3 A akım, 3 µs vurum süresi ve 7 µs bekleme süresi değerinde yapılan üç tekrarlı doğrulama deneyi sonucunda elde edilen yüzeylerden ölçülen pürüzlülük parametrelerinden Rz ve Sm değerlerinin ortalaması sırasıyla 9.780 µm ve 367.914 µm olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda ölçülen pürüzlülük parametreleri kullanılarak Eş.5 ile hesaplanan teorik yorulma gerilmesi 643.932 MPa olarak tespit edilmiştir. Çizelge 3'teki teorik yorulma ömrü değerleri dikkate alındığında, en uygun işleme kombinasyonunun doğru bir şekilde belirlendiğini göstermektedir.

Diğer yandan, optimum işleme parametreleri ile elektro erozyonla tornalama sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük parametreleri teorik yorulma ömrü ile uyumludur. Ölçülen pürüzlülük parametreleri açısından en yüksek yorulma ömrünün hesaplandığı yüzeyde, diğer işleme şartlarına göre Rz değerinin en düşük Sm değerinin ise yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 5.1). Buradan, EET ile işlenen parçada yorulma ömrünün artmasında Rz değerinin düşük, Sm değerinin ise yüksek olmasının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Başka bir deyişle, yüzey morfolojisini oluşturan tepeli arasındaki yüksekliğin işlenmiş parçanın yorulma ömrünü azaltan en etkin faktör

olduğu anlaşılmaktadır. Mevcut işleme şartlarında, en düşük teorik yorulma gerilmesi ise 12 A akım, 8 μ s vurum süresi ve 6 μ s bekleme süresi değerlerindeki işlemede 574.093 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu işleme parametrelerinde elde edilen yüzey pürüzlülük parametreleri Rz ve Sm değerleri sırasıyla 36.012 μ m ve 398.187 μ m olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden görüldüğü gibi, en yüksek teorik yorulma ömrünün hesaplandığı doğrulama deneyindeki Rz değerinden çok fazla olduğu görülmektedir. Diğer yandan, Sm değerinde kayda değer bir değişim olmadığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük parametrelerindeki bu değişim, EET ile işlenmiş parçanın teorik yorulma ömrünü etkileyen temel pürüzlülük parametresinin Rz olduğunu kanıtlamaktadır [96].



Şekil 5.25. Deneysel ve teorik yorulma dayanım sonuçları.

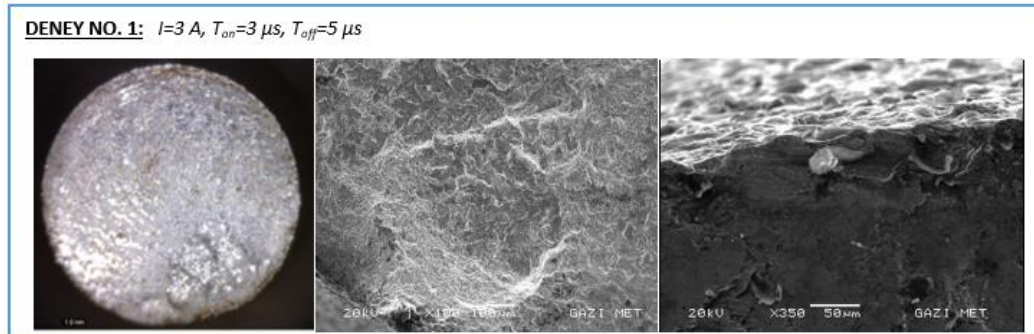
Şekil 5.25’de deneysel ve teorik yorulma dayanım sonuçları verilmiştir. Şekil 5.25 incelendiğinde 1 ve 2 nolu numunelerde deneysel ve teorik yorulma dayanımı arasındaki fark yaklaşık %5 civarında; 3, 4, 5, 6 ve 7 nolu numunelerinde farkın yaklaşık %15 civarında olduğu; 8 ve 9 nolu numunelerde ise farkın yaklaşık %30 a çıktığı görülmüştür. Yorulma çatlakları çoğunlukla serbest bir yüzeyde başladığı için yüzey durumunun yorulma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ancak yorulma dayanımının değerlendirilmesinde (1) yüzey pürüzlülüğü, (2) kalıntı gerilmeler, (3) plastik deformasyon nedeniyle iş parçası yüzeyinde oluşan sertleşmeler, (4) plastik deformasyondan dolayı mikroyapının değişimi veya

dönüşümü gibi dört faktör göz önünde bulundurulmalıdır [75]. Yani pratik makine bileşenlerinde, bu dört faktör birlikte hareket eder ve yorulma dayanımını karmaşık bir şekilde etkiler. Bu durumlar, yüzey kalitesinin yorulma dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmede zorluğa neden olmaktadır. Bu nedenle, her faktörün etkisini ayrı ayrı değerlendirmek ve daha sonra bu etkileri entegre etmek için günümüzde hala yöntemler aranmaktadır.

