



**TEL EROZYON TEZGAHINDA HARDOX
MALZEMESİNİN İŞLENMESİNDE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN YÜZEY KALİTESİ VE
ÖLÇÜ TAMLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Ferhat ERBİR

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Gökhan SUR**

**TEL EROZYON TEZGAHINDA HARDOX MALZEMESİNİN
İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN YÜZEY KALİTESİ VE
ÖLÇÜ TAMLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Ferhat ERBİR

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Gökhan SUR**

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

**KARABÜK
Mayıs 2023**

Ferhat ERBİR tarafından hazırlanan “TEL EROZYON TEZGAHINDA HARDOX MALZEMESİNİN İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN YÜZEY KALİTESİ VE ÖLÇÜ TAMLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Gökhan SUR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından **Oy Birliği** ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 12/05/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Hakan GÜRÜN (GÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Tuğçe YILDIZ (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

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.”

Ferhat ERBİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEL EROZYON TEZGAHINDA HARDOX MALZEMESİNİN İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN YÜZEY KALİTESİ VE ÖLÇÜ TAMLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ferhat ERBİR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Gökhan SUR

Mayıs 2023, 68 sayfa

Bu çalışmada, yüksek aşınma dirençli Hardox 500 çeliğinin, tel erozyon tezgâhında seçilen işlem parametrelerine bağlı olarak işleme sonrası ölçü tamlığı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tel erozyon işleme sürecinde değişken parametreler olarak akım (60, 70, 80, 90 ve 100 A) ve sıvı basıncı (3 ve 4 bar) kullanılmıştır. Deneyler tel gerginliği, tel hızı (4 mm/dk), tel cinsi (pirinç) ve tel çapı (0,25 mm) sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. İşleme sonrası kesilen geometrik şekillerin (dikdörtgen ve dairesel), boyutsal ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülükleri (Ra) incelenmiştir. Boyut kontrolleri CMM tezgahında ölçülmüş ve gerçek değere en yakın işleme koşulları tespit edilmiştir. En ideal koşullar dairesel formda akımın 70 A ve sıvı basıncının 4 bar olduğu, dikdörtgen formda ise akımın 90 A ve sıvı basıncının 4 bar olduğu işleme koşullarıdır. Ölçü tamlığı üzerinde sıvı basıncının ve akımın dikkate değer etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Yüzey kalitesi incelendiğinde en etkili parametrenin akım olduğu görülmüştür. Yüzey kalitesinin en iyi elde edildiği işleme koşulu akım değerinin 60 A ve sıvı basıncının 4 bar olduğu durumdur. Akım değerinin azaldığı durumlarda yüzey kalitesinde iyileşme görülmektedir. Dairesel form ve dikdörtgen formun yüzey kaliteleri karşılaştırıldığında dairel formlarda elde edilen yüzey kalitesinin daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Sıvı basınç değerinin büyük bir etkisinin olmamasına karşın sıvı basıncının yüksek olmasının yüzey kalitesini iyileştirdiği gözlenmiştir. Kullanılan deney parametrelerinin deney numuneleri üzerindeki etkileri SEM (Scanning Electro Microscopy) görüntüleri ile incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda akımın artması ile yüzeyde çatlakların genişliğinin ve derinliğinin arttığı buna bağlı olarak yüzey kalitesinin kötüleştiği görülmüştür. Dikdörtgen formlu numunenin sertlik değerleri bütün yüzeyler için ölçülmüştür. Akım değerinin işlenmiş yüzey sertliği üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 4 bar sıvı basıncı ve akımın 60 A olduğu işleme parametrelerinde 496,06 HBN olarak ölçülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Hardox 500, tel erozyon, yüzey pürüzlülüğü

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

Master/Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MANUFACTURING PARAMETERS ON THE SURFACE QUALITY AND MEASUREMENT COMPLETENESS IN THE MANUFACTURING OF HARDOX MATERIAL BY WIRE ELECTRO DISCHARGE MACHINE

Ferhat ERBİR

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

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Gökhan SUR

May 2023, 68 pages

In this study, the effects of selected machining parameters on dimensional accuracy and surface quality of high-wear-resistant Hardox 500 steel were investigated using wire electrical discharge machining (WEDM). Current (60, 70, 80, 90 and 100 A) and coolant pressure (3 and 4 bar) were used as variable parameters in the wire electrical discharge machining process. The experiments were carried out using the wire tension, wire speed (4,0 m/min), wire type (brass) and wire diameter (0.25 mm) constant. The dimensional accuracy and surface roughness (Ra) of cut geometric shapes (rectangular and circular) were examined after the machining process. The dimensional controls were measured on a CMM, and the processing conditions closest to the actual values were determined. The most ideal conditions for circular shape were found to be an electrical current of 70 A and a fluid pressure of 4 bar

while for rectangular shape, the optimal conditions were an electrical current of 90 A and a liquid pressure of 4 bar. It was determined that the fluid pressure and current did not cause significant changes in dimensional accuracy.

When examining surface quality, the most effective parameter is the current. The machining condition in which the surface quality is best achieved is when the current value is 60 A and the coolant pressure is 4 bar. When comparing the surface qualities of the circular and rectangular forms, it was found that the surface quality obtained in the circular form was better. While the fluid pressure value did not have a significant effect, it was observed that higher fluid pressure improved the surface quality. The effects of the experimental parameters on the test specimens were examined using SEM (Scanning Electron Microscopy) images. Based on the conducted examinations, it was observed that increasing the current resulted in an increase in crack width and depth on the surface, leading to a deterioration in surface quality. Hardness values for the rectangular-shaped specimen were measured on all surfaces. It was determined that the current value has an effect on the processed surface hardness. The highest hardness value of 496.06 HBN was measured at processing parameters with a fluid pressure of 4 bar and a current of 60 A.

Key Word : Hardox 500, wire erosion, surface roughness

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana yol gösteren, her zaman desteğini yanında hissettiğim, bana kıymetli zamanını ayırıp faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan, her sıkıntıda yanına dilediğim gibi gidebildiğim, güler yüz ve samimiyetle beni karşılayan, bilgi ve tecrübesinden faydalandığım sayın hocam Doç. Dr. Gökhan SUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmasında bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan şirketim Kardemir A.Ş.'ye teşekkürlerimi iletiyorum.

Son olarak, bu yolda maddi ve manevi yardımlarını esirgemediğim yanımda olan sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3	11
ÇELİKLER	11
3.1. HARDOX ÇELİKLERİ	12
3.1.1. Hardox 400	13
3.1.2. Hardox 450	13
3.1.3. Hardox 500	13
3.1.4. Hardox 600	14
3.1.5. Hardox HiTuf.....	14

BÖLÜM 4	15
TEL EROZYON	15
4.1. TEL EROZYONUN UYGULAMA ALANLARI	17
4.2 TEL EROZYON İLE İŞLEMENİN AVANTAJLARI	17
4.3. TEL EROZYON İLE İŞLEMENİN DEZAVANTAJLARI	18
 BÖLÜM 5	19
MATERYAL VE METOT	19
5.1. DENEY MALZEMESİ	19
5.2. HIZLI DELİK DELME TEZGÂHI	21
5.3. TEL EROZYON TEZGÂHI VE ÖZELLİKLERİ	23
5.4. KOORDİNAT ÖLÇÜM CİHAZLARI:	24
5.5 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜM CİHAZI:	25
5.5.1 Profilometre	26
5.6. SERTLİK ÖLÇÜM CİHAZI.....	27
5.7 MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ.....	28
5.8. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ.....	29
5.8.1 Deney Parametreleri	31
 BÖLÜM 6	33
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	33
6.1 BOYUT ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	33
6.2 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	46
6.3 SEM GÖRÜNTÜLEME İLE MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	49
6.4. İŞLENMİŞ YÜZEYLERDE EDX ANALİZİ İLE ELEMENT TANIMLAMA	55
6.4 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	58
 BÖLÜM 7	60
SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	63
 ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1	Tel erozyon çalışma sisteminin gösterimi [27].	16
Şekil 5.1.	Deney malzemesi; (a) 3D görünümü, (b) 2D görünümü, (c) dairesel kesit 2D ve 3D görünümü, (d) dikdörtgen kesit 2D ve 3D görünümü.	21
Şekil 5.2.	Hızlı delik delme cihazı.....	23
Şekil 5.3.	Deneyde kullanılan tel erozyon tezgâhı genel görüntüsü.....	24
Şekil 5.4.	Ölçüm tamlığı belirlenirken kullanılan CMM'in genel görüntüsü.	24
Şekil 5.5.	Profilometrenin şematik gösterimi.	26
Şekil 5.6.	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	27
Şekil 5.7.	Sem cihazı genel görüntüsü.....	28
Şekil 5.8.	Dikdörtgen formların tel erozyon tezgahında işlenme esnasında çekilmiş görüntüsü.....	29
Şekil 5.9.	Dikdörtgen kesitin ölçüm tamlığının CMM'de incelenmesi.....	30
Şekil 5.10.	Yüzey pürüzlülüğünü ölçümü için kesit alınan parçanın görseli.	30
Şekil 5.11.	Yüzey pürüzlülük cihazında kesit numunenin ölçümü.	31
Şekil 5.12.	Tel erozyon tezgahında parametrelerin görüldüğü ekran.....	32
Şekil 6.1.	3 Bar sıvı basıncında dairesel numunelerin değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	34
Şekil 6.2.	3 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.....	35
Şekil 6.3.	4 Bar sıvı basıncında işlenen dairesel formların değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	36
Şekil 6.4.	4 Bar sıvı basıncında dairesel formların akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi. .	37
Şekil 6.5.	3 Bar sıvı basıncında işlenen dikdörtgen formların uzun kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	38
Şekil 6.6.	3 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların uzun kenarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.	39
Şekil 6.7.	4 Bar basınç kullanılarak işlenen dikdörtgen formların uzun kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	40
Şekil 6.8.	4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların uzun kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.....	41

Şekil 6.9.	3 Bar basınç kullanılarak işlenen dikdörtgen formların kısa kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	42
Şekil 6.10.	3 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların kısa kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.....	43
Şekil 6.11.	4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların kısa kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.	44
Şekil 6.12.	4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen numunenin kısa kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.....	45
Şekil 6.13.	3 bar sıvı basıncında yüzey kalitesinin ölçüm sonuçları.	47
Şekil 6.14.	Yüzey kalitesinin 4 bar sıvı basıncındaki ölçüm sonuçları.	48
Şekil 6.15.	3 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası kesitlerin 1000x büyütme SEM görüntüleri. (a) 60 A akım değerinde (b) 70 A akım değerinde (c) 80 A akım değerinde (d) 90 A akım değerinde (e) 100 A akım değerinde görüntüleri	50
Şekil 6.16.	4 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası kesitlerin 1000x büyütme SEM görüntüleri. (a) 80 A akım değerinde (b) 90 A akım değerinde (c) 100 A akım değerinde görüntüleri.....	51
Şekil 6.17.	3 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası yüzeylerin 1000x büyütme SEM görüntüleri; (a) 60 A akım değerinde (b) 70 A akım değerinde (c) 80 A akım değerinde (d) 90 A akım değerinde (e) 100 A akım değerinde görüntüleri.....	52
Şekil 6.18.	4 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası yüzeylerin 1000x büyütme SEM görüntüleri; (a) 80 A akım değerinde (b) 90 A akım değerinde (c) 100 A akım değerinde görüntüleri.....	54
Şekil 6.19.	100 A akım değerinde sıvı basıncında değişimi sonrası 1000x büyütme SEM görüntüleri; (a) 3 bar sıvı basıncında kesit görünüm (b) 4 Bar sıvı basıncında kesit görünüm (c) 3 bar sıvı basıncında yüzey görünümü (d) 4 bar sıvı basıncında yüzey görünümü görüntüleri.	55
Şekil 6.20.	3 bar sıvı basıncı ve 60 A akım parametre değerinde gerçekleştirilen deney numunesinin EDX analizi.	56
Şekil 6.21.	4 bar sıvı basıncı ve 90 A akım parametre değerlerinde gerçekleştirilen deney numunesinin EDX analizi.	57
Şekil 6.22.	İşlenmiş yüzeylerde ölçülen sertlik değerleri.	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1.	Aşınmaya dayanıklı çeliklerin ticari adları [18].	12
Çizelge 3.2.	Hardox çeliklerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.	14
Çizelge 5.1.	Hardox-500'ün kimyasal analiz sonuçlarının teknik veriler ve deneysel veriler çerçevesinde karşılaştırılması [28].	19
Çizelge 5.2.	Hızlı delik delme tezgâh özellikleri.	22
Çizelge 5.3.	Tel erozyon tezgâhı özellikleri.	23
Çizelge 5.4.	CMM cihazı teknik özellikleri.	25
Çizelge 5.5.	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı özellikleri.	27
Çizelge 5.6.	Sertlik ölçüm cihazı teknik özellikleri.	28
Çizelge 5.7.	Tel erozyon tezgahının işleme parametreleri.	31
Çizelge 6.1.	Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	35
Çizelge 6.2.	Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	37
Çizelge 6.3.	Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	39
Çizelge 6.4.	Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	41
Çizelge 6.5.	4 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişmesi sonucu oluşan ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	43
Çizelge 6.6.	4 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişmesi sonucu oluşan ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.	45
Çizelge 6.7.	Tel erozyon işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülük değerleri.	46
Çizelge 6.8.	3 bar sıvı basıncında yüzey pürüzlülük değerleri.	47
Çizelge 6.9.	4 bar sıvı basıncında yüzey pürüzlülük değerleri.	48
Çizelge 6.10.	FF değerinin 100 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değerleri.	49
Çizelge 6.11.	FF değerinin 60 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değerleri.	49
Çizelge 6.12.	Numune üzerinde alınan sertlik ölçüm değerleri.	58

KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

ANOVA: Varyans Analizi

CMM : Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçme Makinası)

FF : Akım

GB : Gaz Basıncı

INJ : Sıvı Basıncı

KERF : Kesme Genişliği

ON : Odak Noktası

TA : Tepe Akımı

TKO : Talaş Kaldırma Oranı

T-ON : Darbe Açma Süresi

T-OFF : Darbe Kapatma Süresi

WB : Tel Gerginliği

WEDM : Wire Electro Discharge Machine (Tel Elektro Erozyon Tezgâhı)

WS : Tel Hızı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda, teknolojiadaki gelişmelerin hızlıca artması hem malzeme hem de söz konusu malzemelerin kullanışlı hale getirilmesinde kullanılan metotlardan beklentiyi artırmaktadır. Özellikle savunma ve havacılık sektöründe artan çalışmalarla birlikte ortaya çıkan ve kullanımı artan yeni malzemeleri işlemede geleneksel imalat yöntemlerinden olan talaşlı imalat yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada alışmamış imalat yöntemlerinden tel erozyon teknolojisi ile işleme incelenmiştir. Tel erozyon tezgâhları üzerinde akım oluşan bir tel ile malzemeyi işleyerek talaş kaldıran ve bilgisayar ile kontrol edilen tezgahlardır. Bu işleme yöntemi 1940'lardan günümüze kadar genişleyerek kullanımı artmaktadır [1]. Tel Erozyon yönteminde yüzey kalitesi ve ölçüyü etkileyen parametreler olarak Akım (FF), Sıvı Basıncı (INJ), Tel Gerginliği (WB) ve Tel Hızı (WS), Tel cinsi ve Tel Çapı alınabilir. İşlem parametrelerinin seçimi yüzey kalitesinin belirlenmesinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Yanlış parametre seçiminde, tel kopmaları gibi işlem kararlılığını etkileyen olumsuz sonuçlarla karşılaşmaktadır. Tel erozyon yüksek sertlikte, keskin köşeli (tel çapı kadar yarıçapa sahip köşeler), iş parçası kalınlığı fazla olan ve iyi yüzey kalitesi hedeflenen parçalar için uygun bir imalat yöntemidir. Bu çalışma da tel erozyon tezgahında incelenmesi için kullanılan malzeme olan Hardox 500 talaşlı imalatta üretimi zor olan malzemelerdendir. Bu malzeme aşınma direncinin yüksek olması gereken durumlarda bekleneni en iyi şekilde verebilen bir aşınma levhasıdır. Aşırı zorlanmalarda bile tokluğunun çok yüksek olması ne kadar önemli bir aşınma levhası olduğunun göstergesidir. İşlenmiş sıcak haddelenmiş plakalardan oluşur ve özellikle aşınma ve darbe etkilerine dayanıklı yapılarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Aşınmaya karşı dayanıklılık, çelik plakanın yüzeyindeki sert bir martenzit yapıdan kaynaklanır. Martenzit yapısı, çelik plakanın aşınmaya karşı daha dirençli olmasını sağlar. Bu özellik, Hardox 500'ü aşınmaya maruz kalan uygulamalarda dayanıklı hale getirir, böylece kullanım süresi uzar ve bakım maliyetler

azalır. Bu elik yüksek mukavemet özellikleriyle de tanınır. Yüksek mukavemet, elik plakanın aşırı yük altında bile ekil değiştirmesini ve çatlak oluşumunu önler. Bu, ağır yük taşıyan uygulamalarda kullanıldığında dayanıklılığı artırır ve yapısal bütünlüğü korur. Hardox 500 eliği, madencilik ekipmanları, inşaat makineleri, tarım makineleri, kamyon kasa ve dorse yapıları, öğütme ve kırma makineleri, kova ve kazıcı uçları gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, huniler ve diğer aşınmaya maruz kalan bileşenler için de tercih edilen bir seçenektir. Hardox 500 eliği, uzun ömürlü, maliyet etkin ve dayanıklı yapılar oluşturmak isteyen endüstrilerde tercih edilir [2].

Gerçekleştirilen bu çalışmada bu nedenlerden dolayı Hardox 500 eliği tercih edilmiş ve tel elektro erozyon tezgâhında değişken olarak seçilen işlem parametrelerine (FF ve INJ) bağlı olarak dairesel ve dikdörtgen formların işlenmesinin ölçü tamlığı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde Hardox malzemesi, tel erozyon tezgâhı ve işleme parametrelerine yönelik geçmiş araştırmalarda yer alan literatürdeki özet bilgiler incelenmiş ve aşağıda sunulmuştur.

Kalavathi ve Bhuyan, Tel Elektro Erozyon Tezgahında (WEDM) seçtikleri işleme parametrelerinin işleme kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada deney şablonunu Taguchi tekniğinin L9 dizinimine göre hazırlamışlardır. Deneyler sonrasında yüksek krom takım çeliğindeki en uygun kalite karakteristikleri için gerekli parametreleri tahmin etmişlerdir. Tepe akımı (TA), Darbe açma süresi (T-on), Darbe kapatma süresi (T-off) ve tel besleme oranı işleme parametreleri olarak deneyde kullanılmıştır. Deney T-on, T-off ve IP'den oluşan en uygun proses parametre setini gösteren en yüksek sinyal-gürültü oranı değerlerini göstermiştir. Sonuçların doğrulanması için varyans analizi (ANOVA) ile karşılaştırılan dokuz deney arasında en verimli olanın tel besleme oranı olduğu görülmüştür [3].

Dhale ve Deshmukhb yaptıkları çalışmada WEDM'de farklı tel çaplarının kullanılmasının etkisini ve boyutsal sapma, aşırı kesme, tel tüketimi, yüzey pürüzlülüğü, yeniden döküm katman kalınlığı, mikro sertlik ve mikroyapısal değişiklikler gibi performans özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Büyük çaplı tel yerine küçük çaplı tellerin kullanılması boyutsal sapmada ve aşırı kesme de önemli bir azalma meydana getirmiştir. Küçük çaplı bir tel kullanılarak işlenen bir yüzey, geniş çaplı bir tel kullanılarak işlenmiş bir yüzeye göre mikro-sertlikteki değişikliklerde azalma ve daha düşük döküm tabakası kalınlığı gösterdiğini bulmuşlardır. WEDM'de küçük çaplı tellerin kullanılması, üretkenlik ile hassasiyeti artırmış, tel ve iş parçası atıklarında azalmayı sağlamış ve daha düşük bir çevresel etkiye sahip olmuştur [4].