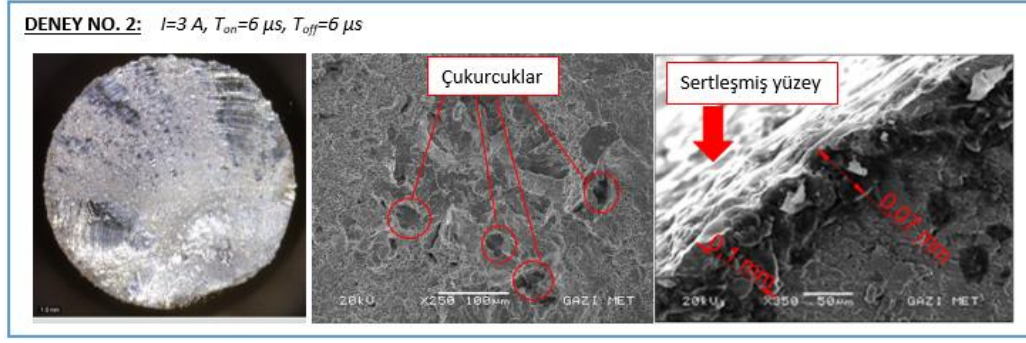
5.7. KIRIK YÜZEYLERDEN ALINAN SEM GÖRÜNTÜLERİ

Makine elemanlarının gerilmeler altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayına kırılma denir. Kırılmalar genellikle gevrek ve sünek olarak iki grupta ele alınmaktadır. Sünek kırılma, çatlağın oluşması ve büyümesinde önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin görüldüğü kırılma türüdür. Çatlak, boşlukların oluşması ve birleşmesi ile meydana gelir ve yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi mat ve lifli bir görünümündedir. Gevrek kırılmada ise çatlak büyük bir hızla ilerler ve kalıcı şekil değişimi önemsiz düzeylerde olur. Gevrek kırılmada, kırılma yüzeyi parlak ve taneli bir görünümündedir [68].

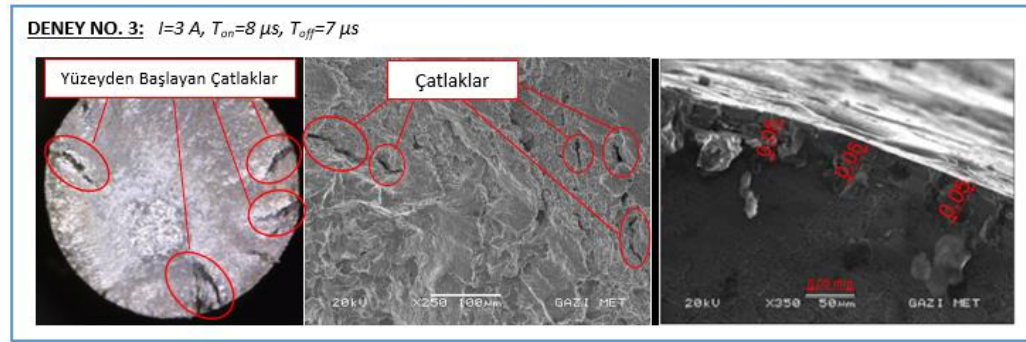
Dönel eğilmeli yorulma deneyleri sonucunda numunelerin kırılan yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.26 - Şekil 5.34'te verilmiştir. Şekillerdeki SEM görüntüleri sırasıyla 22X, 250X ve 350X büyütme ile çekilmiş görüntülerdir. Kırılan yüzey görüntüleri incelendiğinde, numunelerde hem sünek hem de gevrek kırılma mekanizmaları olduğu görülmüştür.



Şekil 5.26. 1 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



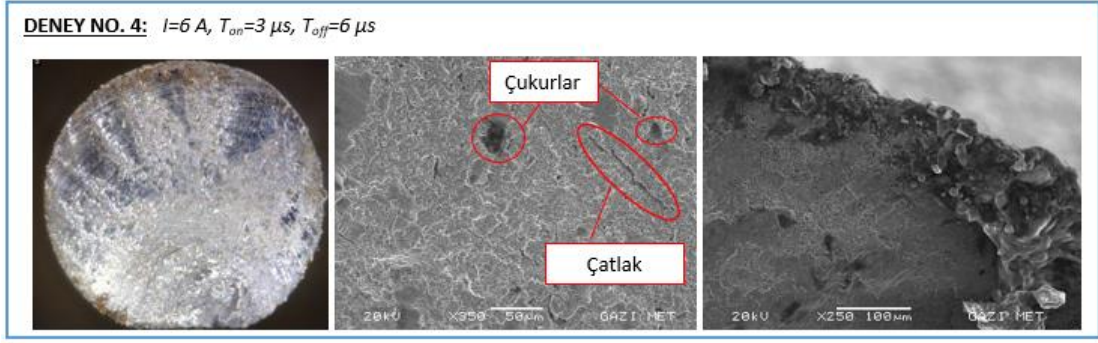
Şekil 5.27. 2 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



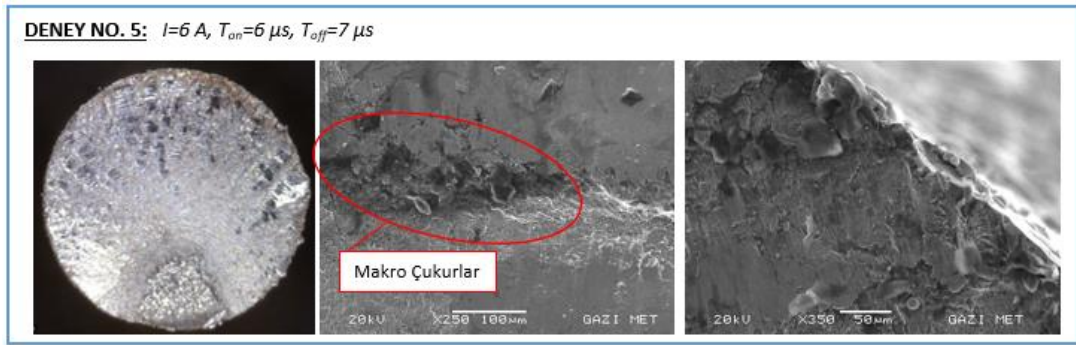
Şekil 5.28. 3 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.

Burada dikkati çeken ilk nokta Şekil 5.28’de gösterilen 3 nolu deney numunesinin kopan yüzeyindeki çatlaklar olmuştur. Aynı boşalım akımına sahip 1 ve 2 nolu numunelere göre daha pürüzlü bir yüzeye sahip olması, iş parçası yüzeyinden başlayan çatlakların büyüyerek derinlere ilerlemesi sonucunda malzemede gevrek kırılma olayı meydana gelmiştir. İşleme yönteminden kaynaklı artan sertlikle beraber süneklik düşmüştür. Bu da düşük plastik deformasyona, mikro ve makro çukurcukların oluşumuna ve hızlı çatlak ilerlemesine sebep olmuştur.

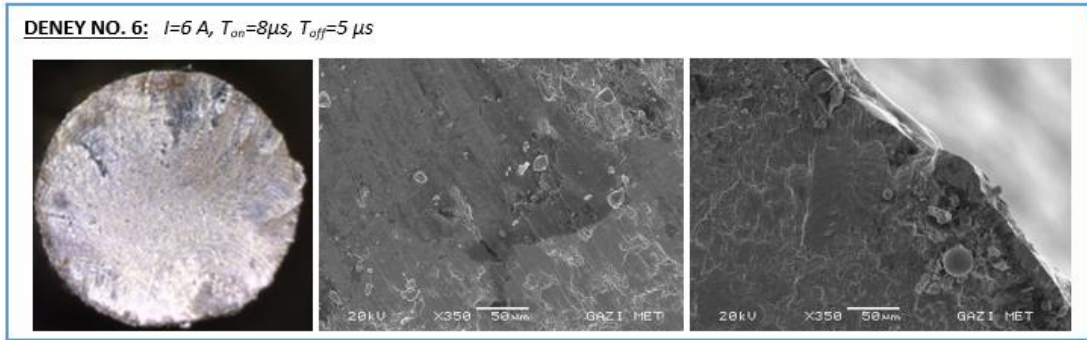
Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da gösterilen 4 ve 5 nolu deney numunelerinde mikro boşluklar en fazla gerilimin meydana geldiği orta kısımda oluşarak artan gerilmeyle birlikte makro boşluklar haline dönüşüp ana çatlak meydana getirmiştir. Daha sonra toplam gerilimi taşıyamayan numunelerde kırılma meydana getirmiştir. Şekil 5.31’de gösterilen 6 nolu deney numunesinde çukurcuklar ile kırılma gösteren düz yüzeylerin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.29. 4 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



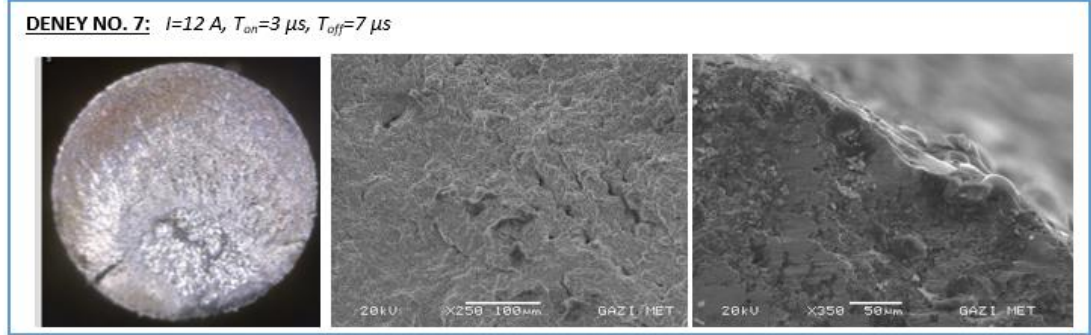
Şekil 5.30. 5 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



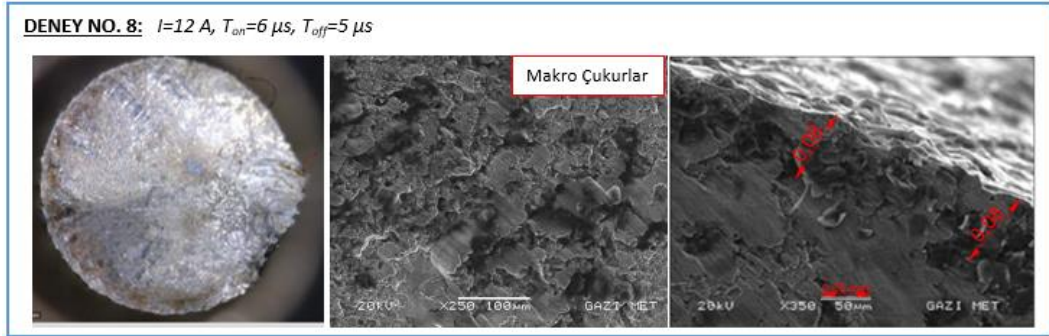
Şekil 5.31. 6 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.