Çelik vd. tel erozyon ile sabit işleme şartlarında işlenmiş olan Ti 6Al 4V alaşımından üretilmiş numunelerin manyetik aşındırıcı ile işleme yöntemi kullanarak yüzey kalitelerini artırmışlardır. Yapılan bu çalışmada, Taguchi L9 ortogonal dizin deneysel tasarımıyla aşındırıcı boyutu, işleme süresi, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin işlem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları ve talaş kaldırma oranı (TKO) manyetik aşındırıcılarla işleme sonrası belirlenmiştir. Yapılan bu işlemler sonucunda TKO değerleri işleme süresinin artmasıyla azaldığı, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oran değerlerinin de ortalama %92 olarak ölçüldüğü ve uygun işleme şartlarıyla bu sonucun %96 oranlarına kadar arttığı gözlemlenmiştir. Artık tabaka miktarının ise yapılan tüm deneylerde tamamen ortadan kaldırıldığı sonucuna varılmıştır [5].

Altuğ yaptığı çalışmada WEDM’de (plazma ve MAG kaynağı ile kaynaklanmış) Hardox çelik levhaların işlenebilirliğini incelemiştir. Daha sonra hem HAZ hem de WM bölgelerinden alınan numunelerin her biri 2 seviyeli dört farklı parametre kullanılarak WEDM’de kesilmiştir. Bu aşamadaki amaç, HAZ ve WM bölgelerinde kesme genişliği (kerf) ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini değişen mikro yapı, mikro sertlik ve iletkenlik değerlerine göre incelemektir. Çalışma sonunda en düşük kerf plazma kaynaklı numunelerde, en düşük Ra değerleri ise MAG kaynaklı numunelerde elde edilmiştir. WM bölgesindeki numuneler genel olarak iletkenliği yüksek numune MAG kaynağı ile kaynaklanmış numunelerdir. HAZ bölgesinde ise numuneler yüksek iletkenliği sahip plazma kaynağı ile kaynaklanmış numunelerdir [6].

Eksilmez vd. Hardox 500 çeliğini farklı geometri ve kesme parametreleri kullanarak lazerle kesmiştir. Kesim sonucunda kullanmış olduğu kesim geometrilerinin ve kesme parametrelerinin kesim kalitesine etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda üç farklı kesme geometrisi (Düz, V ve yay) kullanılmıştır. Her geometri farklı kesme parametreleri kullanılarak kesilmiştir. Çalışmalar sonucu elde edilen sonuç; Ra’nın en düşük değerine (2,099 μm) Hardox 500 çeliğinin lazerle düz geometride odak noktasının (ON) iş parçasına yaklaşması, gaz basıncının (GB) ve kesme hızının (KH) artması ile ulaşılmıştır. En yüksek Ra yay geometrisinde ON’nın iş parçasından

uzaklaşması, GB'nın en düşük değerinde ve KH'nın maksimum değerinde 4,795 μm olarak elde edilmiştir [2].

Sudharsan vd. çalışmalarında tungsten karbür malzemenin daha iyi yüzey kalitesi ve çap doğruluğu için WEDM parametrelerinin optimize edilmesini incelemişlerdir. Süreç parametrelerinin optimizasyonu için gri ilişkisel analiz tekniği kullanılmıştır. Bitirme işlemi için WEDM'nin FF, T-off ve gerilim gibi üç giriş değişkeni seçilmiştir. Kaba işleme işlemi için parametreler FF 6 A, voltaj 8 V, T-off süresi 3 μs ve voltaj aralığı 55 V belirlenmiştir. Deney tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Gri ilişkisel analizden elde edilen optimum işleme parametreleri, deşarj akımı 2 A, voltaj 5 V ve T-off 8 μs olarak seçilmiştir. Sonuçları doğrulamak için doğrulama testleri yapılmıştır [7].

Gürbüz vd. tarafından yapılan çalışmada, işleme hızının, makine performansını değerlendirmede en etkili faktörlerden biri olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, farklı tel elektrotlardaki soğutma yöntemleri ve iş parçalarının işleme hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada, birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar; iş parçası olarak AISI D2 takım çeliği ve AISI 304 paslanmaz çelik, tel elektrot olarak pirinç, bakır ve çinko kaplı pirinç elektrotlar ve soğutma tipi olarak püskürtmeli ve daldırılmış soğutma yöntemleri tercih etmişlerdir. Farklı işleme parametrelerine bağlı olarak işleme hızı sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda elektrot tipine göre en yüksek kesme hızları bakır tel elektrottur. En düşük işleme hızları ise kaplamasız pirinç tel elektrot ile elde edilmiştir. Soğutma tipleri seçimi açısından daldırılmış soğutma tipi, püskürtmeli soğutma tipine göre daha iyi sonuçlar getirmiştir. Genellikle iş parçasına bağlı olarak işleme hızları şu şekildedir; en yüksek işleme hızları AISI D2 takım çeliği malzemesi, en düşük işleme hızları ise AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği işlenirken oluşmuştur [8].

Altuğ yaptıkları bu çalışmada, Hardox 400 çeliğinin mekanik ve iletkenlik özellikleri farklı ısıtma işlemleriyle değiştirilmiş ve bu özelliklerin WEDM ile işlenebilirliğine etkisi incelenmiştir. Çeşitli özellikleri belirlemek için optik mikroskop incelemeleri yapılmış, ayrıca mikrosertlik ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. WEDM ile işlenebilirliğine ve işlem sonrası etkisini belirlemek için üç seviye ve dört farklı

parametre ile yapılmıştır. Kerf, Ra ve TKO değerleri belirlenmiştir. En iyi kerf değeri 350 °C’de temperlenen numune 6’dan elde edilmiştir. En iyi Ra değeri, 200 °C’den temperlenen numune 3’ten elde edilmiştir. En iyi TKO değeri 300 °C’de temperlenen numune 5’ten elde edilmiştir. Ayrıca Ra üzerinde en etkili parametreler FF olarak belirlenmiştir. Kerf ve TKO üzerinde en etkili parametreler t- off olarak görülmektedir [9].

Özdemir ve Gökmeşe tarafından yapılmış olan deneysel çalışmada, Hardox 500 sac malzeme oda sıcaklığında 90° V dip bükme kalıbında şekillendirildiğinde, çatlama ve kırılmalar oluşmuştur. Farklı sıcaklıklarda (850°C, 900°C, 950°C ve 1000°C) normalizasyon ısı işlemi sac malzemenin şekillendirilebilirliğini arttırmak amacıyla uygulanmıştır. Uygulanan normalizasyon ısı işlemi sonrasında sac malzemelere, direkt ve ezerek bükme işlemleri V dip bükme kalıbı kullanılarak uygulanmıştır. Uygulanan bükme işlemleri sonrası sac malzemelerde, makro ve mikro boyutta herhangi bir kırılma veya çatlak durumunun oluşmadığı gözlenmiştir. Artan normalizasyon ısı işlem sıcaklıklarında, geri esneme miktarlarının azaldığı tespit edilmiş olup ezerek bükme işlemlerinde ise, geri esneme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir [10].

Tosun ve Çoğun bu çalışmalarında WEDM kesme parametrelerinin işleme hızına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, faktöriyel deney tasarımı kullanılarak farklı darbe süresi, açık devre voltajı, tel hızı ve sıvı basıncında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 0.25 mm çapında pirinç tel takım ve 10 mm kalınlığında SAE 4140 çelik iş parçası malzemesi kullanılmıştır. Artan darbe süresi, açık devre gerilimi, tel hızı ve sıvı basıncının işleme hızını arttırdığı deneysel olarak bulunmuştur. İşleme hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki araştırılmıştır [11].

Çaydaş ve Hasçalık bu çalışmada, AISI D5 çeliğinin mikroyapısı ve yüzey pürüzlülüğü, tel elektro erozyon tezgahında işleme parametrelerine göre incelenmiştir. Deneylerde darbe süresi, voltaj, sıvı basıncı ve tel besleme hızı değişkenler olarak alınmıştır. Kesim işlemlerinden sonra numunelerin mikro yapısı optik ve SEM mikroskopi ile incelenmiş, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Sonuç olarak yüzeylerin özelliklerinin proses parametrelerine bağlı olduğu gözlemlenmiş ve

WEDM’de proses parametrelerinin malzemenin istenilen özelliklerine göre seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [1].

Şah vd. tel elektro erozyon tezgâhı (WEDM) ile işlenen tungsten karbür numunelerin malzeme kalınlığının değiştirilmesine ek olarak yedi farklı işleme parametresinin değiştirilmesinin malzeme kaldırma oranı, kerf ve yüzey pürüzlülüğü gibi işleme tepkileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerin tasarımı, üç kez tekrarlanan 27 deneyden oluşan bir set gerektiren, her biri üç seviyeli 8 kontrol faktörüne sahip bir Taguchi dik tasarımına dayanıyordu. Önemli faktörleri belirlemek için cevaplar alındıktan sonra ANOVA yapılmıştır. İş parçası kalınlığının TKO üzerinde önemli bir etkiye sahip olması beklenirken, yalnızca yüzey pürüzlülüğü durumunda önemli olduğu görülmüştür. Son olarak, işleme tepkilerinin optimizasyonu yapılmış ve malzeme kaldırma oranı, kerf ve yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuştur. Modeller, incelenen tüm işleme sonuçları için işleme performansında önemli gelişmeler gösteren doğrulama deneyleriyle doğrulanmıştır [12].

Polzer vd. WEDM kullanılarak Inconel 625, Mar-M247, Nimonic C 263 ve B 1914 nikel süper alaşımlarının işlenebilirliğini karşılaştıran kapsamlı bir çalışma yapmışlar ve makine parametrelerinin ayarlanmasının kesme hızının yanı sıra yüzey ve yüzey altı tabakasının kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aynı makine parametre setine sahip bireysel malzemeler için kesme hızının farklı olduğu ve bireysel malzemeler için işlenmiş yüzeyin kalitesini önemli ölçüde artırmanın mümkün olduğu bulunmuştur [13].

Mouralova vd. WEDM ile son haline getirilen nikel süper alaşımı Mar-M247 araştırmışlardır. Bu çalışmada çoklu kesim işleme yapılmış ve makine parametrelerinin (T-on, T-off ve Deşarj akımı) en uygun ayarını bulmak için, birinci ve ikinci kesmede toplam 54 daire ile kapsamlı bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üçüncü kesmede ise işlenmiş yüzeyin topografyası dikkate alınmıştır. Ardından, yüzey altı tabakasının durumunun bir analizi de dahil olmak üzere, işlenmiş numunelerin topografyası ve morfolojisinin analizi yapılmıştır. Çalışma ayrıca bir transmisyon elektron mikroskobunda lamel analizini de içermektedir. Üçüncü kesimde

kesme hızının maksimize edilmesi ile yüzey topografyasının orantılı olarak bozulduğu ancak ilk kesimde oluşan tüm çatlakların tamamen giderildiği de gözlemlenmiştir [14].

Tosun ve Çogun yaptıkları çalışmada WEDM kesme parametrelerinin tel elektrot aşınmasına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, darbe süresi, açık devre voltajı, tel hızı ve sıvı basıncı gibi farklı ayarlar altında gerçekleştirilmiştir. Takım ve iş parçası malzemesi olarak 0,25 mm çapında pirinç tel ve 10 mm kalınlığında AISI 4140 çelik kullanılmıştır. Artan darbe süresi ve açık devre voltajının tel aşınma oranını (TAO) arttırdığı, artan tel hızının ise bu oranı azalttığı deneysel olarak bulunmuştur. İş parçası malzeme kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi TAO ile ilgili olarak da araştırılmıştır. TAO'nun işleme parametreleri ile değişimi, regresyon analizi tekniği kullanılarak istatistiksel olarak modellenmiştir. Talaşlı imalat parametrelerinin TAO üzerindeki önem düzeyi ANOVA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [15].

Kara vd. farklı sıcaklık ve zamanlarda Hardox 500 çeliklerini kutu borlama işlemine tabi tutmuştur. Yapılan borlama 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda ve her bir işlem için 2, 4 ve 6 saat gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlem sonucunda bor tabakasının morfolojisi SEM ile incelenmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin artması ile Hardox 500'ün borür tabakasının arttığı gözlemlenmiştir. Borlama işlemi sonucunda gerçekleştirilen aşınma deneyinde Hardox 500'ün aşınma hızının ilk haline göre azaldığı aşınma direncinin ise arttığı gözlenmiştir. Borür tabakasında Daimler Benz Rockwell-C testi ile yapışma özellikleri incelenmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla aşınma ve yapışma direncinin azaldığı tespit edilmiştir [16].

Saif ve Tiwari yaptıkları bu çalışmada WEDM işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve alüminyum alaşımı üzerindeki malzeme kaldırma oranı hakkındaki etkisini göstermek amacıyla bu çalışmayı yapmıştır. Alüminyum alaşımı AA 6061 ve AA 5083 incelenmiş ve parametrik optimizasyon için tek amaçlı yöntem kullanılmıştır. Çalışma, ortogonal matris L9, S/N oranı ve ANOVA dikkate alınarak Taguchi'nin güçlü tasarım metodolojisini kullanılmıştır. Deney için t-on, t-off ve TA birincil değişken olarak kullanılmıştır. Sonuçlar; yüzey pürüzlülüğünü etkileyen ana önemli unsurların, AA 6061 alaşımında T-on ve T-off süresi olduğunu, benzer şekilde

yüzey pürüzlülüğünü etkileyen ana önemli öğelerin, AA 5083 alaşımında TA ile t-off olduğunu göstermektedir [17].

Nourbakhsh vd. titanyum alaşımının tel elektro erozyon tezgahında işlenmesinin (WEDM) performans parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için yedi işlem parametresini (darbe genişliği, servo referans voltajı, darbe akımı ve tel gerilimi dahil) incelenmiştir. Taguchi L18 deney tasarımı kullanılarak yapılan tüm deneyler Charmilles WEDM ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen işlem parametrelerinden TA ve darbe aralığı, kesme hızını arttırmıştır. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü darbe genişliği ile artarken darbe aralığı ile azalmıştır. ANOVA voltaj, enjeksiyon basıncı, tel besleme hızı ve tel gerginliğinin kesme hızı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. İşlenmiş yüzeylerin taramalı elektron mikroskopik (SEM) incelemesi, farklı tellerin iş parçası malzemesi yüzey özellikleri üzerindeki etkisini anlamak için yapılmıştır [18].

Zeng vd. tarafından yapılan bir çalışmada, farklı kesit şekilleri (dairesel ve dikdörtgen) ve işlem parametreleri (darbe genişliği, darbe aralığı ve servo referans voltajı) kullanılarak yapılan tel erozyon işleminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, dairesel kesitli numunelerin daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu ve işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [19].

Çaydaş ve Hasçalık çalışmalarında, tel elektro erozyon yönteminde sıvı basıncı, puls süresi, gerilim ve tel ilerleme hızı parametrelerine bağlı olarak alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı değişimi incelenmiştir. Kesme işlemlerinden sonra, numunelerin mikroyapıları SEM ve optik mikroskopta incelenmiştir. Mikrosertlik ve yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, numunelerin yüzey özellikleri işlem parametrelerine göre değişmekte ve malzemeden beklenen özelliklere göre uygun parametre seçilmesi gerekmektedir [20].

Yapılan literatür araştırmasında HARDOX 500 çeliğinin tel erozyon ile kesilmesinde daha çok T-on ve T-off'un parametrelerinin seçildiği ancak FF ve INJ değişkenlerinin etkilerinin araştırılmasına yönelik çalışmaların yeterli seviyede detaylandırılmadığı

görülmüştür. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışma da bu parametreler değişken olarak seçilmiştir.



BÖLÜM 3

ÇELİKLER

Çelikler demir-karbon alaşımlarından oluşan bir malzeme olup karbon dışında bazı alaşım elementlerini yapısına alabilmektedir. Farklı bileşimlerde olan ve/veya farklı ısıt işlemler uygulanmış çelik türleri bulunmaktadır. Kullanılan ısıt işleme ve çeliğin bileşimi, çelik alaşımlarının mekanik özelliklerini farklı kılar. Tüm çelik çeşitlerinde karbon önemli bir alaşım elementidir. Genellikle artan karbon oranıyla çekme mukavemeti artar, fakat tokluk yani darbelere karşı dayanma gücü azalır. Bu gibi olaylarda az miktarlarda alaşım elementler olan manganez, nikel, krom, molibden, niyobyum ve vanadyum ilave edilerek tokluk artırılabilir.

Çeliğin aşağıda belirtilen avantajları günümüzde en fazla kullanımı olan mühendislik malzemelerinden biri olmasını sağlamıştır:

- Demir elementinin doğada çok fazla bulunması,
- Diğer metallerin kıyaslandığından üretim maliyetlerinin daha ucuz olması,
- 1538°C gibi çok yüksek ergime sıcaklığının olması,
- Birçok alaşım ile kıyaslama yapıldığında mekanik özelliklerinin üstün olması,
- Sahip olunan bu mekanik özelliklerin farklı dayanıklılık artırıcı işlemler ile geliştirilmesi.

Çizelge 3.1’de bazı aşınmaya dayanıklı çeliklerin ticari adları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Aşınmaya dayanıklı çeliklerin ticari adları [21].

Üretici Ülke	Üretici Firma	Ticari Adı
Avusturya	Voestalpine Grobblech GmbH	Durostat 400 Durostat 500
İsveç	SSAB	Hardox HiTuf -Extreme Hardox 600 Hardox 550 Hardox 500 Hardox 450 Hardox 400
Almanya	Dillinger Hütte GTS	Dillidur 400-450-500
Finlandiya	RUUKKI	Raex Ar400 Raex Ar500
Fransa	INDUST EEL	FORA 400 FORA 450 FORA 500
İngiltere	Corus	ABRAZO 400 ABRAZO 500
Avustralya	Sandvik	CREUSABRO 4800 CREUSABRO 8000
Almanya	Salzgitter	BRINAR 400
Almanya	ThyssenKrupp Stahl	XAR 400 XAR 450 XAR 500

3.1. HARDOX ÇELİKLERİ

Endüstriyel piyasada ve mühendislik uygulamalarında en çok karşılaşılan problemlerden biri aşınmadır. Aşınma nedenli makine parçalarında görülen hacimsel ve boylamsal azalış, makine elemanın randımanlı çalışmasını sınırlandırarak verimini düşürüp zaman içerisinde işlemini yitirmesine sebep olmaktadır. Aşınmanın önlenmesi ya da azaltılabilmesi için uygun malzeme tasarımının yanında yüksek tokluk, iyi bir dayanıklılık ve kabul edilebilir seviyede bir sertlik için ilk tercih edilen çelikler iyi aşınma direncine sahip olanlar olmalıdır. Hardox serisi çelikler de bu tür malzemelerden birisidir ve aşınma direnci yüksektir [22-23]. Demir cevherinden üretilen Hardox ham maddesinin saf olarak kullanılması, çok iyi süneklik ve kullanımda kolaylık sağlar [24]. Bu çelikler aynı zamanda su verilmiş ve menevişlenmiş bir aşınma levhasıdır.

Ürün ilk defa 1970 yılında piyasaya sunulmuş ve bugüne dek farklı ihtiyaçları karşılayacak şekilde geliştirilmiştir [25]. Bu levhalar bazen yük taşıyıcı olarak kullanılabilir. Bunda yüksek toklukları, rahat bükülebilme ve kaynak edilebilmelerinin katkısı büyüktür. Yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu durumlarda (damper kasaları, ekskavatör kepçeleri, kırıcılar ve benzeri ekipmanlarda) parçaların çalışma ömürlerini artırır [26]. Hardox çeliği sertliğini ve dayanıklılığını, modern röleli su verme hattında gerçekleştirilen yüksek verimde suda su verme süreci ile almaktadır. Bu etkili süreç sayesinde alaşım elementlerini en düşük seviyede tutulabilir; bu da ürün ve çevre için büyük avantajları beraberinde getirir [27].

Bu çelik grubunda dirençli dış yapı plakası, farklı sertlik boyutlarında yer almaktadır. Bu seviyeler Hardox HiTuf, Hardox 600, Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450 ve Hardox 400 şeklindedir. Bu sayede, özel kullanım alanları olan yerlerde Hardox sertlik sınıfını istediğimiz zaman kolayca seçme olasılığı sağlar.

3.1.1. Hardox 400

Hardox 400 çeliği genel olarak 400 HBN sertliğine sahip olup aşınmaya dayanıklıdır. Bu malzeme ile ortaya konulan ürünlerin uzun ömürlü olmasına yardımcı olan Hardox 400 çeliklerinin en önemli özelliği tam sertleştirilmiş olmasıdır. Hardox 400 çeliklerinin çarpma dayanıklılığı ve plastik esnekliği çok fazladır [28].

3.1.2. Hardox 450

Aşınma çeliği plakasından 450 HBN'lik sertlik değeri olan ve birçok amaca göre kullanımı olan dış yapı çelik sınıfındandır [29].

3.1.3. Hardox 500

Bu çelikler 500 HBN nominal sertliği olan çeliklerdir. Mükemmel yakın kaynak becerisi, darbe dayanıklılığı ve bükülebilir olması onu diğerlerinden ayıran özelliklerdendir. Bu çelikler fazla aşınma direncine ihtiyaç duyulan uygulamalar için uygundur. Bu malzemeler servis ömrünün ve yük kapasitesinin artmasını sağlarlar.

Aynı zamanda tokluğu ve iyi işlenebilirliği sürdürürler. Hardox 500 malzemesinin plaka şeklinde olanları 4-103 mm arası kalınlıklarda, sac şeklinde olanları ise 2-6,5 mm kalınlıklarda mevcuttur. Plakalar genişlik olarak 3350 mm'ye kadar, uzunluk olarak ise 14.630 mm'ye kadar bulunmaktadır. Sac olarak bakıldığında 1650 mm genişliğe ve 16000 mm uzunluğa kadar mevcuttur [29].

3.1.4. Hardox 600

Bu malzeme spesifik olaylar için üretilmiş dünyadaki en sert aşınma levhalarından biridir. Ni-hard olarak adlandırılan sert döküm, yüksek kromlu beyaz döküm ve kaynak dolgu gibi malzemelerle rekabet halindedir [28].

3.1.5. Hardox HiTuf

Bu çelikler aşırı aşınma meydana gelen makina parçaları ve çatlama oluşan uygulamalar için yüksek direnç sağlamak amacıyla üretilmektedir [29]. Hardox çeliklerinin mekanik ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Hardox çeliklerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Çelik türü	Mekanik Özellikler				
	Sertlik [HBN] Max-Min	Darbe tokluğu t=20mm	Kalınlık (mm)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama As1 (%)
HardoxExtreme	633-57	<15j-40°C	8-20		
Hardox 600	640-570	20j-40°C	8-51		
Hardox 550	575-525	30j-40°C	10-50		
Hardox 500	540-450	35j-40°C	4-80	1250	
Hardox 450	475-425	50j-40°C	3-130	1100-1300	10
Hardox 400	430-370	45j-40°C	3-130	1000	10
HardoxHiTuf	370-310	95j-40°C	40-160	850	14

BÖLÜM 4

TEL EROZYON

Tel Erozyon, iş parçasını kesmek amacıyla bakır-pirinç alaşımlı bir telin tercih edildiği çok hassas bir işlem olarak bilinir. Bu işlem esnasında iş parçası ile tel arasındaki elektrik kıvılcımlarından yararlanılarak iş parçasını kesmek amaçlanır. Her bir kıvılcımdaki enerji miktarı ve her kıvılcımın zaman aralığına göre talaş kaldırma hızı birbirinden farklılık göstermektedir [30].

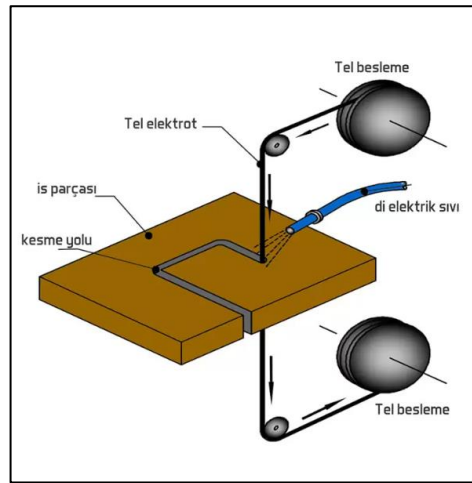
Çok hassas olmakla birlikte bu metot kalın bileşen parçalarında bile düşük maliyete sahiptir. Bu işlemde yararlanılarak, zor şekillenen malzemelerde biçimlendirilebilir. Bu da onu farklı alanlardaki endüstriler için yararlanılan bir işleme süreci konumuna taşır. Gelişim gösteren teknoloji yeni malzemeleri ve buna bağlı olarak da yeni işlenebilirlik problemlerini beraberinde getirmiştir. Klasik talaşlı üretim metotları, yeni meydana getirilmiş malzeme ve bu malzemelerin işlenmesi için yeterli olmadığına alışık olunmayan ya da modern imalat metotları şeklinde isimlendirdiğimiz işleme metotları ortaya çıkmasına neden olmuştur [31].

İlk defa 1770 yılında Joseph Priestley tarafından sunulmuş olan yöntem WEDM'dir. Priestley, bir elektrik boşalmasının metali aşındırabileceğini bulmuş ve bunun sonucunda da tel erozyon yöntemi keşfedilmiştir. Bu işlem, işlemin başlaması için bir delik açılarak iş parçasının kenarına doğru başlamaktadır.

Tel elektro erozyon tezgâhlarında işlemler iki farklı aşamadan oluşmaktadır. İşlemin 1. aşamasında, iş parçasının şekli bir koordinat düzlemi üzerinde gösterilerek ve şekildeki her bir elemana nokta, daire ve çizgi numaraları verilerek çizimi yapılmaktadır. 2. aşamada kesme yolu sayesinde ana şekil ortaya çıkarılmaktadır.

Kesme işlemi tel kesme yolu izlenerek başlanır ve kesme işlemi bu şekilde tamamlanır. Bu tezgâhlarda çoğunlukla tercih edilen tel elektrotlar çapları 0,05 ile 0,4 mm arasında farklılık gösteren pirinç, molibden ve tungsten tel elektrotlarıdır. Bu tezgâhlarda bakır tel (+), tabla ise (-) yüklüdür. Kesim; telin parçaya değmesi sonucu ortaya çıkan ark yardımıyla gerçekleşir. Ark anında meydana gelen ısı 8000 ile 12000 °C civarlarındadır. Bu tezgâh da dielektrik sıvısının soğutma etkisine bakılacak olursa telle hızlı işlemede, kesim akımıyla beraber tel elektrot bir ısı üretmektedir. Bu duruma bağlı olarak su sıcaklığı yükselir ve soğutmadan dolayı oluşan etki azalır. Di-elektrik sıvısı soğutma ünitesi sayesinde soğutulur. Genellikle, di-elektrik sıvısının sıcaklığı düşükse soğutma etkisi artar ve daha çok akım verilebilir. Böylece kesim hızı artar. Fakat bu sıcaklık tezgâh gövdesinin sahip olduğu sıcaklıktan düşükse, makinenin termal genleşmesine yol açar. Yani bu sıcaklığın gövde sıcaklığından düşük olmaması gerekir [31].

Tel erozyon tezgâhı sanayide üretimi çok meşakkatli olan birçok iş parçasının üretiminde tercih edilir. En çok kalıp yapımında yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte dişli çarkların üretiminde de tercih edilmektedir. Çünkü tel erozyon tezgâhında üretilen bir ürünün taşlanması gerek yoktur. Bir ürünün başka tezgâhlarda işlenmesi olası olmayan bölümlerinin yalnız telin yarıçapı miktarında bir tolerans bırakılarak parçanın işlenmesi uygun görülür. Ek olarak fazla sert metaller elektrik iletebilmek koşuluyla işlem görebilir. Tel erozyonun çalışma sistemi Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1 Tel erozyon çalışma sisteminin gösterimi [32].

CNC tel erozyon tezgâhlarında X, Y, Z, ana eksenleri ve U, V yardımcı eksenleri olarak, toplamda 5 eksen mevcuttur:

- X eksen: Tablanın sağa sola hareketine yardım eder.
- Y eksen: Tablanın ileri geri hareketine yardım eder.
- Z eksen: Telin yataya dik eksenidir. Parçanın kesildiği kalınlığına göre değişir.
- U eksen: Telin X ekseninde kaydırılması sonucu oluşan eksene U eksen, kaydırma açısına ise U açısı denir.
- V eksen: Telin Y ekseninde kaydırılması sonucu oluşan eksene V eksen, kaydırma açısına ise V açısı denir.

4.1. TEL EROZYONUN UYGULAMA ALANLARI

Tel erozyon işlemi alışılmış tekniklerle işleme sırasında hasar görebilecek hassas ve/veya küçük parçalar için uygun bir yöntemdir.

- İyi bitirme ve/veya doğruluk olması gereken kalın ve büyük parçaların
- Karışık şekillerin, dar yuvaların
- Çok kristalli alaşımların
- Hassas, sert, pahalı malzemelerin
- Güçlü alaşımlardan meydana gelen düz levhaların kesiminde kullanılır.

Tel erozyon;

- Otomotiv Endüstrisi,
- Havacılık Endüstrisi
- Medikal Endüstrisi,

gibi birden fazla uygulama alanına sahiptir.

4.2 TEL EROZYON İLE İŞLEMENİN AVANTAJLARI

Tel erozyon ile işlemenin avantajları aşağıda verilmiştir.

- Elektrik iletkenliği işlevine sahip olan her tür malzeme, sertlik değeri fark etmeksizin işlem görebilmekte, bununla beraber kalın malzemelerin ve karmaşık profillerin işlem görmesine olanak tanımaktadır [33].
- Çok narin ve kırılgan parçaların bu yöntemle işlem görebilme nedeni talaş kaldırmak amacıyla takımın iş parçasına uyguladığı gücün neredeyse sıfır olmasıdır.
- Özellikle kalıp üretiminde kullanımı çok tercih edilir. Tezgâha ve kesime göre değışmekle beraber toleransı 0,01 mm ye kadar düşebilmektedir. Kesme boşluğu ise tel çapı ve aşındırma bölgesi (akıma bağlı olarak yaklaşık 1/2 tel çapı) boyutundadır. Bu sayede dişi ve erkek kalıp üretiminde kolaylık sağlamaktadır.
- Tel erozyon tezgâhında üretilen ürünün taşlanması gerekmemektedir.
- Çapaksız parçanın işlem görebilmesi ve yüzük pürüzlülüğünün farklı üretim metotlarına kıyasla daha az olması diğer avantajlarından biridir.

4.3. TEL EROZYON İLE İŞLEMENİN DEZAVANTAJLARI

Tel erozyon ile işlemenin dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Yalnızca elektrik iletkenliği olan malzemelerle uyumludur.
- İlk yapılacak olan yatırım ve bakım maliyetleri yüksektir.
- Telin kesici boyu belli bir sınırdadır ve daha düşük talaş kaldırma hızına sahiptir.
- İş parçasının kenarlarında çapak meydana gelmez. Fakat birden fazla metal yüzeyde ince-sert bir tabaka görülür. Bu da parçanın kullanıldığı yere bağlı olarak avantaj veya dezavantaj oluşturabilir.
- Parçanın oda sıcaklığında gevrekleşmeye eğilimli olduğu durumlarda termal gerilmelerle parça yüzeyinde kılcal çatlaklar görülebilir. Bu sorunun ortadan kaldırılması için işleme bitiminde diğer finiş işlemleri yapılabilir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasında, Hardox 500 malzemesine dairesel ve dikdörtgen geometrili formlar açılmış ve tel elektro erozyon tezgahında belirlenen işleme parametrelerinin değiştirilmesinin yüzey pürüzlülüğüne ve ölçü tamlığına ne gibi etkileri olduğunun belirlenmesi amacıyla deney ağırlıklı çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler ile ilgili bilgiler aşağıda belirtilmiştir.

5.1. DENEY MALZEMESİ

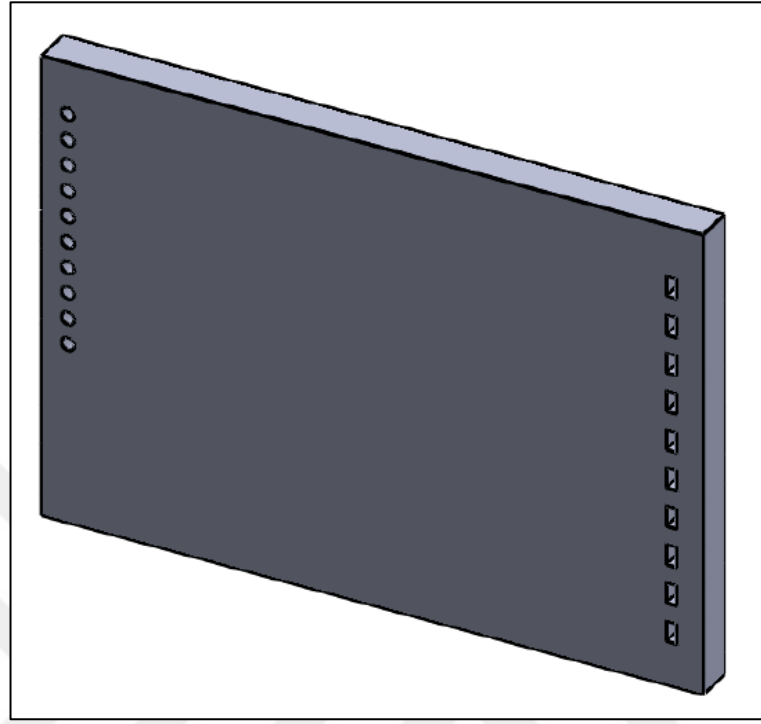
Deneyde malzemesi olarak yüksek aşınma dirençli, kullanımı gittikçe yaygınlaşan Hardox 500 malzemesi seçilmiştir. Deney numuneleri 15*180*250 mm ebatlarında yüzeyleri frezelenmiş plaka olarak temin edilmiştir. Tel erozyon işleme hazırlıkları sürecinde tel kesme girişi için EDM hızlı delik delme tezgahında 2 mm çapında ön delik delinmiştir.

Numune üzerine 5 mm çapında dairesel ve 4*8 mm dikdörtgen şekil işlenmiştir. Numunenin üretim aşamasında fabrikada belirlenen teknik verileri ile deneyde kullanılan numunenin kimyasal bileşenlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Hardox-500’ün kimyasal analiz sonuçlarının teknik veriler ve deneysel veriler çerçevesinde karşılaştırılması [34].

Özellik	Hardox 500 kimyasal analiz verileri									
Teknik veriler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
	0,30	0,4	1,3	0,020	0,01	2,2	2,0	0,40	0,005	Kalan
Deneysel veriler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
	0,29	0,357	1,26	0,02	0,01	2,19	1,897	0,38	0,005	Kalan

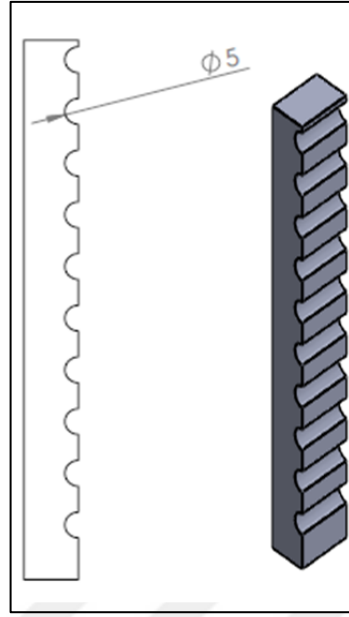
Deney malzemenin teknik resim görüntüleri Şekil 5.1’de sunulmuştur.



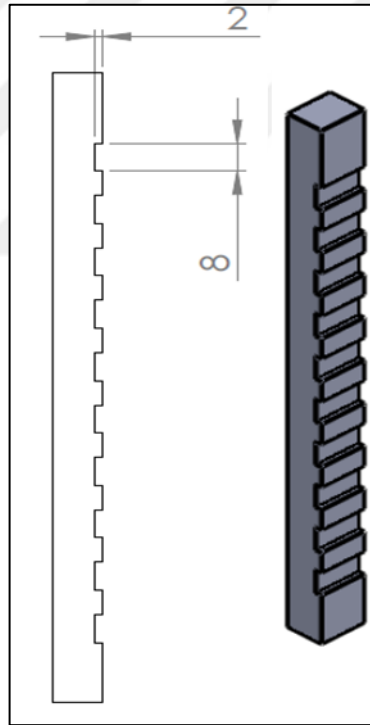
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.1. Deney malzemesi. (a) 3D görünümü, (b) 2D görünümü, (c) dairesel kesit 2D ve 3D görünümü, (d) dikdörtgen kesit 2D ve 3D görünümü.

5.2. HIZLI DELİK DELME TEZGÂHI

Bu tezgahlar endüstriyel alanlarda ve kalıpcılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. CNC tezgahlarında delinmesi zor hatta mümkün olmadığı

durumlarda bu tezgahlar kullanılmaktadır. Yüksek hızda, erozyonla talaş kaldırma işlemi ile delme gerçekleşir. Hızlı delik delme cihazları, delik delmenin aşırı zor, hızlı ve hassasiyet gereken durumlarda ve kalınlığı fazla olan malzemelere delik delmek için kullanılır. Bu yöntemde delik çapı 0.03 mm ila 6.5 mm arasında delme işlemi yapılabilir. Bu tezgahlar sayesinde, kalınlığı 700 mm kadar malzemelere çok hızlı bir şekilde delik açılması mümkündür. Hızlı delik delme cihazı kullanılarak deney malzemesinde delik açılmış ve tel erozyon tezgahında işlenecek hale getirilmiştir. Deneylerin yapılmasında kullanılan hızlı delik delme tezgâhı “M-Tech H340” markadır. Bu tezgâha ait görsel Şekil 5.2’de teknik özellikler ise Çizelge 5.2 ‘de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Hızlı delik delme tezgâh özellikleri.

Ekipman/Değişken	Özellik/Değer
Elektrot Çapı (mm)	Ø 0.3-Ø 3.0
Spindle Çalışma Mesafesi, Z1 (mm)	260
Servo Çalışma Mesafesi, Z2 (mm)	400
Maksimum Spindle Hız Ayarı (mm)	320
Tel Döndürme Hızı (rpm)	150
İş Tablası Ölçüsü (mm)	320×440
Tabla Hareketi, X-Y (mm)	300×400
İş Tablası ile Kılavuz Arası Mesafe (mm)	400
İş Tablası Yüksekliği (mm)	920
Maksimum İş Akımı (A)	30
Maksimum Çıkış Gücü (W)	3.5
Güç (V/Hz)	380/50
İş Sıvısı Kapasitesi (L)	25
Çalışma Sıvısı Maks. Basınç (MPa)	7
Ölçüler, LxWxH (mm)	1060×750×1700
Ağırlık (kg)	600



Şekil 5.2. Hızlı delik delme cihazı.

5.3. TEL EROZYON TEZGÂHI VE ÖZELLİKLERİ

Deneylerin yapılmasında kullanılan tel erozyon tezgâhı “Charmille Robofil 290” markadır. Bu teknik özellikler ise Çizelge 5.3 ‘de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Tel erozyon tezgâhı özellikleri.

Ekipman/Değişken	Özellik/Değer
Marka	Charmille Robofil 290
Tel Çapı	0,10- 0,30 mm
Programlanabilir tel sarma hızı	0,2 – 15 mm/dk
Telin programlanabilir çekme kuvveti	0 – 3 daN
Ana Elektronik Bağlantı:	380 v
Güç Tüketimi	10 KVA
Püskürtme	3 – 11.5 bar
Di-elektrik sıvı türü	Su

Deneyde kullanılan tel erozyon tezgahına ait gerçek görsel Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3. Deneyde kullanılan tel erozyon tezgâhı genel görüntüsü.

5.4. KOORDİNAT ÖLÇÜM CİHAZLARI:

İleri derecede güçlü metrolojik cihazlar olan Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM), bir parçanın fiziksel geometrik niteliklerini ölçmek amacıyla tasarlanmışlardır. Deneyde kullanılan CMM cihazına ait gerçek görsel Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4. Ölçüm tamlığı belirlenirken kullanılan CMM’in genel görüntüsü.

Çizelge 5.4'te deney numunesinin ölçümleri için kullanılan CMM'in teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. CMM cihazı teknik özellikleri.