Numune yüzeylerinde oluşan çatlakların işleme parametrelerine göre değerlendirmesini yapacak olursak, en büyük çatlakların Şekil 5.34’de gösterilen 9 nolu deney numunesinde olduğu görülmektedir. Şekil 5.33’de gösterilen 8 nolu deney numunesinde makro çukurlar görülmüştür. Şekil 5.32’de gösterilen 7 nolu deney numunesinde kopma esnasında oluşan çatlaklar aynı boşalım akımında işlenmiş olan 8 ve 9 nolu deney numunelerine göre daha küçük boyutta çatlaklar ve çukurlar meydana gelmiştir. Bu durum düşük vuruş süresi ve yüksek bekleme süresi

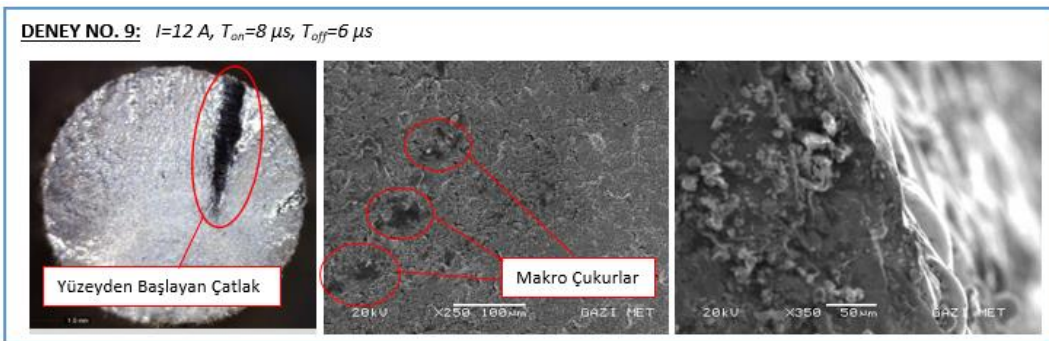
parametresinde deney yapılmasından kaynaklanmıştır. Elde edilen sertlik ölçümleri ve yorulma deneyi sonuçları da bu durumu desteklemiştir.



Şekil 5.32. 7 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



Şekil 5.33. 8 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.



Şekil 5.34. 9 nolu yorulma numunesine ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, dalma elektro erozyon ile tornalamada (EET) işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve işlenmiş parçanın yorulma ömrüne etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, iş parçasının dönmesini sağlamak amacıyla bir mekanizma tasarlanarak imal edilmiştir. EET deneyleri, soğuk iş takım çeliği üzerinde üç farklı boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresi ile sabit devir sayısı kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, L₉ dikey dizisine göre gerçekleştirilmiş olup, işleme performans çıktıları olarak İİH, EAH, Ra, Rz, Sm ve mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Daha sonra numunelere dönел eğilmeli yorulma dayanım testi uygulanmıştır. Elde edilen deneysel yorulma dayanım sonuçları teorik yorulma hesaplamalarında kullanılan \sqrt{area} modeli ile karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Boşalım akımı ve vurum süresinin artması İİH üzerinde olumlu bir etki yaparken vurum bekleme süresinin ise İİH üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Boşalım akımının artırılmasıyla EAH'ın arttığı, vurum süresinin artmasıyla da takım aşınmasında azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan EDS analizleri sonucunda bakır elektrotun aşınan yüzeylerinde yoğun miktarda C ve Fe varlığı tespit edilmiştir.
- EET işlemi; iş parçasının dönme hareketi ile dielektrik sıvı dolaşımının artmasını, elektrot ve iş parçası arasındaki kalıntıların hızlı bir şekilde işleme bölgesinden uzaklaşmasını sağlamıştır.
- EET işlemi sonrası iş parçası yüzey pürüzlülüğü, boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla artış göstermiştir. En düşük Ra değeri 3 A, 3 µs vurum süresi ve 5 µs bekleme süresinde 2.2673 µm, en büyük Ra değeri ise 12 A, 8 µs vurum süresi ve 6 µs bekleme süresinde 7.3766 µm olarak ölçülmüştür.