Ekipman/Değişken	Özellik/Değer
Faydalı Stoklar	X=700, Y=1000, Z=660 mm
Hız	516 mm/s
İvme	1700 mm/s ²
Standart	ISO 10360-2 ve ISO 10360-4
MPEE	1,9 L / 300 µm. L [mm]
T	18-22°C; 2°C/24 hr.
MPEP	1,9 µm
Cetvel çözünürlüğü	0,039 µm

5.5 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜM CİHAZI:

Teknolojik gelişmeler gözlemlendiğinde son zamanlarda üretim yeni yolların keşfedildiği ve iyiye ulaşmanın amaçlandığı görülmüştür. Bilhassa uçak, otomotiv ve uzay sektöründe kalite gereksinimleri çok yüksek olmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bir malzemenin kalitesini tayin eden kriterler epey fazladır. Yüzey pürüzlülük ise bu kalite gereksinimlerinden sadece birisidir.

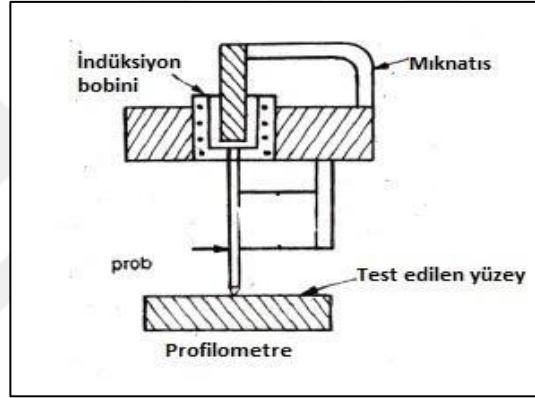
Yüzey pürüzlülük, makine parçalarının fonksiyonel yeteneklerini etkileyen bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, bir malzemenin kalitesini işaret eden ve iki parçanın birleşme yüzeyinde etken olan hassas kalite kriterlerinden biridir. Bir malzemenin yorulma kırılma dayanım ile korozyon dayanımı artmasının yanı sıra malzemenin estetik olarak güzel görünümüne kavuşması yüzey pürüzlülüğünün elverişli değerler arasında olması ile sağlanır. Talaşlı imalat yöntemi ile işlenen parçalarını en önemli çıktılardan birisi yüzey pürüzlülüğüdür.

Yapılan deney çalışmasında tel erozyon ile işleme sonrasında, numunelerin yüzey pürüzlülükleri standarda uygun olarak ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülük

değerleri, Surfcoorder SE1200 ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Her bir delik için, yüzey pürüzlülük değerleri Ra1, Ra2, Ra3 ve Ra4 olarak belirlenen 4 ayrı bölgeden ölçülmüştür. Daha sonra, her bölgenin ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak deliğin ortalama yüzey pürüzlülük değeri hesaplanmıştır. Bu şekilde yapılan ölçümler, numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

5.5.1 Profilometre

Profilometre cihazının şematik gösterimi Şekil 5.5 'da gösterilmektedir. Profilometre indüksiyon bobini, mıknatıs ve prob gibi parçalarından oluşmaktadır.



Şekil 5.5. Profilometrenin şematik gösterimi.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için deneysel çalışmada kullanılan cihazın marka/modeli Surfcoorder SE1200'dür. Bu cihaza ait görsel Şekil 5.6'de teknik özellikler ise Çizelge 5.5'de verilmiştir. SE1200 kızıksız ölçüm, dahili yüksek çözünürlüklü yazıcı, 9 ölçüm koşulu için hafıza, 2 standart çapraz analiz fonksiyonu ile karakterize edilen, taşınabilir, yüksek performanslı bir yüzey pürüzlülüğü ve dalga ölçüm cihazıdır.



Şekil 5.6. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Bu cihaza ait teknik özellikler ise Çizelge 5.5 'da verilmiştir.

Çizelge 5.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı özellikleri.

Ekipman/Değişken	Özellik/Değer
Parametreler	53 parametre, Ra, Ry, Rz vb.
Ölçüm aralığı / çözünürlük	Z: 520 μm / 0.008 μm
Maksimum ölçülen uzunluk	X: 25 mm
Büyütme ölçümü	Z: 50 to 100,000 or Auto X: 1 to 1,000
Alıcı	Tam duruşlu, değiştirilebilir prob ucu Standart prob ucu: R5 μm
Güç kaynağı	Şarj edilebilir pil / AC adaptör

5.6. SERTLİK ÖLÇÜM CİHAZI

Sertlik ölçümü için kullanılan cihazın marka/modeli Bulut Makina BMS 3000 'dir.

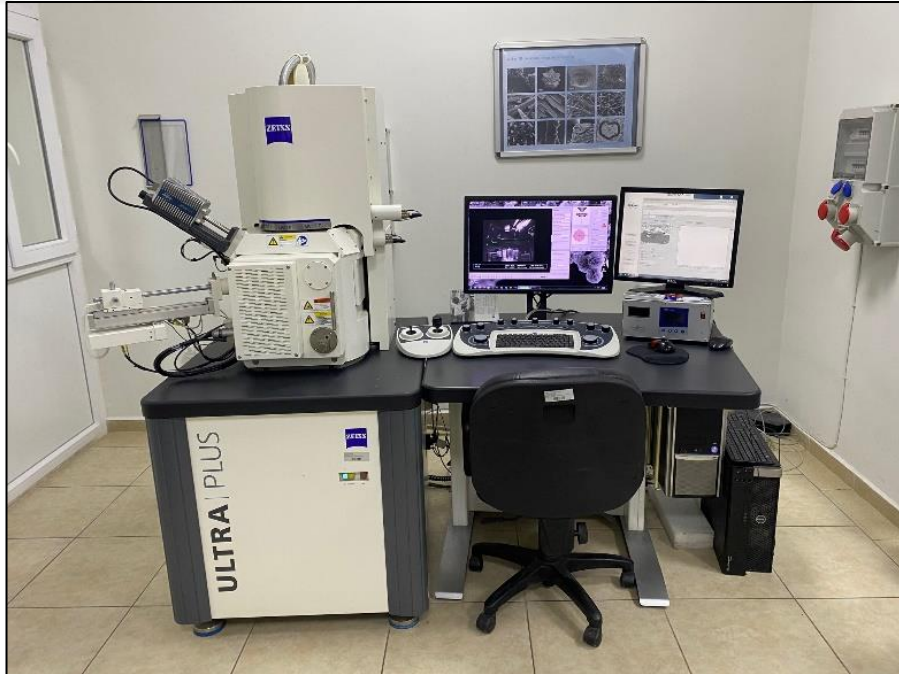
Bu cihaza ait teknik özellikler Çizelge 5.6'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.6. Sertlik ölçüm cihazı teknik özellikleri.

Ekipman/Değişken	Özellik/Değer
Kullanılan metot	Brinell Metodu
Ön yükleme	750 N
Kullanılan uç	2,5 mm Karbür Bilya
Üretim Yılı	2017
Güç	220 V/ 50 HZ

5.7 MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ

Tel erozyon ile işleme yapılan deneylerden sonra, oluşan yüzeylerin mikro yapılarının görüntülenmesi için Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) kullanılmıştır. Oluşan yüzeylerin görüntüleri, SEM cihazında elde edilmiştir ve Şekil 5.7'de sunulmuştur.

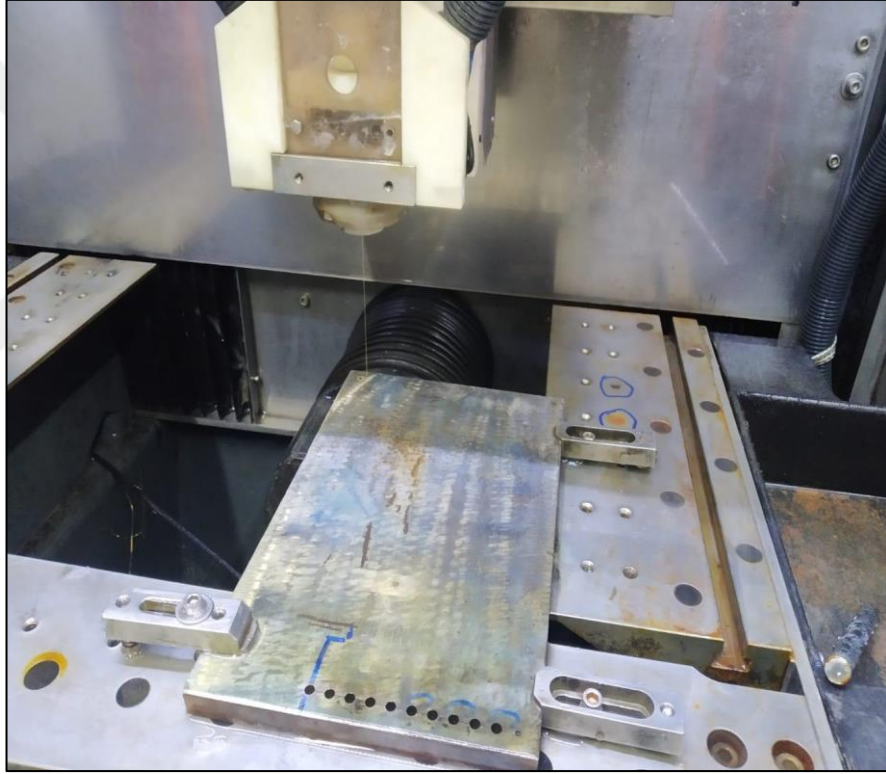


Şekil 5.7. Sem cihazı genel görüntüsü.

5.8. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ

Numune malzemeye ön delik delme sonrasında tel erozyon tezgahında 10 adet 5mm çapında dairesel şekil ve 10 adet 4*8mm ölçülerinde dikdörtgen form işlenmiştir. İşlenen parçaların CMM’de ölçümleri yapılmıştır. Numunenin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü için kesiti alınmıştır. Elde edilen kesit numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri profilometre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları not edilmiştir.

Şekil 5.8’da tel erozyon tezgâhın da dikdörtgen form elde edilirken çekilmiş görsel yer almaktadır.



Şekil 5.8. Dikdörtgen formların tel erozyon tezgahında işlenme esnasında çekilmiş görüntüsü.

Tel erozyon tezgahında oluşturulan formların ölçümü Şekil 5.9’da verilen “Global Dea” markasına ait cihaz ile yapılmıştır.



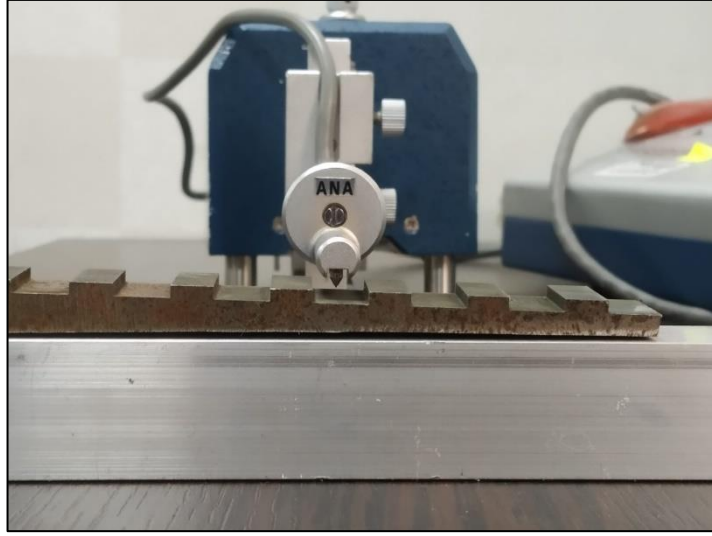
Şekil 5.9. Dikdörtgen kesitin ölçüm tamlığının CMM’de incelenmesi.

İşleme sonrası kesiti alınan parçanın yüzey pürüzlülüğünün ölçümü için hazır hale gelmiş görüntüsü Şekil 5.10’de verilmiştir.



Şekil 5.10. Yüzey pürüzlülüğünü ölçümü için kesit alınan parçanın görseli.

Yüzey pürüzlülük cihazında deney parçasının Ra değerleri Şekil 5.11’de gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 5.11. Yüzey pürüzlülük cihazında kesit numunenin ölçümü.

5.8.1 Deney Parametreleri

Literatür araştırmalarına göre belirlenen deney parametreleri Çizelge 5.7’de verilmiştir. Tel erozyon işleme sürecinde değişken parametreler olarak FF ve INJ kullanılmıştır. Deneyler tel gerginliği, tel hızı, tel cinsi (pirinç) ve tel çapı (0,25 mm) sabit tutularak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.7. Tel erozyon tezgahının işleme parametreleri.

Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	Tel Hızı (mm/dk)	Tel gerginliği (N)
1	60	3	4.0	1.05
2	70	3	4.0	1.05
3	80	3	4.0	1.05
4	90	3	4.0	1.05
5	100	3	4.0	1.05
6	60	4	4.0	1.05
7	70	4	4.0	1.05
8	80	4	4.0	1.05
9	90	4	4.0	1.05
10	100	4	4.0	1.05

Tel erozyon tezgahında işleme parametreleri gibi çeşitli bilgilere ulaşıldığı ekran Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Tel erozyon tezgahında parametrelerin görüldüğü ekran.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

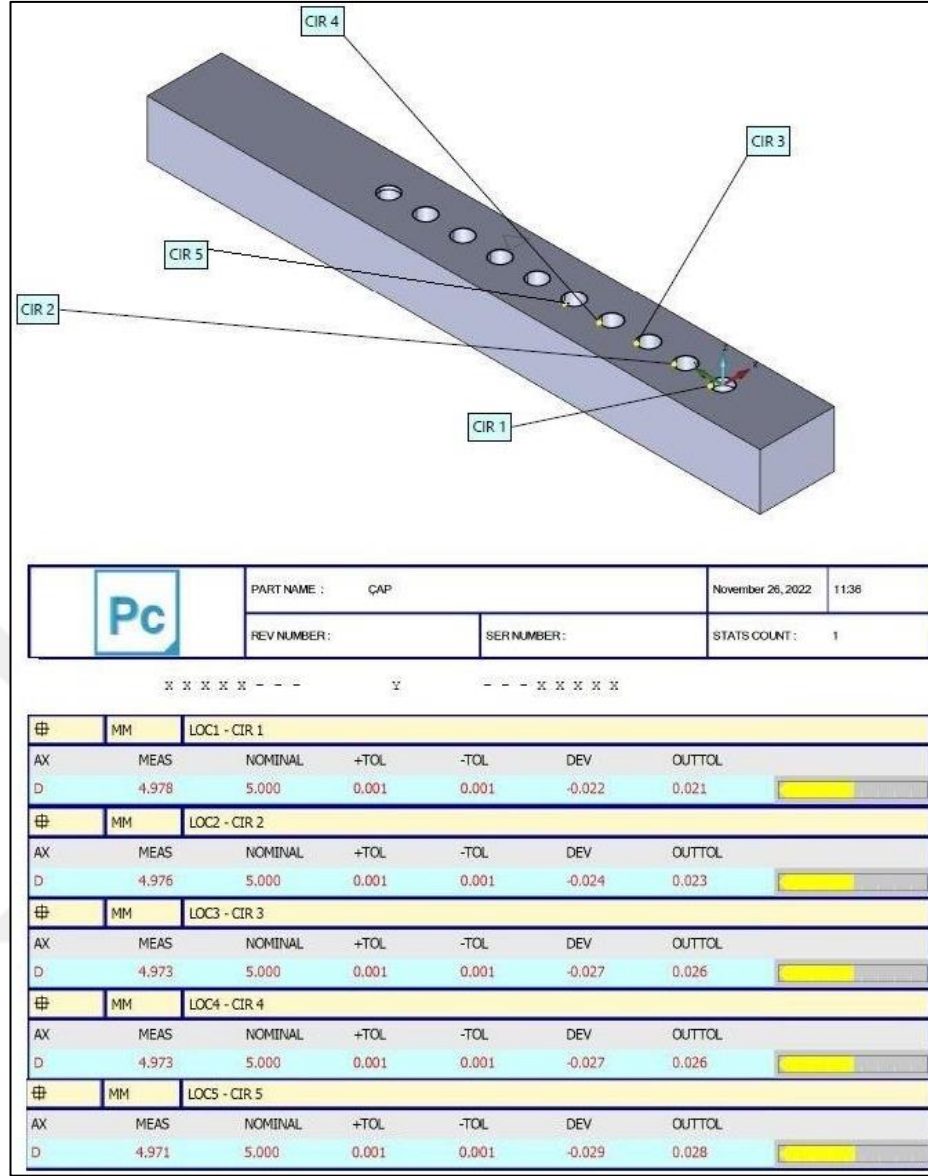
Tez çalışmasında tel erozyon tezgahında değişken işleme parametrelerinin ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle Hardox 500 malzemesi üzerinde dikdörtgen ve dairesel formlar açılmış ve bu formlar üzerinde ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler ile ölçüm tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan deney parametrelerinin deney numuneleri üzerindeki etkileri SEM görüntüleri ile incelenmiş ve malzemenin yüzey kalitesine ait sonuçlar değerlendirilmiştir. Malzemenin işlenmiş yüzeylerinde oluşan sertlik değerleri ölçülmüş ve çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

6.1 BOYUT ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Deneyde işlenen formların ölçüm değerleri CMM kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm değerleri grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır.

Ölçüm raporları incelendiğinde INJ değerinin 3 bar olduğu, FF değerinin değiştirildiği durumda delik çaplarındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. FF değerinin 100 A olduğu durumda ölçüm sonucunun nominal değere en yakın olan değeri elde edildiği görülmüştür

CMM’de Daire 1, Daire 2, Daire 3, Daire 4 ve Daire 5 için ölçüm raporları Şekil 6.1’de yer almaktadır.



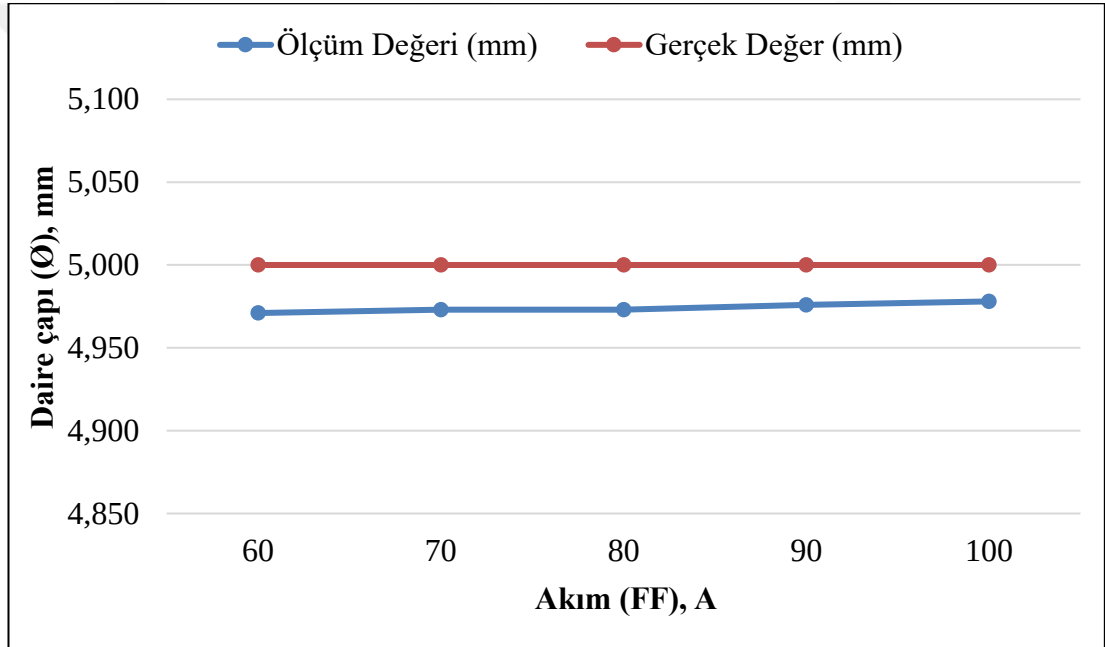
Şekil 6.1. 3 Bar sıvı basıncında dairesel numunelerin değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.

Çizelge 6.1’de parçanın üzerinde oluşturulan dairesel formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir. En az sapmanın olduğu ölçümün FF değerinin 100 A olduğu durum olarak gözlenmiştir.

Çizelge 6.1. Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değer (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Daire 5	60	4,971	5	-0,58
Daire 4	70	4,973	5	-0,54
Daire 3	80	4,973	5	-0,54
Daire 2	90	4,976	5	-0,48
Daire 1	100	4,978	5	-0,44

Şekil 6.2’de FF parametresinin değiştirildiği ve INJ 3 bar alındığı durumda daire çap ölçümlerinin değişimi ve nominal değeri gösteren grafik yer almaktadır.

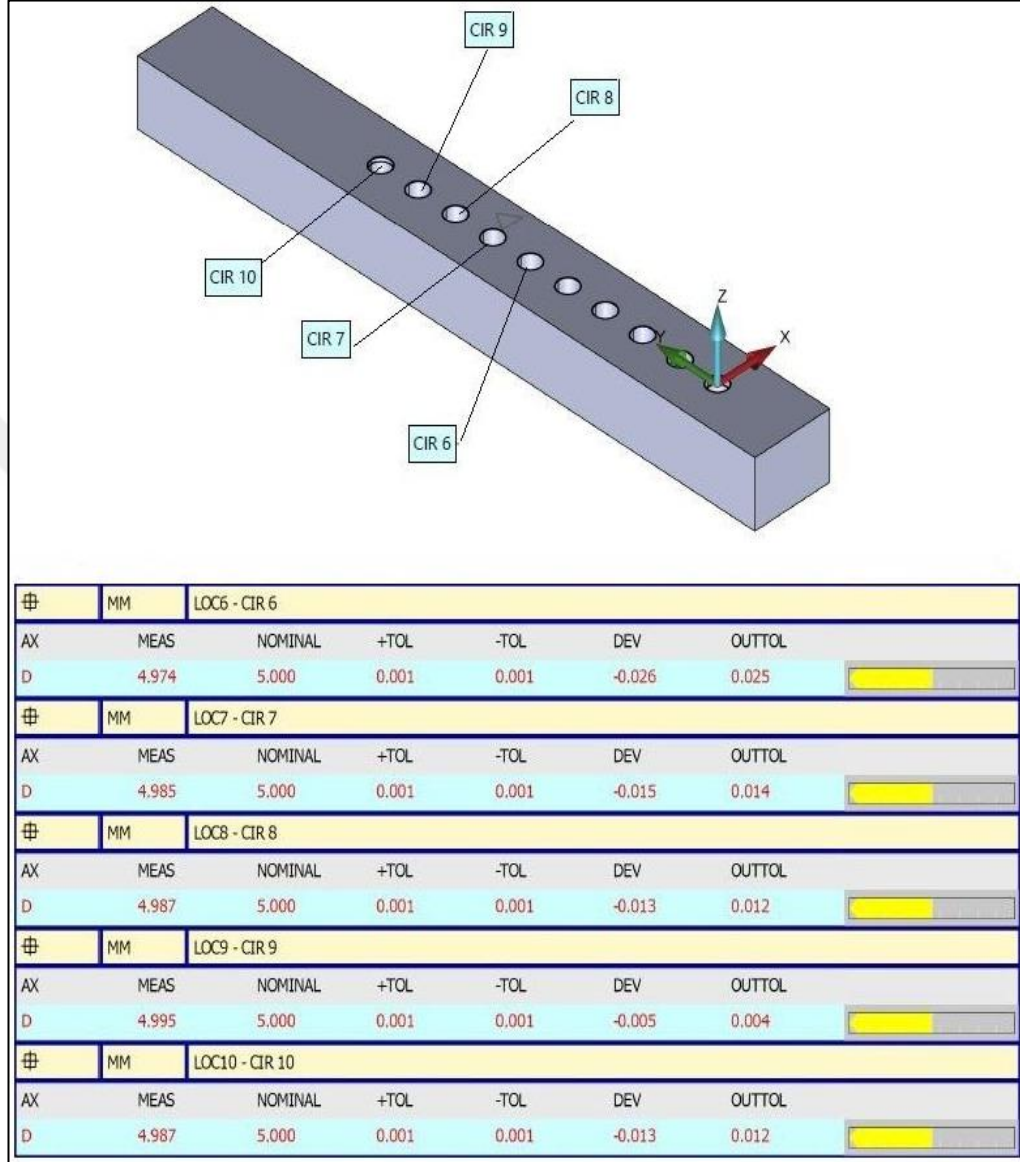


Şekil 6.2. 3 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.

Daire 6, Daire 7, Daire 8, Daire 9 ve Daire 10 için ölçüm raporlarında INJ değerinin 4 bar alındığı ve FF değerinin değiştirildiği durumda delik çaplarının değişimi gözlemlenmiştir. FF değerinin 70 A olduğu durumda ölçüm sonucumuzun nominal değere en yakın değeri elde ettiğimiz görülmüştür.

INJ değerlerini kıyasladığımızda ise çok belirgin bir farklılık olmamasına rağmen 4 bar olan değer 3 bar olan değere göre gerçeğe daha yakın ölçüm sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.

CMM’de Daire 6, Daire 7, Daire 8, Daire 9 ve Daire 10 için ölçüm raporları Şekil 6.3’de yer almaktadır.



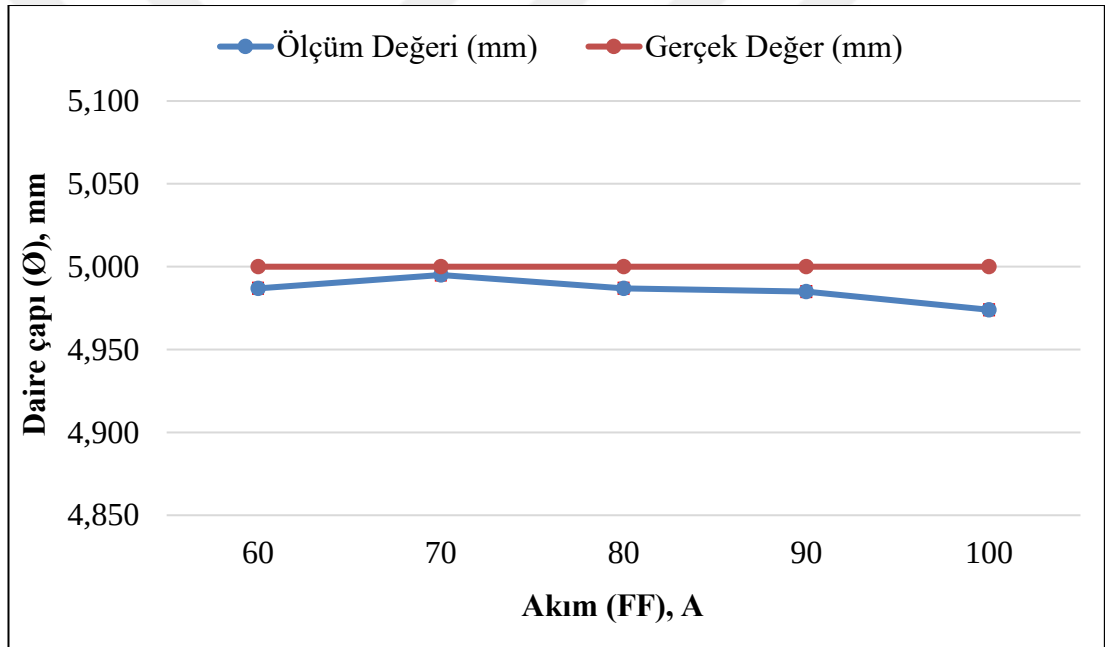
Şekil 6.3. 4 Bar sıvı basıncında işlenen dairesel formların değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.

Çizelge 6.2’de dairesel formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir. En az sapma FF değerinin 70 A olduğu durumda gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.2. Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

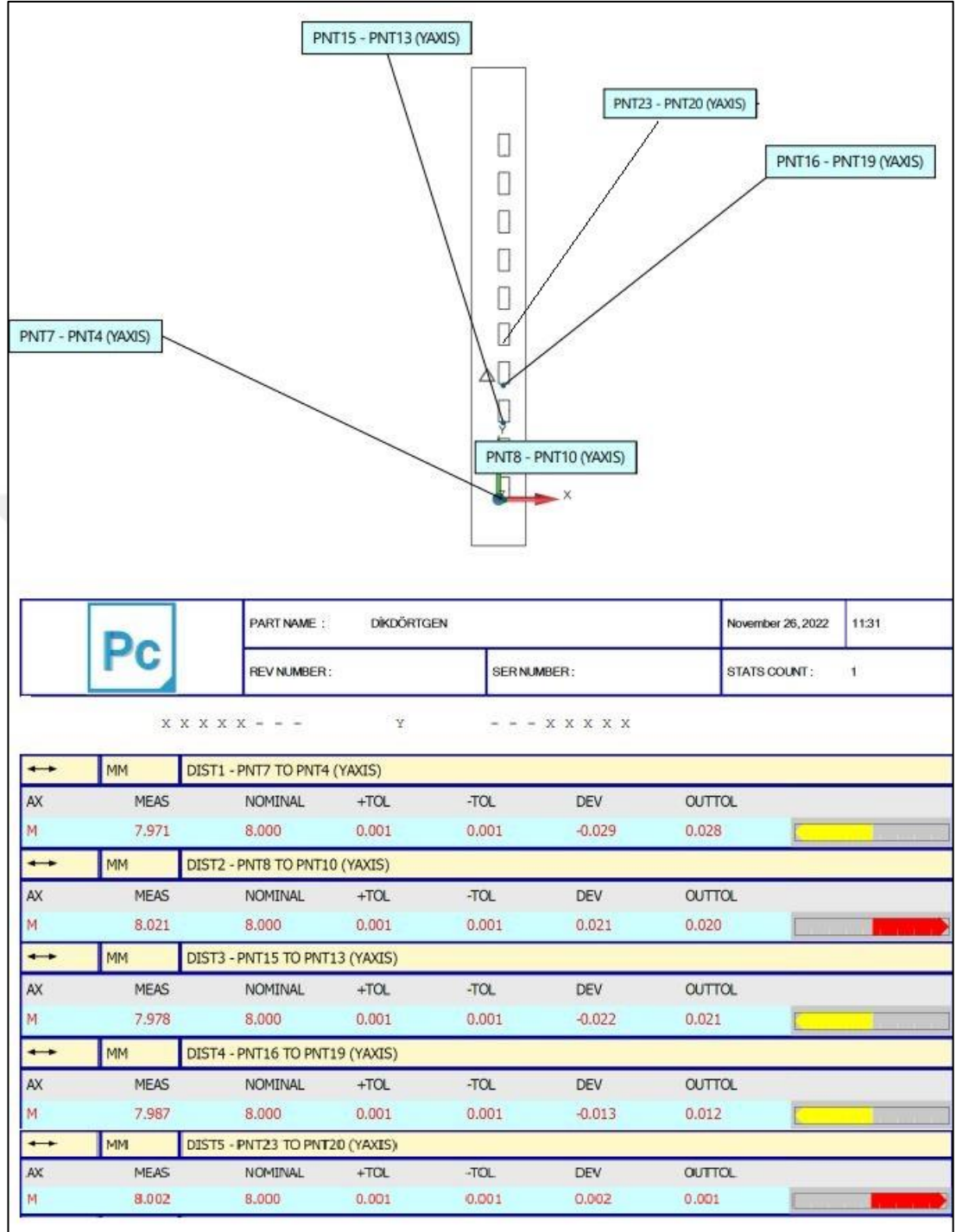
Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değer (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Daire 10	60	4,987	5	-0,26
Daire 9	70	4,995	5	-0,1
Daire 8	80	4,987	5	-0,26
Daire 7	90	4,985	5	-0,3
Daire 6	100	4,974	5	-0,52

Şekil 6.4'te FF parametresinin değiştirildiği durumda daire çaplarının ölçüm değerlerini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 6.4. 4 Bar sıvı basıncında dairesel formların akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.

Daire formların ölçümü yapıldıktan sonra dikdörtgen formun 8 mm'lik kenar ölçüsü incelenmiş ve ölçüm raporları Şekil 6.5'te verilmiştir. INJ değerinin 3 bar alındığı durumda FF değeri değiştirilerek gözlem yapılmıştır. Yapılan gözlem sonucunda ölçüm değerinin nominal değere yaklaştığı görülmüştür. En iyi ölçüm sonucunun FF değerinin 60 A olduğu değerde olduğu gözlemlenmiştir.



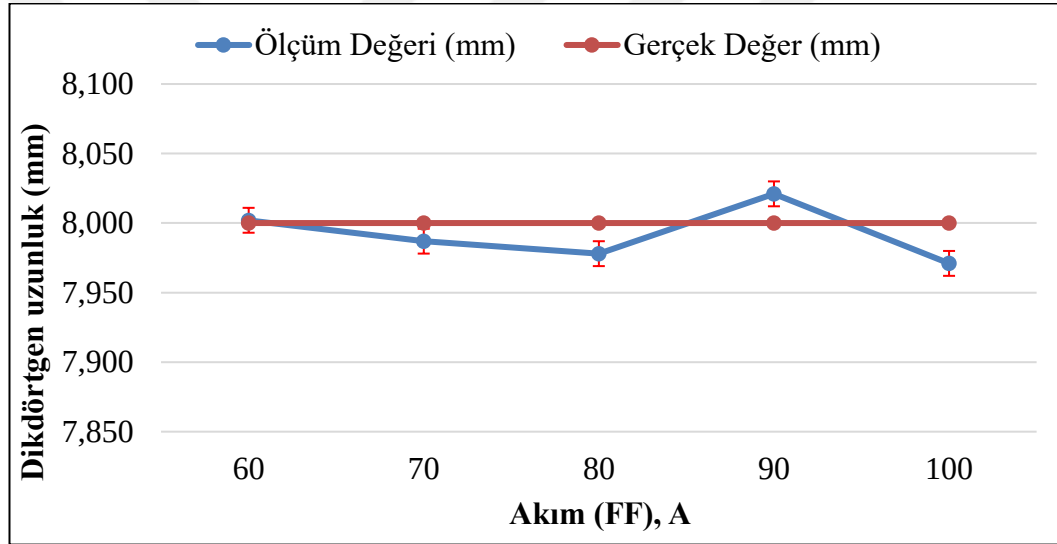
Şekil 6.5. 3 Bar sıvı basıncında işlenen dikdörtgen formların uzun kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlik değerleri.

Çizelge 6.3'te parçanın üzerinde oluşturulan dikdörtgen formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir.

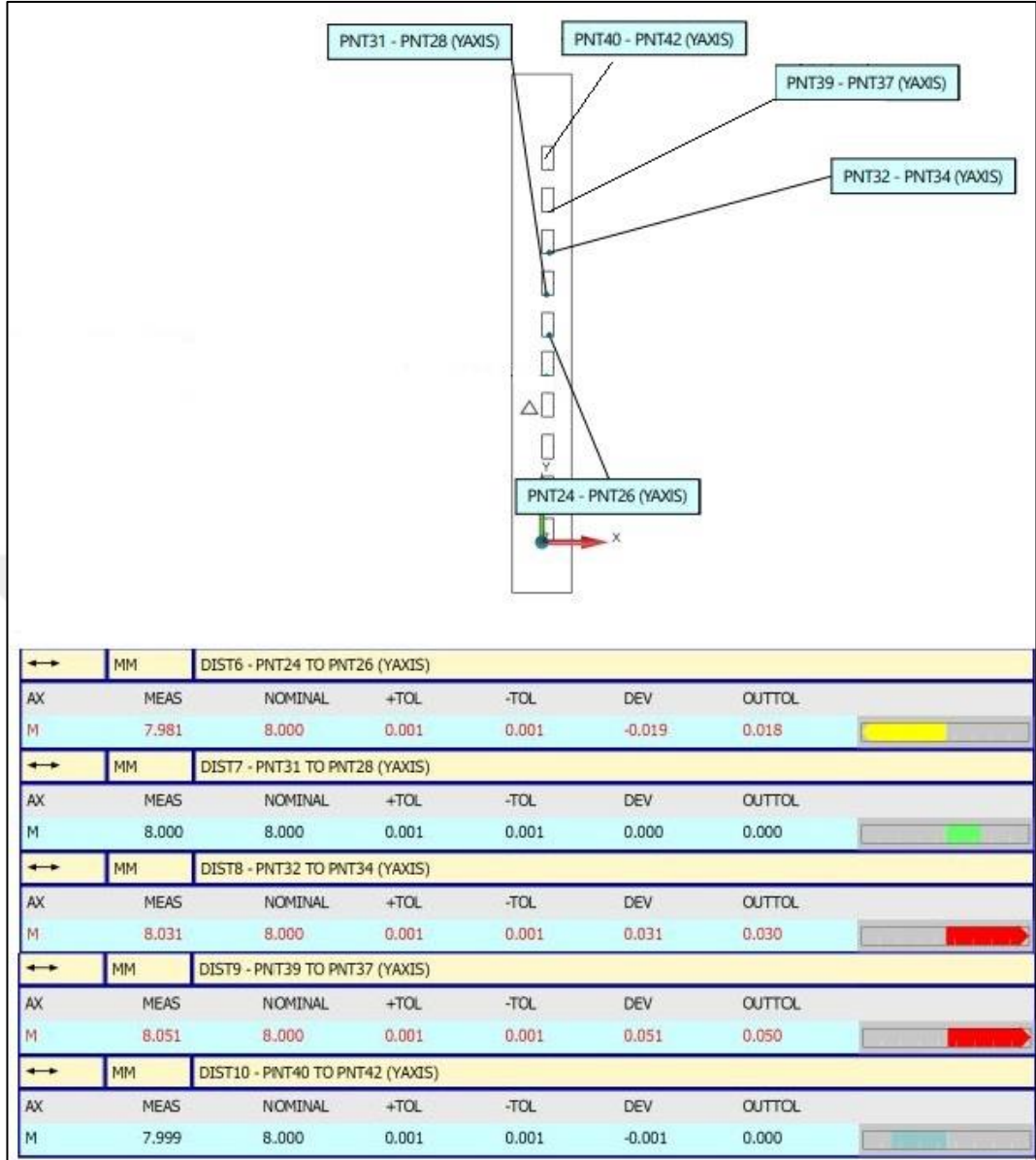
Çizelge 6.3. Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değer (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Dikdörtgen 5	60	8,002	8	+0,03
Dikdörtgen 4	70	7,987	8	-0,16
Dikdörtgen 3	80	7,978	8	-0,28
Dikdörtgen 2	90	8,021	8	+0,26
Dikdörtgen 1	100	7,971	8	-0,36

Şekil 6.6'da FF değerinin değiştirildiği ve INJ değerinin 3 bar alındığı dikdörtgen formun nominal değerinin 8 mm olduğu durumda deney sonrası ölçülen değerleri gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 6.6. 3 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların uzun kenarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.



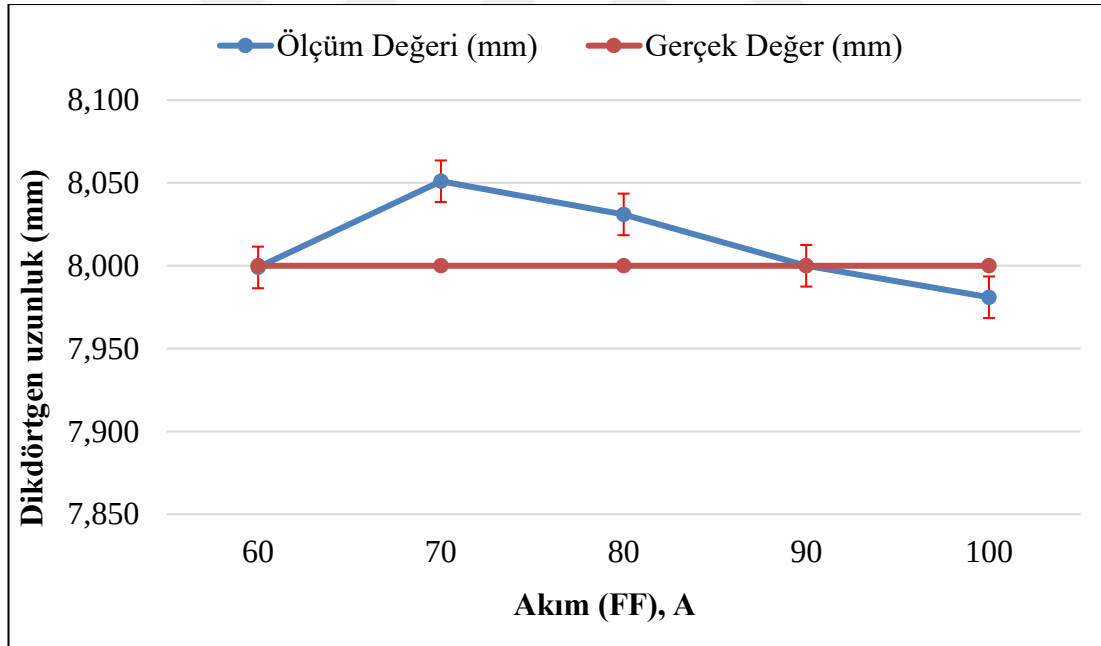
Şekil 6.7. 4 Bar basınç kullanılarak işlenen dikdörtgen formların uzun kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.