- Boşalım akımı, vurum süresi ve bekleme süresindeki artışla birlikte S_m pürüzlülük parametresinde belirgin artış meydana gelmiştir. Diğer yandan, boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla R_z parametresinde bir artış olurken, vurum süresinin en yüksek seviyesinde R_z 'de bir azalma görülmüştür.
- EET uygulamasında, en düşük R_z ve S_m değerleri 3 A, 3 μ s vurum süresi ve 5 μ s bekleme süresine sırasıyla 14.039 μ m ve 164.486 μ m, en büyük değerler ise 12 A, 8 μ s vurum süresi ve 6 μ s bekleme süresinde sırasıyla 36.012 μ m ve 398.187 μ m olarak ölçülmüştür.
- İşlenmiş yüzeye en yakın bölgelerde en yüksek mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Yüzeye en yakın bölgelerden ölçülen en yüksek mikro sertlik yaklaşık 1300 HV değerinde olmuştur. Malzemenin içine doğru gidildikçe mikro sertlik değerlerinin azaldığı ve malzemenin normal sertlik değerine yaklaştığı tespit edilmiştir.
- Yorulma deney sonuçlarında en iyi yorulma dayanımı, 3 A, 3 μ s vurum süresi ve 5 μ s bekleme süresi kombinasyonunda elde edilirken, en kötü yorulma dayanımı da 12 A, 8 μ s vurum süresi ve 6 μ s bekleme süresi kombinasyonunda elde edilmiştir.
- Teorik yorulma ömrü tahmini sonuçları, R_z değerinin yorulmayı tetikleyici en önemli faktör olduğu görülmüştür. Dolayısıyla elektro erozyonla işleme sırasında, işleme parametreleri seviyelerinin R_z değerini azaltan aynı zamanda S_m değerini artıracak değerlerde seçilmesi, yorulma ömrünü artırmak açısından önemlidir.
- Kırılan yüzey görüntüleri incelendiğinde, iş parçası yüzeyinden başlayan çatlakların büyüyerek derinlere ilerlemesi sonucunda malzemede kırılma olayı meydana gelmiştir. İşleme yönteminden kaynaklı artan sertlikle beraber süneklik düşmüştür. Bu da düşük plastik deformasyona, mikro ve makro çukurcukların oluşumuna ve hızlı çatlak ilerlemesine sebep olmuştur.

KAYNAKLAR

1. Davim, J. P., “Surface Integrity in Machining”, *Springer*, Vol. London:1848828742 (2010).
2. Rasti, A., Sadeghi, M. H., and Farshi, S. S., “An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies”, *Engineering Failure Analysis*, 95: 66-81 (2019).
3. Pramanik, A., and Basak, A. K., “Effect of wire electric discharge machining (EDM) parameters on fatigue life of Ti-6Al-4V alloy”, *International Journal of Fatigue*, 128, 105186 (2019).
4. Çakıroglu, R., Günay M., “Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4): 7305–7317 (2020).
5. Kumar, R., Roy, S., Gunjan, P., Sahoo, A., Sarkar, D. D., and Das, R. K., “Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process”, *Procedia Manufacturing*, 20: 358-364 (2018).
6. Matorian, P., Sulaiman, S., and Ahmad, M. M. H. M., “An experimental study for optimization of electrical discharge turning (EDT) process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3): 350-356 (2008).
7. Pant, P., and Bharti, P. S., “Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review”, *Materials Today: Proceedings*, (2019).
8. Mazarbhuiya, R. M., Dutta, H., Debnath, K., and Rahang, M. “Surface modification of CFRP composite using reverse-EDM method”, *Surfaces and Interfaces*, 18: 100457 (2020).
9. Patowari, P. K., Saha, P., and Mishra, P. K., “Taguchi analysis of surface modification technique using W-Cu powder metallurgy sintered tools in EDM and characterization of the deposited layer”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8): 593-604 (2011).
10. Zhang, M., Zhang, Q., Dou, L., Liu, Q., and Dong, C., “Comparisons of single pulse discharge crater geometries in EDM and EAM”, *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 74-81 (2016).
11. Dwivedi AP, Choudhury SK.,” Effect of Tool Rotation on MRR, TWR, and Surface Integrity of AISI-D3 Steel using the Rotary EDM Process”, *Mater Manuf Process*, 31:1844–52 (2016).

12. Gohil, V., & Puri, Y. M., "Statistical analysis of material removal rate and surface roughness in electrical discharge turning of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(9): 1603-1614 (2018).
13. Guu, Y. H., and Hocheng, H., "Effects of workpiece rotation on machinability during electrical-discharge machining", *Materials and Manufacturing Processes*, 16(1): 91-101 (2001).
14. Gohil, V., & Puri, Y. M., "Experimental Investigation on Surface Roughness in Electrical Discharge Turning of Ti-6Al-4V Alloy", *Transactions of FAMENA*, 40(4): 1-10 (2016).
15. Gohil, V., and Puri, Y. M., "Optimization of electrical discharge turning process using Taguchi-Grey relational approach", *Procedia CIRP*, 68: 70-75 (2018).
16. Sun, Y., Gong, Y., Liu, Y., Li, Q. and Zhou, Y., "Experimental study on surface characteristics and improvement of microelectrode machined by low speed wire electrical discharge turning", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4): 964-977 (2017).
17. Khan, Md Ashikur Rahman, M. M. Rahman, and Rahman M. S., "Optimal set-up and surface finish characteristics in electrical discharge machining on Ti-5Al-2.5 Sn using graphite", *Perspectives in Science*, 8: 440-443 (2016).
18. Shabgard, M., and Khosrozadeh, B., "Investigation of carbon nanotube added dielectric on the surface characteristics and machining performance of Ti-6Al-4V alloy in EDM process", *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 212-219 (2017).
19. Choudhary, R., Gupta, V. K., Batra, Y., and Singh, A., "Performance and surface integrity of Nimonic75 alloy machined by electrical discharge machining", *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5): 3481-3490 (2015).
20. Guu, Y. H., and Hocheng H., "Improvement of fatigue life of electrical discharge machined AISI D2 tool steel by TiN coating," *Materials Science and Engineering*, A 318,1-2: 155-162 (2001).
21. Lundberg, M., Saarimäki, J., Moverare, J. J., and Calmunger, M., "Surface integrity and fatigue behaviour of electric discharged machined and milled austenitic stainless steel", *Materials Characterization*, 124: 215-222 (2017).
22. Arunachalam, S. R., Dorman, S. E. G., Buckley, R. T., Conrad, N. A., and Fawaz, S. A., "Effect of electrical discharge machining on corrosion and corrosion fatigue behavior of aluminum alloys", *International Journal of Fatigue*, 111: 44-53 (2018).
23. Stráský, J., Janeček, M., Harcuba, P., Bukovina, M., and Wagner, L., "The effect of microstructure on fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy after EDM surface