Çizelge 6.4’te parçanın üzerinde oluşturulan dikdörtgen formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 6.4. Ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değeri (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Dikdörtgen 10	60	7,999	8	-0,01
Dikdörtgen 9	70	8,051	8	+0,64
Dikdörtgen 8	80	8,031	8	+0,39
Dikdörtgen 7	90	8	8	0
Dikdörtgen 6	100	7,981	8	-0,24

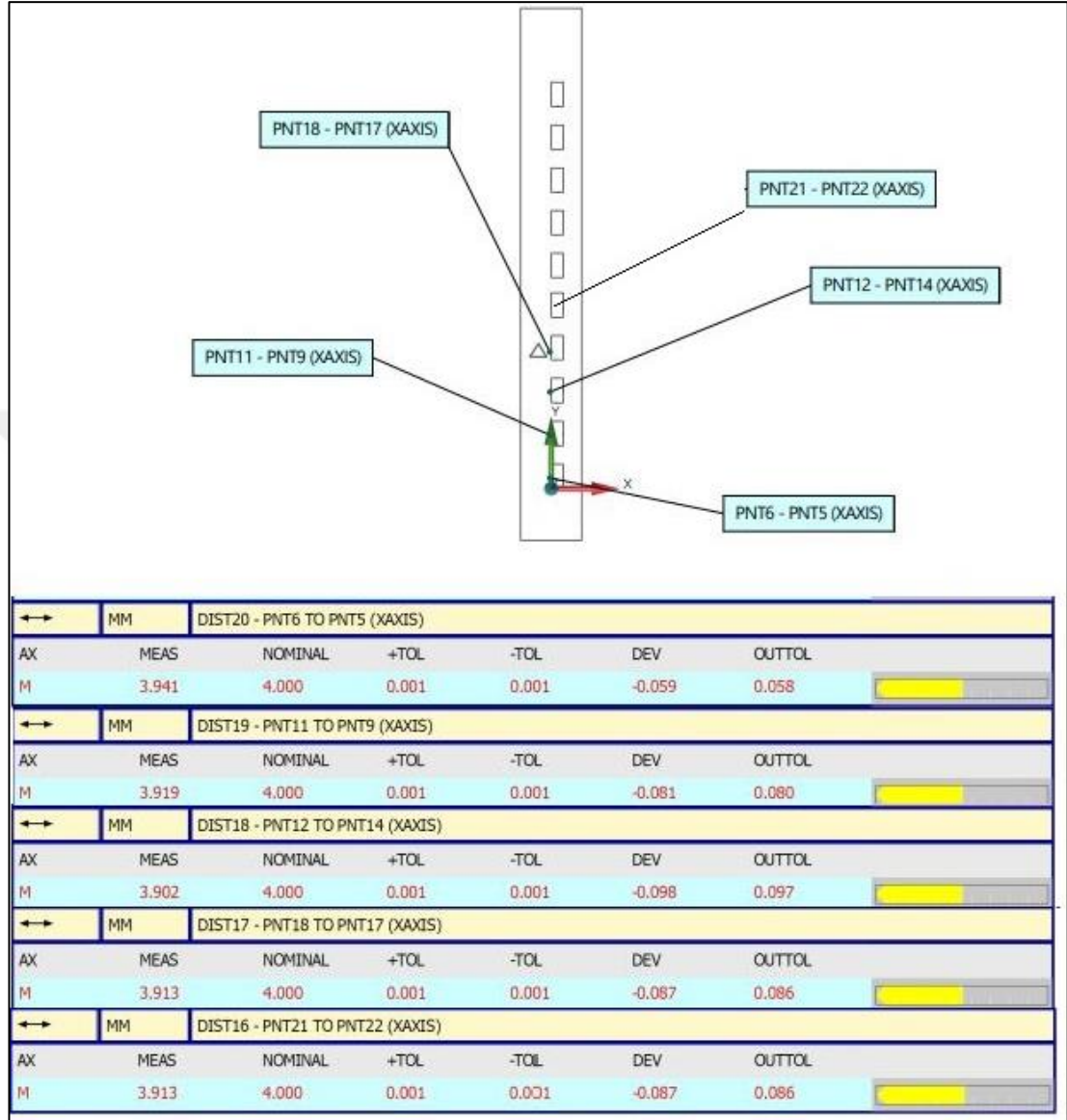
Şekil 6.8’de FF değerinin değiştirildiği ve INJ değerinin 4 bar alındığı dikdörtgen formun nominal değerinin 8 mm olduğu durumda deney sonrası ölçülen değerleri gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 6.8. 4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların uzun kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.

Dikdörtgen formumuzun 4 mm’lik kenar ölçüsü incelenmiştir. Parametrelerimizden INJ değerinin 3 bar alındığı durumda FF değeri azaltılarak gözlem yapılmıştır. Yapılan gözlem sonucunda ölçüm değerimizin nominal değerden uzaklaştığı görülmüştür. En

iyi ölçüm sonucu FF değerinin 100 A olduğu değerde karşımıza çıktığı gözlemlenmiştir.



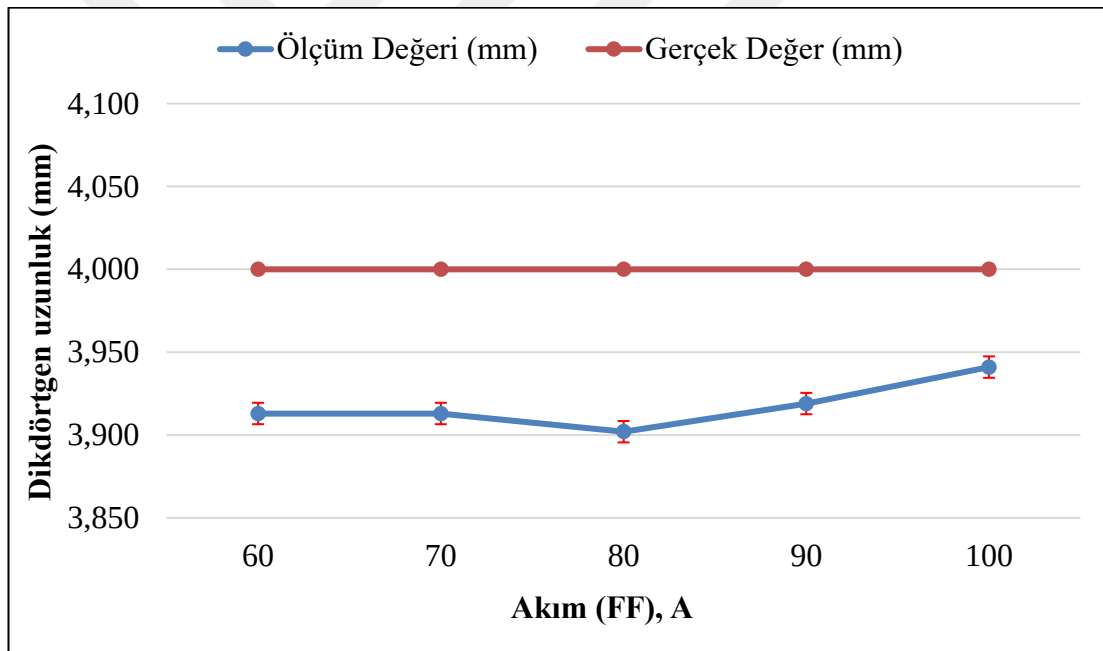
Şekil 6.9. 3 Bar basınç kullanılarak işlenen dikdörtgen formların kısa kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.

Çizelge 6.5’te parçanın üzerinde oluşturulan dikdörtgen formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 6.5. 4 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişmesi sonucu oluşan ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

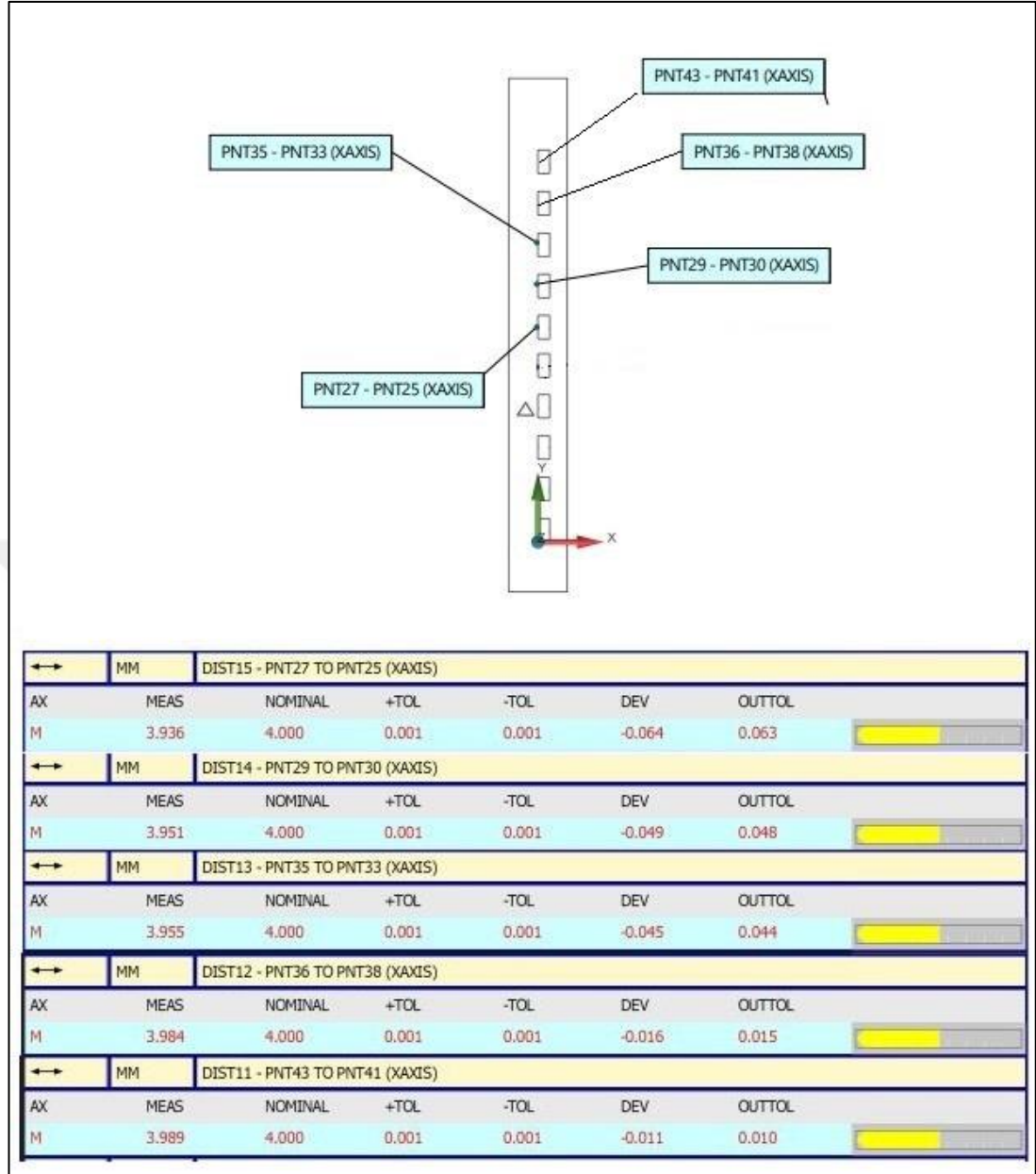
Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değer (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Dikdörtgen 5	60	3,913	4	-2,18
Dikdörtgen 4	70	3,913	4	-2,18
Dikdörtgen 3	80	3,902	4	-2,45
Dikdörtgen 2	90	3,919	4	-2,03
Dikdörtgen 1	100	3,941	4	-1,48

Şekil 6.10'da FF değerinin değiştirildiği ve INJ değerinin 3 bar alındığı dikdörtgen formun nominal değerinin 4 mm olduğu durumda deney sonrası ölçülen değerleri gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 6.10. 3 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların kısa kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.

Dikdörtgen formumuzun 4 mm'lik kenar ölçüsünü incelenmeye devam edilmiş ve bu kez INJ değeri 4 bar alındığında FF değerinin düştüğü durumlar gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda ölçüm değerinin nominal değere yaklaştığı görülmüştür. Ölçünün nominal değere en yakın olduğu FF değeri 60 A'dır.



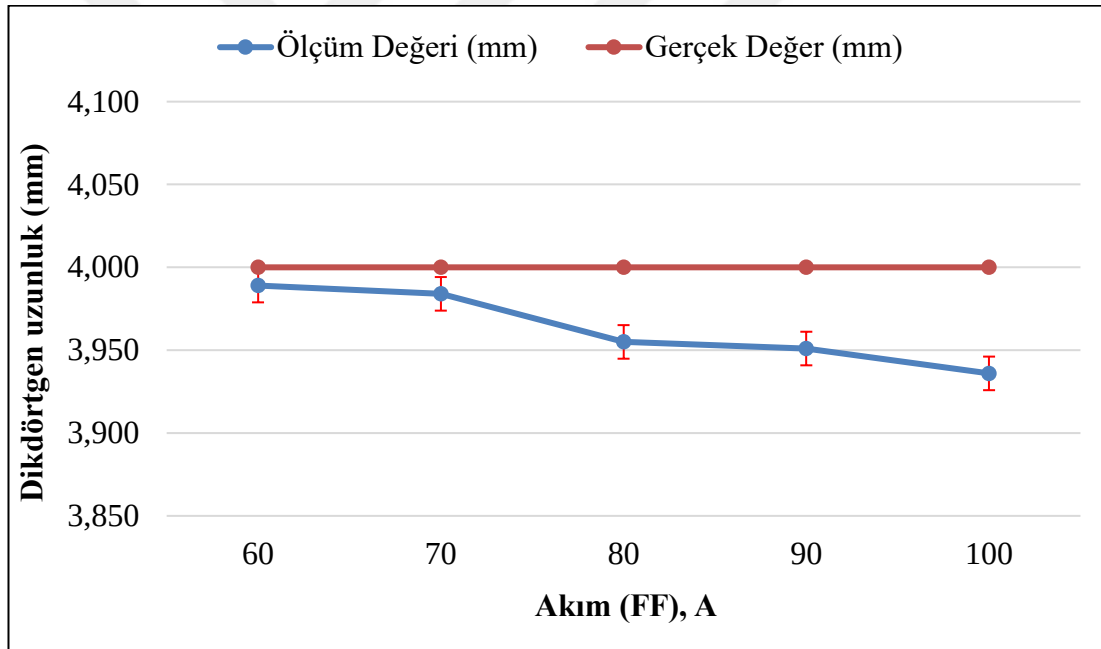
Şekil 6.11. 4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen formların kısa kenarının değişen akım parametrelerine göre ölçü tamlık değerleri.

Çizelge 6.6’da parçanın üzerinde oluşturulan dikdörtgen formların ölçümleri ve yüzde sapma oranları verilmiştir.

Çizelge 6.6. 4 Bar sıvı basıncında akım değerlerinin değişmesi sonucu oluşan ölçüm değerleri ile gerçek değerler karşılaştırma tablosu.

Şekil No	FF (A)	Ölçüm Değeri (mm)	Gerçek Değer (mm)	Yüzde Sapma Oranı (%)
Dikdörtgen 10	60	3,989	4	-0,28
Dikdörtgen 9	70	3,984	4	-0,4
Dikdörtgen 8	80	3,955	4	-1,13
Dikdörtgen 7	90	3,951	4	-1,23
Dikdörtgen 6	100	3,936	4	-1,6

Şekil 6.12’de FF değerinin değiştirildiği ve INJ değerinin 4 bar alındığı dikdörtgen formun nominal değerinin 4 mm olduğu durumda deney sonrası ölçülen değerleri gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 6.12. 4 Bar sıvı basıncında dikdörtgen numunenin kısa kenarlarının akım değerlerinin değişimi sonucu elde edilen ölçüm değerleri ile gerçek değerlerinin gösterimi.

Dikdörtgen ve daire formların işlenmesinde tüm ölçüm raporları incelendikten sonra daire form için en iyi işleme parametreleri olarak FF değerinin 70 A, INJ değerinin 4 bar olduğu gözlemlenmiştir.

Dikdörtgen formun 8 mm’lik kenarı için en iyi işleme parametresi FF 90 A ile INJ 4 bar olduğu, 4 mm’lik kenar için en iyi işleme parametre değerleri FF 60 A ile INJ 4 bar olduğu gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde çıkan sonuçlar arasındaki en yüksek sapma oranı %2,45 olduğu bulunmuştur. Sonuçlarda ortaya çıkan bu sapmanın tel erozyon ile işlemede çok hassas ölçümler yapıldığı ve deney esnasında ufak bir deney koşulunun bile farklı olmasına dayandırılabilir. Sonuç olarak ölçü tamlığı üzerinde sıvı basıncının ve akımın dikkate değer bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir.

6.2 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Gerçekleştirilen deneyde değişen işleme parametreleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir. Bu deneyde en az 5 yerden ölçüm yapılmış ve aritmetik ortalaması alınan yüzey pürüzlülük değerleri tabloya işlenmiştir.

Çizelge 6.7. Tel erozyon işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülük değerleri.

Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	WS (mm/dk)	WB (N)	Dairesel Form Ra Değeri	Dikdörtgen Form Ra Değeri
1	60	3	4.0	1.05	1,709	2,252
2	70	3	4.0	1.05	2,289	2,446
3	80	3	4.0	1.05	2,315	2,764
4	90	3	4.0	1.05	2,493	2,909
5	100	3	4.0	1.05	2,954	3,089
6	60	4	4.0	1.05	1,671	2,151
7	70	4	4.0	1.05	2,265	2,381
8	80	4	4.0	1.05	2,304	2,449
9	90	4	4.0	1.05	2,402	2,634
10	100	4	4.0	1.05	2,822	2,916

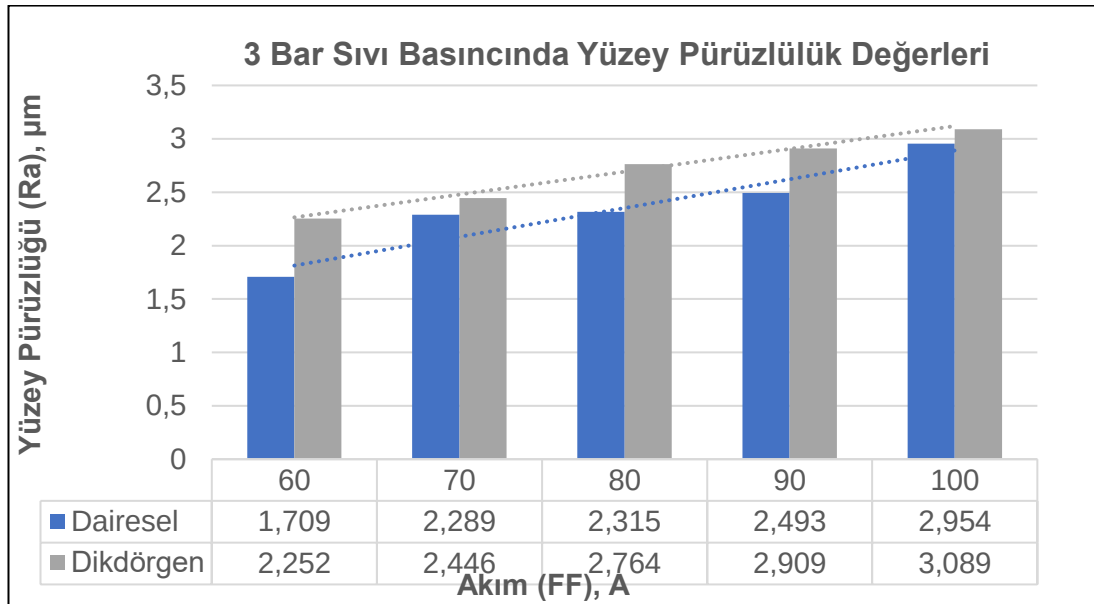
Çizelge 6.8 ‘de sıvı basıncı (3 Bar), tel hızı (4 mm/dk), tel gerginliği (1.05 N) gibi parametrelerin sabit olarak alındığı durumda, FF değerindeki değişimlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi verilmiştir. FF değerinin düştüğü durumlarda yüzeylerde iyileşme görülmektedir. Akımın azalmasıyla, daha küçük boşalım yoğunluğu ve daha

güçsüz kıvılcımlar oluşmaktadır. Bu durumda yüzeyde meydana gelen kraterlerin çapı ve derinliği azalmaktadır [15].