treatment for application in orthopaedics”, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 4(8), 1955-1962 (2011).

24. Kumar, S. S., Uthayakumar, M., Kumaran, S. T., Varol, T., and Canakci, A., “Investigating the surface integrity of aluminium based composites machined by EDM”, *Defence Technology*, 15(3): 338-343 (2019).
25. Lee, Hwa-Teng, and Tzu Yao Tai. "Relationship between EDM parameters and surface crack formation," *Journal of Materials Processing Technology*, 142.3: 676-683 (2003).
26. Özerkan, B., and Çoğun, C., “Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM)”, *Gazi University Journal of Science*, 18(2), 211-228 (2005).
27. Azhiri, R. B., Jadidi, A., and Teimouri, R., “Electrical discharge turning by assistance of external magnetic field, Part II: Study of surface integrity. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. (2020).
28. Llanes, L., Casas, B., Torres, Y., Salán, N., and Mestra, A., “Fatigue performance improvement of electrical discharge machined hardmetals by means of combined thermal annealing and surface modification routes”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 36: 60-65 (2013).
29. Datta, S., Biswal, B. B., and Mahapatra, S. S., “Electrical discharge machining of Inconel 825 using cryogenically treated copper electrode: Emphasis on surface integrity and metallurgical characteristics”, *Journal of Manufacturing Processes*, 26: 188-202 (2017).
30. Wang, Y., Charbal, A., Hild, F., Roux, S., and Vincent, L., “Crack initiation and propagation under thermal fatigue of austenitic stainless steel”, *International Journal of Fatigue*, 124: 149-166 (2019).
31. Soleimani, S. M. Y., Mashreghi, A. R., Ghasemi, S. S., and Moshrefifar, M, “The effect of plasma nitriding on the fatigue behavior of DIN 1.2210 cold work tool steel”, *Materials & Design*, 35: 87-92 (2012).
32. Sohar, C. R., Betzwar-Kotas, A., Gierl, C., Weiss, B., and Danninger, H., “Fractographic evaluation of gigacycle fatigue crack nucleation and propagation of a high Cr alloyed cold work tool steel”, *International journal of fatigue*, 30(12): 2191-2199 (2008).
33. Banerjee, A., and Prusty, B. G., “Fatigue and fracture behaviour of austenitic-martensitic high carbon steel under high cycle fatigue: An experimental investigation”. *Materials Science and Engineering: A*, 749: 79-88 (2019).
34. Jamshaid, M., Jaffery, H., Ali, L., Khan, M., Alam, K., Ahmed, R., and Rehman M, “Statistical analysis of the effect of machining parameters on fatigue life of

- aerospace grade aluminum alloy” *Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2013)*, UK, 245-250 (2013).
35. Liu, G., Huang, C., Zou, B., Wang, X., and Liu, Z., “Surface integrity and fatigue performance of 17-4PH stainless steel after cutting operations”. *Surface and Coatings Technology*, 307: 182-189 (2016).
 36. Li, C., Dai, W., Duan, F., Zhang, Y., and He, D., “Fatigue life estimation of medium-carbon steel with different surface roughness”, *Applied Sciences*, 7(4): 338 (2017).
 37. Javidi, A., Rieger, U., and Eichlseder, W., “The effect of machining on the surface integrity and fatigue life”, *International Journal of Fatigue*, 30(10-11): 2050-2055 (2008).
 38. Mesut, B. A. Ş., Ertan, R., ve Yavuz, N., “Yüzey İşleme Yöntemlerinin Soğuk İş Takım Çeliğinin Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”, *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, Cilt 16, Sayı 1 (2011).
 39. Choudhary, R., Gupta, V. K., Batra, Y., and Singh, A., “Performance and surface integrity of Nimonic75 alloy machined by electrical discharge machining”, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5): 3481-3490 (2015).
 40. Kushwaha, A., Jadam, T., Datta, S., and Masanta, M., “Assessment of surface integrity during electrical discharge machining of titanium grade 5 alloys (Ti-6Al-4V)”, *Materials Today: Proceedings*, 18: 2477-2485 (2019).
 41. Haskel, T., Verran, G. O., and Barbieri, R., “Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: effects of strontium addition and T6 heat treatment”, *International Journal of Fatigue*, 114: 1-10 (2018).
 42. Liu, J. F., and Guo, Y. B., “Residual stress modeling in electric discharge machining (EDM) by incorporating massive random discharges”, *Procedia Cirp*, 45: 299-302 (2016).
 43. Knez, M., Glodež, S., Ružička, M., and Kramberger, J. “A rotating bending approach for determination of low-cycle fatigue parameters”, *International journal of fatigue*, 32(10), 1724-1730 (2010).
 44. Gu, C., Lian, J., Bao, Y., Xie, Q., and Münstermann, S., “Microstructure-based fatigue modelling with residual stresses: Prediction of the fatigue life for various inclusion sizes”, *International Journal of Fatigue*, 129: 105158 (2019).
 45. Garb, C., Leitner, M., and Grün, F., “Application of $\sqrt{\text{area}}$ -concept to assess fatigue strength of AlSi7Cu0.5Mg casted components”, *Engineering Fracture Mechanics*, 185: 61-71 (2017).

46. Schönbauer, B. M., and Mayer, H., “Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels”, *International Journal of Fatigue*, 127: 362-375 (2019).
47. Yue, X., Li, Q., & Yang, X., “Influence of thermal stress on material removal of Cf_SiC composite in EDM”, *Ceramics International*, 46(6), 7998-8009 (2019).
48. Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., ve Uslan, İ., Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi, “*Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*”, 31(3), 531-544 (2016).
49. Cogun, C., Esen, Z., Genc, A., Cogun, F., and Akturk, N., “Effect of powder metallurgy Cu-B4C electrodes on workpiece surface characteristics and machining performance of electric discharge machining”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(12), 2190-2203 (2016).
50. Gohil V, Puri YM., “Turning by electrical discharge machining: A review”, *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*; 231:195–208 (2017).
51. Gupta K, Gupta MK., “Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review”, *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci.*, 233:4213–32 (2019).
52. İnternet: Electrical Discharge Machining : Principle, Working, Equipment’s, Advantages and Disadvantages with Diagram, <https://www.mech4study.com/2017/03/electrical-discharge-machining-principle-working-equipment-advantages-and-disadvantages-with-diagram.html> (2017).
53. Wong, Y. S., Lim, L. C., & Lee, L. C., “Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces”, *Journal of materials processing technology*, 48(1-4): 299-305 (1995).
54. Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., & Schumacher, B. M., “Advancing EDM through fundamental insight into the process”, *CIRP annals*, 54(2), 64-87 (2005).
55. Çaydaş, U., and Hasçalik, A., “Modeling and analysis of electrode wear and white layer thickness in die-sinking EDM process through response surface methodology”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(11-12): 1148-1156 (2008).
56. Vignesh, M., Ramanujam, R., & Kuppan, P., “A comprehensive review on wire electrical discharge based hybrid turning (WEDHT)”, *Materials Today: Proceedings*, 5(5): 12273-12284 (2018).

57. Özerkan, H. B., “Elektro Erozyon İle İşlemede Toz Karışımı Dielektrik Sıvının İşleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-63 (2003).
58. İnternet: Jenoptik, “Roughness Measuring Systems from Hommel-Etamic GmbH.”, <https://www.slideshare.net/CarlosAlbertoRamrezM/surface-roughness-parameters-en> (2012).
59. İnternet: Sandvik Coromant, “İş Parçası Yüzey Ölçümü”, <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
60. İnternet: Makine Eğitimi, “Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi”, <https://www.makinaegitimi.com/sertlik-olcme-yontemi/>
61. Tekaüt, İ., “Sıcak ve soğuk iş takım çeliklerinin farklı delik delme uygulamaları ile delinebilirliğinin araştırılması ve modellenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-4 (2015).
62. Gohil, V., and Puri, Y. M., “Experimental Investigation on Surface Roughness in Electrical Discharge Turning of Ti-6Al-4V Alloy”, *Transactions of FAMENA*, 40(4): 1-10 (2016).
63. Haddad, M. J., Alihoseini, F., Hadi, M., Hadad, M., Tehrani, A. F., and Mohammadi, A., “An experimental investigation of cylindrical wire electrical discharge turning process”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12): 1119-1132 (2010).
64. Yu J., “Theory of electrical discharge machining”. *Bei Jing: National Defence Industry Press*; p. 55-71 (2011).
65. Uhlmann, E., Piltz, S., and Jerzembeck, S., “Micro-machining of cylindrical parts by electrical discharge grinding”, *Journal of Materials Processing Technology*, 160(1): 15-23 (2005).
66. Askeland, D.R., “Thescience and Engineering of Materials”, 3th Edition Çev: Erdogan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 99-228 (1998).
67. Nicholas, T., “High Cycle Fatigue: A Mechanics of Materials Perspective”, *Elsevier Science*, London, U.K. (2006).
68. Kara, F., “AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 74-81 (2014).
69. Öncel, E., “Yüzey sertleştirme işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin yorulma dayanımına etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 27-33 (2011).