Dairesel form ve dikdörtgen formlu şekillerin işlendiği parçaların aynı işleme parametrelerinde yapılan deneylerde yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde tüm numunelerde dairese formlu numunelerin yüzey kalitesi daha iyi çıkmıştır. Dairesel kesitli numuneler, telin temas ettiği noktanın sürekli değişmesi nedeniyle daha düzgün bir kesit oluşturur ve genellikle daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Dikdörtgen kesitli numunelerin ise, keskin köşeleri nedeniyle daha yüksek bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Zeng ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada dairese kesitlerin daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduklarını göstermişlerdir.

Çizelge 6.8. 3 bar sıvı basıncında yüzey pürüzlülük değerleri.

Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	WS (mm/dk)	WB (N)	Dairesel Form Ra Değeri	Dikdörtgen Form Ra Değeri
1	60	3	4.0	1.05	1,709	2,252
2	70	3	4.0	1.05	2,289	2,446
3	80	3	4.0	1.05	2,315	2,764
4	90	3	4.0	1.05	2,493	2,909
5	100	3	4.0	1.05	2,954	3,089

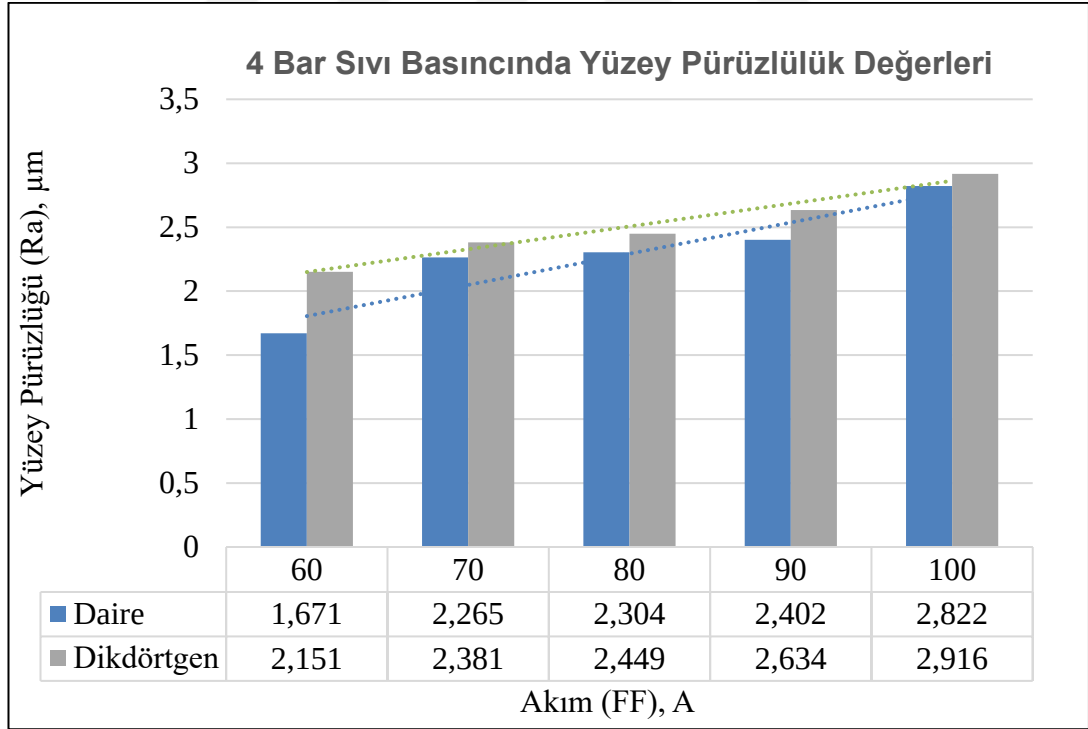


Şekil 6.13. 3 bar sıvı basıncında yüzey kalitesinin ölçüm sonuçları.

Çizelge 6.9 ‘da su basıncı (4 bar), tel hızı (4 mm/dk), tel gerginliği (1.05 N) gibi parametrelerin sabit olarak alındığı durumda, FF değerindeki değişimlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi verilmiştir. Şekil 6.14 ‘de bu durum grafik üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. 4 bar sıvı basıncında yüzey pürüzlülük değerleri.

Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	WS (mm/dk)	WB (N)	Dairesel Form Ra Değeri	Dikdörtgen Form Ra Değeri
1	60	4	4.0	1.05	1,671	2,151
2	70	4	4.0	1.05	2,265	2,381
3	80	4	4.0	1.05	2,304	2,449
4	90	4	4.0	1.05	2,402	2,634
5	100	4	4.0	1.05	2,822	2,916



Şekil 6.14. Yüzey kalitesinin 4 bar sıvı basıncındaki ölçüm sonuçları.

Çizelge 6.10 ‘da FF değerinin 100 A, tel hızı 4 mm/dk, tel gerginliği 1.05 N parametrelerinin sabit olarak alındığı durumda, sıvı basıncı değerindeki değişimlerin yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.10. FF değerinin 100 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değerleri.

Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	WS (mm/dk)	WB (N)	Dairesel Form Ra Değeri	Dikdörtgen Form Ra Değeri
1	100	3	4	1.05	2,954	3,089
2	100	4	4	1.05	2,822	2,916

Çizelge 6.11 ‘de FF değerinin (60 A), tel hızı (4 mm/dk), tel gerginliği (1.05 N) parametrelerinin sabit olarak alındığı durumda, sıvı basıncı değerindeki değişimlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi verilmiştir.

Çizelge 6.11. FF değerinin 60 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değerleri.

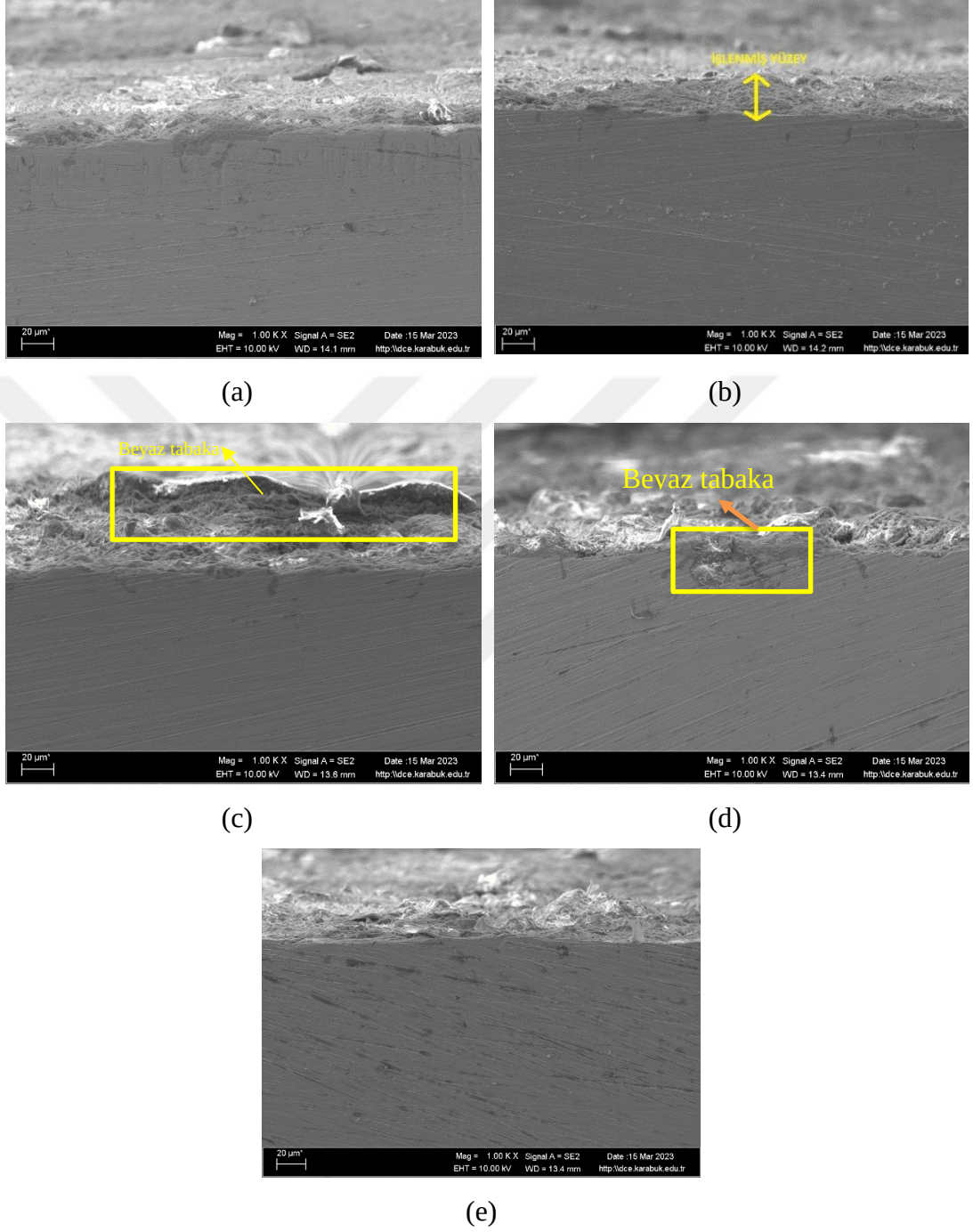
Sıra No	FF (A)	INJ (Bar)	WS (mm/dk)	WB (N)	Dairesel Form Ra Değeri	Dikdörtgen Form Ra Değeri
1	60	3	4	1.05	1,709	2,252
2	60	4	4	1.05	1,671	2,151

Yapılan çalışmalarda, tel erozyon işlemi sırasında sıvı sirkülasyon basıncının artırılmasının tüm numunelerde yüzey kalitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Artan sıvı basıncı, dielektrik sıvının iş parçası ve tel elektrotun soğutulmasını sağlamasının yanı sıra, iş parçasından kopan parçacıkların ara bölgeden hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını ve kesme işleminin kararlılığını da arttırmaktadır. Bu sayede ergiyik metalin yüzeyde katılaşp yapışmasını önlemekte ve sonuç olarak yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlenmektedir [15].

6.3 SEM GÖRÜNTÜLEME İLE MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

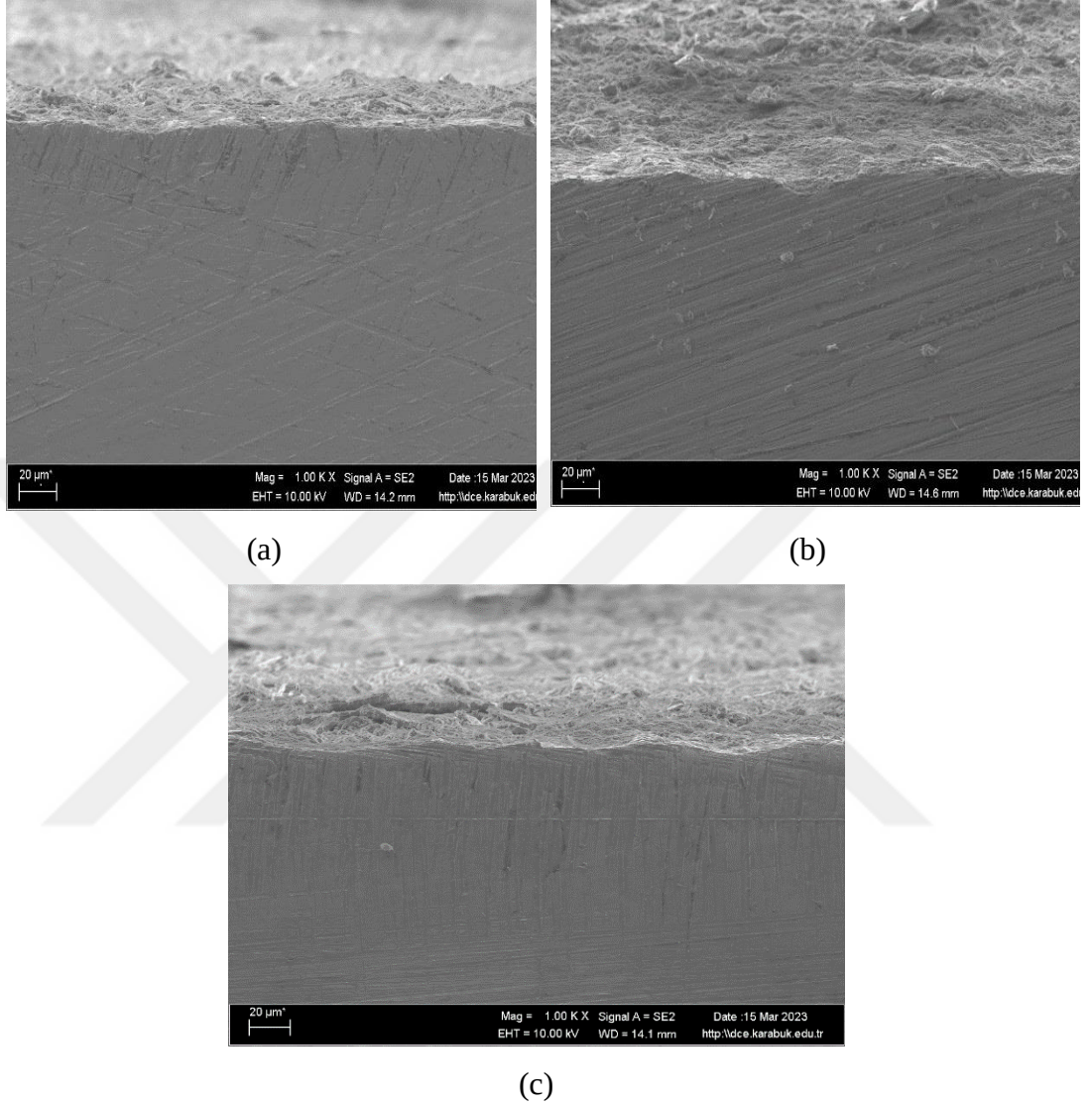
Bu çalışma, tel erozyon tezgahında gerçekleştirilen işlemler sonrası mikro yapı görüntüleri ve yapı içerisindeki gözeneklerin varlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Numunede farklı FF ve INJ kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerle sonrası elde edilen yüzeylerin mikro yapıları, SEM görüntüleme cihazı ile incelenmiştir.

Şekil 6.15'de yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzeylere ait SEM görüntüleri sunulmaktadır.



Şekil 6.15. 3 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası kesitlerin 1000x büyütme SEM görüntüleri. (a) 60 A akım değerinde (b) 70 A akım değerinde (c) 80 A akım değerinde (d) 90 A akım değerinde (e) 100 A akım değerinde görüntüleri.

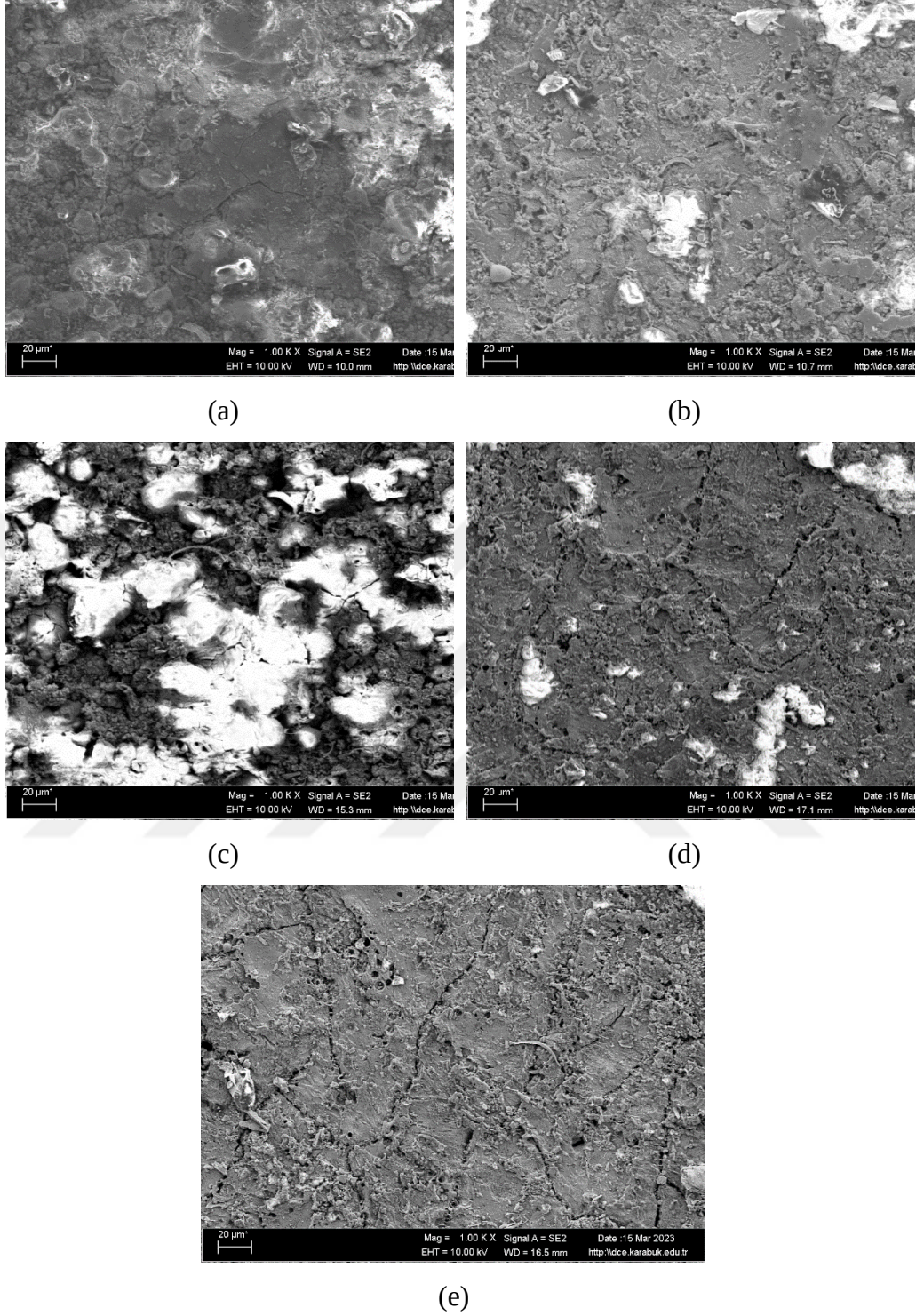
4 bar sıvı basıncında kesitlerin 1000x büyütülmüş şekilde gösterimi Şekil 6.16’te verilmiştir.



Şekil 6.16. 4 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası kesitlerin 1000x büyütülmeli SEM görüntüleri.(a) 80 A akım değerinde (b) 90 A akım değerinde (c) 100 A akım değerinde görüntüleri.

Yapılan deneysel çalışmalarda SEM görüntüleri incelendiğinde beyaz tabaka kesit görüntülerde tam olarak görülmemekte ancak yüzeye ait SEM görüntülerinde belli olmaktadır.

Aşağıda yer alan Şekil 6.17’de değişen FF parametrelerinde 3 bar sıvı basıncında yüzeylerde oluşan SEM görüntüleri verilmiştir.