70. Özdemir, R., “Düşük mukavemetli malzemelerin yorulma deneyinde kullanılmak üzere hidrolik deney cihazı tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, (2012).
71. Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 143-170, (1996).
72. Kızıldere, M., “Tornalanmış parçaların yorulma davranışına kesme parametrelerinin etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 12-37 (2019).
73. Saygın, M., “AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanımına etkisi” Yüksek Lisans Tezi, **Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 5-19 (2006).
74. Kılıç, E., “14NiCr10-14NiCr14 çeliklerinin uygulanacak sementasyon işlemine bağlı olarak yorulma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kırıkkale, (2008).
75. Murakami, Y., “Effect of surface roughness on fatigue strength”, **Metal Fatigue: Effect of Small Defects and Non Metallic Inclusions**, 28-40 (2002).
76. Özerkan, H. B., “Theoretical investigation of the effect of surface roughness on the fatigue life of austenitic stainless steels”, **Materials Today: Proceedings**, 11: 417-422, (2019).
77. Sharma, N., Singh, G., Gupta, M., Hegab, H., and Mia, M., “Investigations of surface integrity, bio-activity and performance characteristics during wire-electrical discharge machining of Ti-6Al-7Nb biomedical alloy”, **Materials Research Express**, 6(9): 096568 (2019).
78. Ozgedik A, Cogun C., “An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining”, **Int J Adv Manuf Technol**, 27:488–500 (2006).
79. Muthuramalingam T, Mohan B., “Influence of discharge current pulse on machinability in electrical discharge machining”, **Mater Manuf Process**, 28: 375–80 (2013).
80. Joshi, S. N., and Pande, S. S., “Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process”, **Journal of manufacturing processes**, 12(1): 45-56 (2010).
81. Yadav VK, Kumar P, Dvivedi A., “Effect of tool rotation in near-dry EDM process on machining characteristics of HSS”, **Mater Manuf Process**, 34:779–90 (2019).
82. Muttamara A, Kanchanomai C., “Effect of Carbon in the Dielectric Fluid and Workpieces on the Characteristics of Recast Layers Machined by Electrical Discharge Machining”, **Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci**, 47(6): 3248–3255 (2016).

83. Habib SS., “Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach”, *Appl Math Model*, 33(12): 4397–407 (2009).
84. Ho, K. H., and Newman, S. T., “State of the art electrical discharge machining (EDM)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13): 1287-1300 (2003).
85. Zeid, O. A., “On the effect of electrodischarge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 68(1): 27-32 (1997).
86. Ramasawmy, H., and Blunt, L., “Effect of EDM process parameters on 3D surface topography”, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2): 155-164 (2004).
87. Azhiri, R. B., Bideskan, A. S., Javidpour, F., and Tekiyeh, R. M., “Study on material removal rate, surface quality, and residual stress of AISI D2 tool steel in electrical discharge machining in presence of ultrasonic vibration effect”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9-12): 2849-2860, (2019).
88. Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., M'saoubi, R., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Meyer, D., ...and Jayal, A. D., “Surface integrity in material removal processes: Recent advances”, *CIRP annals*, 60(2): 603-626 (2011).
89. Devillez, A., Coz, G.L., Dominiak, S., Dudzinski, D., “Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity”, *Journal of Materials Processing Technology*, 211: 1590-1598 (2011).
90. Ulutan, D., Ozel, T., “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51: 250-280 (2011).
91. Bosheh, S.S., Mativenga, P.T., “White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 225-233 (2006).
92. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., Okeke, C.I., “Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD and CVD coated tools”, *Tribology Transactions*, 42 (2): 353-360 (1999).
93. Che-Haron, C.H., Jawaid, A., “The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6%Al–4%V”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 188-192 (2005).
94. Mower, T. M., “Degradation of titanium 6Al–4V fatigue strength due to electrical discharge machining”, *International Journal of Fatigue*, 64: 84-96 (2014).

95. Xu, Z., Dunleavey, J., Antar, M., Hood, R., Soo, S. L., Kucukturk, G., ... and Clare, A. T., "The influence of shot peening on the fatigue response of Ti-6Al-4V surfaces subject to different machining processes", *International Journal of Fatigue*, 111: 196-207 (2018).
96. Cakiroglu, R., Günay, M., "Elektro Erozyonla Tornalama Yöntemiyle İşlenen Soğuk İş Takım Çeliğinin Yorulma Ömrünün Tahmini", *Politeknik Dergisi*, DOI: 10.2339/politeknik.705903 (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Ramazan ÇAKIROĞLU, 1985 yılında Safranbolu’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Safranbolu Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümü’nden mezun oldu. 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü’nde lisans öğrenime başlayıp 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans’a başladı ve 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında Gazi Üniversitesi OSTİM Meslek Yüksekokulunda Öğretim görevlisi olarak başladığı görevine Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda devam etmektedir. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde mühendislik tamamlama programına katılarak İmalat Mühendisi olarak mezun olmuştur.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Gazi Üniversitesi

Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Cevat Dünder Caddesi No:19 Yenimahalle / ANKARA

E-posta : rcakiroglu@gazi.edu.tr