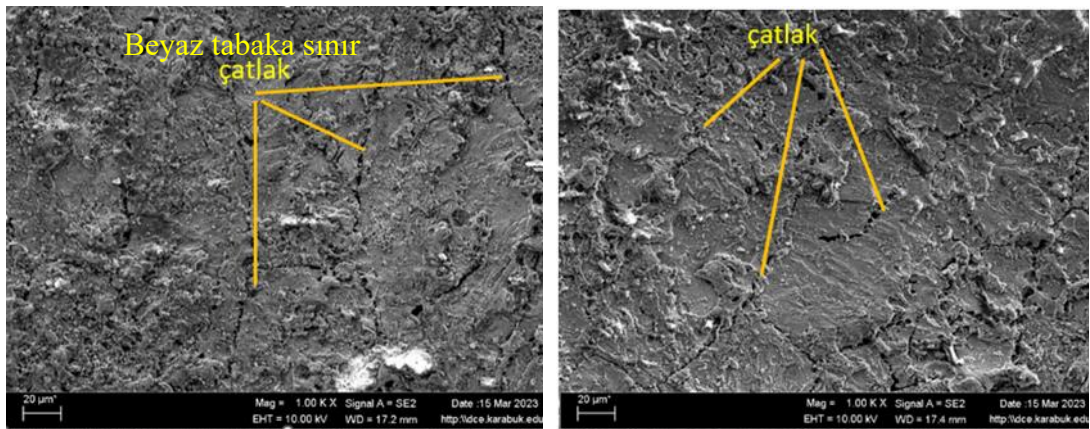


Şekil 6.17. 3 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası yüzeylerin 1000x büyütmeli SEM görüntüleri. (a) 60 A akım değerinde (b) 70 A akım değerinde (c) 80 A akım değerinde (d) 90 A akım değerinde (e) 100 A akım değerinde görüntüleri.

Mikroskop incelemeleri yüksek sıcaklıklara maruz kalan ve ergiyik durumdan hızla soğuyarak oluşan temperlenmemiş martenzitik bir tabaka olan "Beyaz Tabaka"

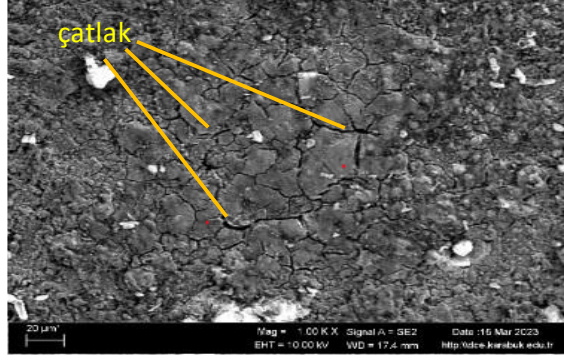
gösterimine imkân sağlamaktadır. Bu tabaka, çoğunlukla işlenen malzemenin yüzeyindeki kararlı bir oksit tabakasıdır ve yüzeyin kimyasal bileşiminde bir değişiklik oluşturmaz [35]. Bu tabaka, özellikle yüksek akım yoğunluğu ve düşük voltaj uygulandığında daha belirgin hale gelir. Beyaz tabaka, işlenen malzemenin yüzey kalitesini etkileyebilir. Kalın bir tabaka, yüzey pürüzlülüğünü artırmak da bu nedenle yüzey kalitesini düşürmektedir. Bunun yanı sıra, uygun bir sıvı kullanımı ve sıvı sirkülasyonunun sağlanması beyaz tabakanın oluşumunu azaltabilir [36].

Şekil 6.15 'de 3 bar sıvı basıncında yüzeylerden alınan (1000x büyütme) SEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde düzensiz katman yapışmalarının olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak gerilmelerden dolayı beyaz tabaka oluşumu görülmüş ve iç bükey bir katman oluşumu tespit edilmiştir. 100 A FF değerinde oluşan çatlakların genişliği ve sayısının, 60 A FF değerinde oluşan çatlaklardan daha geniş ve fazla olduğu gözlemlenmiştir. FF değerinin artmasıyla çatlak genişliklerinin ve çatlak sayısının arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak akımın deney numunesini erime noktasını aşan bir sıcaklığa ulaştırması ve bu aşırı ısınma sonucu olarak eriyen malzemenin buharlaşması, buharlaşma gazının çıkış deliğinden patlaması gösterilebilir. Ayrıca amperin artması ile kesilen bölgede ısıya maruz kalma süresinin artması çatlak oluşumunu artırmakta ve beyaz tabaka çatlak sınırı küçülmektedir. Bu sonuçlar, FF değerinin çatlak genişliği ve sayısı üzerindeki belirleyici etkisine işaret etmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 6.18'de değişen FF parametrelerinde 4 bar sıvı basıncında yüzeylerde oluşan SEM görüntüleri verilmiştir.



(a)

(b)

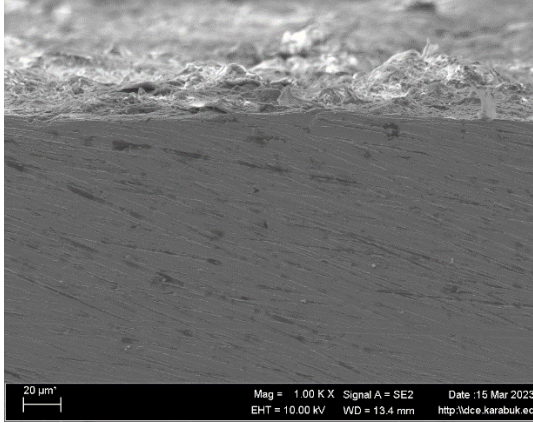


(c)

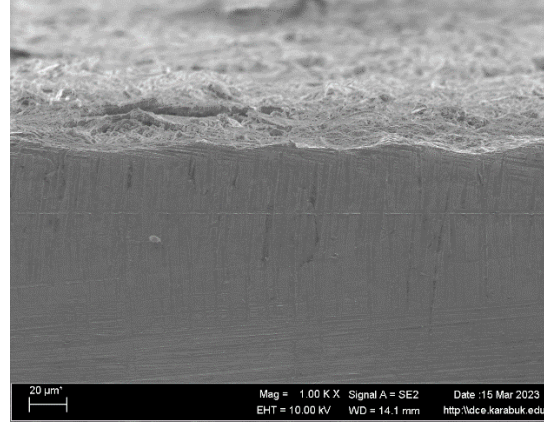
Şekil 6.18. 4 Bar sıvı basıncında akım değişimi sonrası yüzeylerin 1000x büyütme SEM görüntüleri.(a) 80 A akım değerinde (b) 90 A akım değerinde (c) 100 A akım değerinde görüntüleri.

Şekil 6.18 incelenmeye devam edildiğinde FF değerinin artmasına bağlı olarak çatlak oluşumu ve krater yoğunluğu artmaya devam etmiştir.

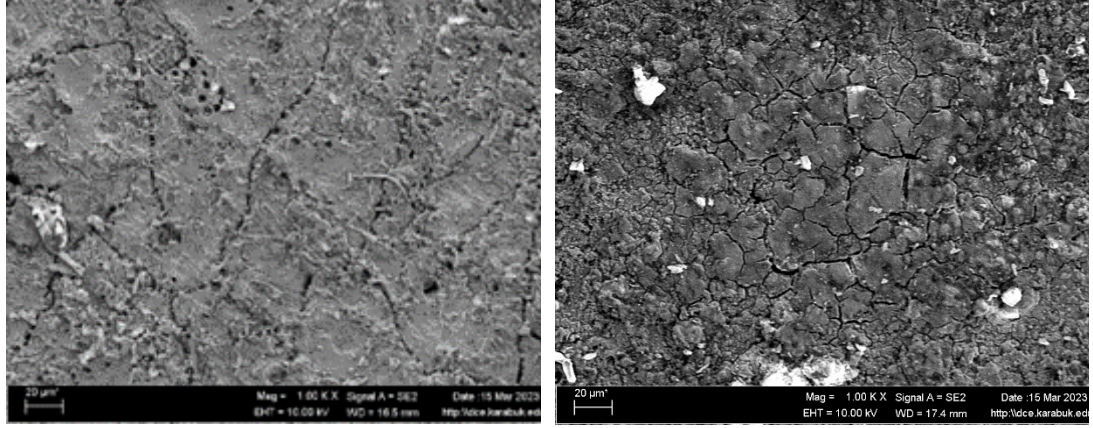
FF değerinin sabit olduğu sıvı basıncının ise değişiklik gösterdiği durumlar Şekil 6.19’da incelenmiştir.



(a) 100 A



(b) 100 A



(c) 100 A

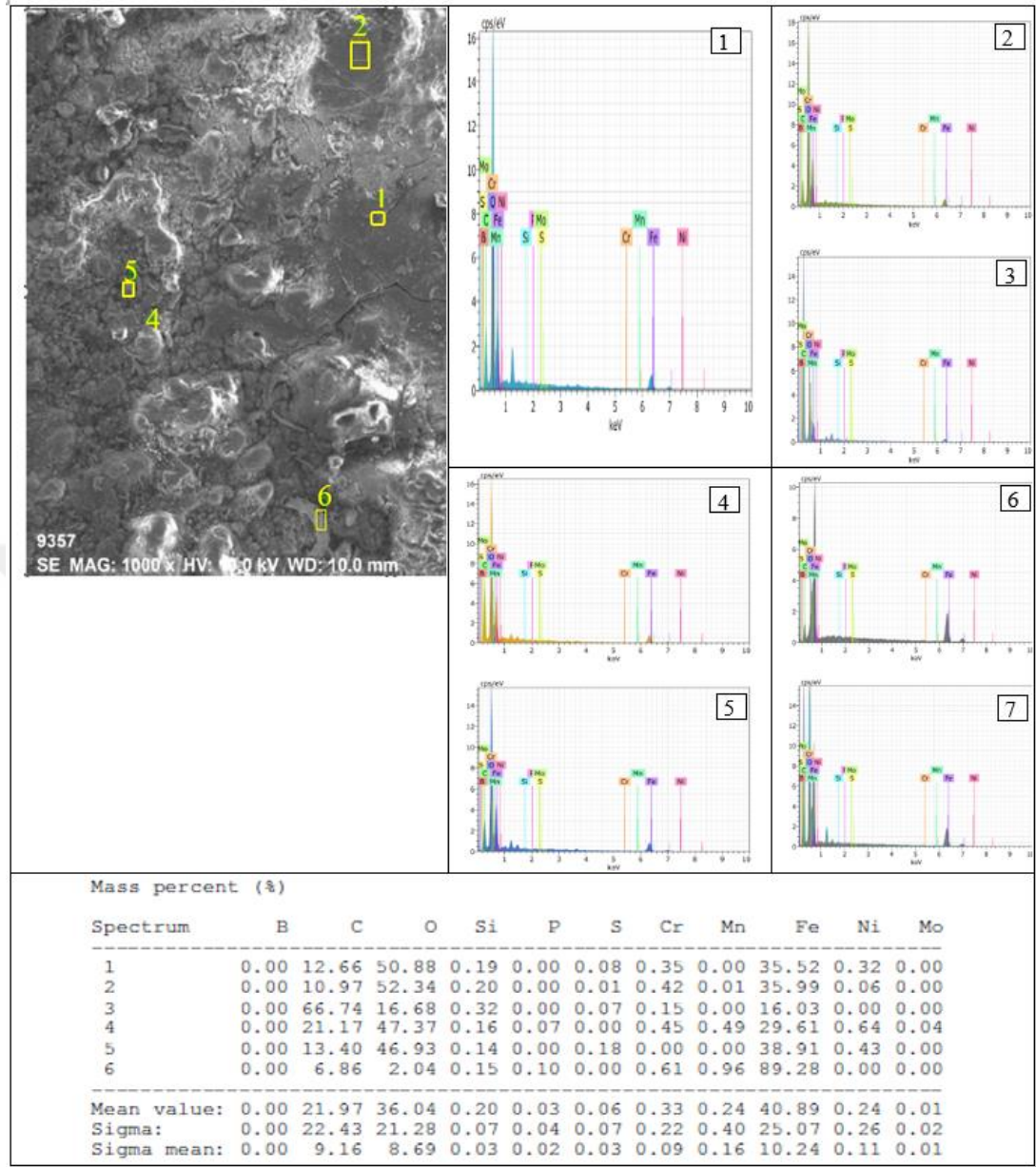
(d) 100 A

Şekil 6.19. 100 A akım değerinde sıvı basıncında değişimi sonrası 1000x büyütme SEM görüntüleri. (a) 3 bar sıvı basıncında kesit görünüm (b) 4 Bar sıvı basıncında kesit görünüm (c) 3 bar sıvı basıncında yüzey görünümü (d) 4 bar sıvı basıncında yüzey görünümü.

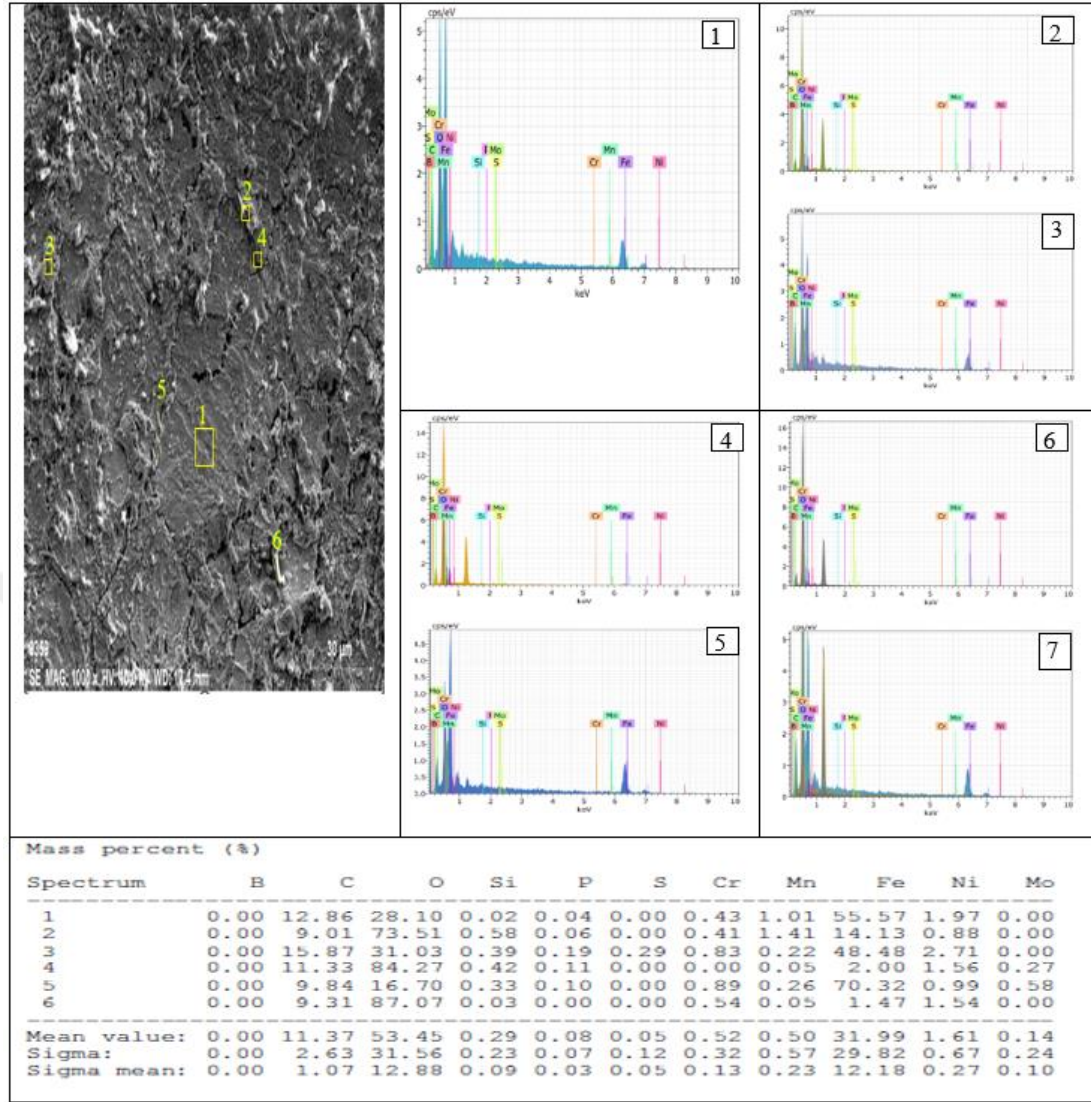
Sıvı basıncı, çatlak genişliği üzerindeki etkisi değişkenlik gösteren bir faktördür. Basın artması ile ısı altındaki yüzey tabakasının soğuma hızı artmaktadır ve bu durum çatlak oluşumunun miktarını artırmaktadır.

6.4. İŞLENMİŞ YÜZEYLERDE EDX ANALİZİ İLE ELEMENT TANIMLAMA

Yapılan deneyler neticesinde tel erozyonla ile işleme sonrası EDX analizi yapılmış ve deney numunelerine ait yüzeylerde oluşan elementsel farklılıklar veya değişimlerini ve yüzeyde var olan elementlerin tespit edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.20. 3 bar sıvı basıncı ve 60 A akım parametre değerinde gerçekleştirilen deney numunesinin EDX analizi.



Şekil 6.21. 4 bar sıvı basıncı ve 90 A akım parametre değerlerinde gerçekleştirilen deney numunesinin EDX analizi.

Deney numunelerinde yapılan EDX analizi sonuçlarına bakıldığında, numune de yer alan elementlerin varlığı tespit edilir. Bu elementlerin varlığı, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Demirin oksijene duyarlılığı fazladır. Deney numunesinin EDX analizine bakıldığında malzeme üzerinde gerçekleşen ani ısınma ve soğuma nedeniyle oksit tabakasının oluşumu gözlenmiştir.

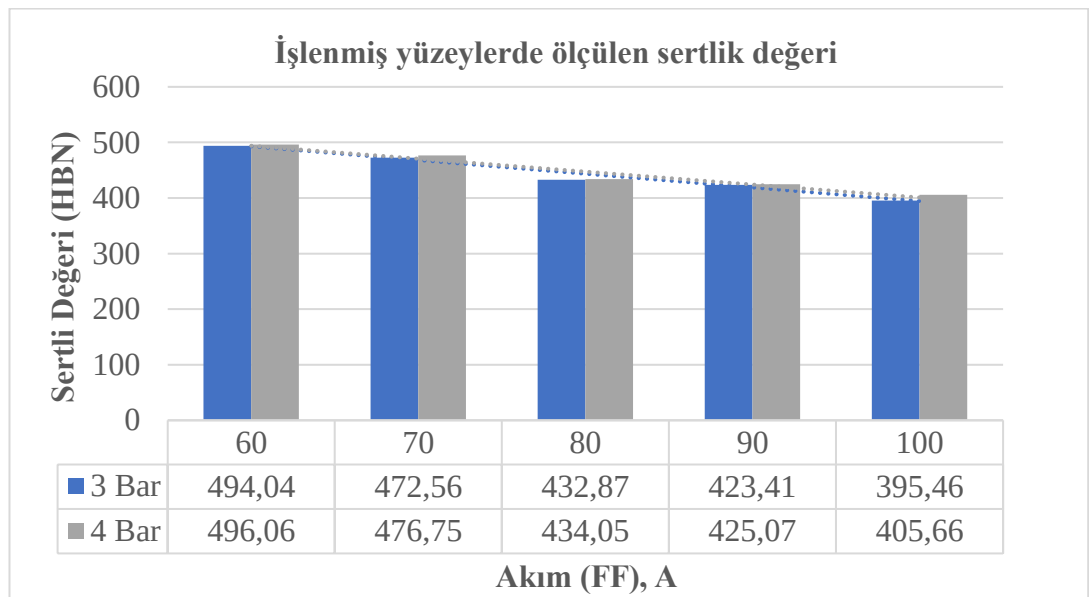
EDX analizi sonuçları, malzemenin üretimindeki kalite kontrolünü sağlamak ve belirli uygulamalara uygunluğunu belirlemek için kullanılabilir.

6.4 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Dikdörtgen formlu kesitin işlenmiş ve işlenmemiş yüzeylerinde sertlik değeri sonuçlarına bakılmıştır. Ölçüm sırasında 5 ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Çizelge 6.12 incelendiğinde FF değerinin artmasıyla sertlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Malzemenin işlenmemiş yüzeyinden 5 ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması 503,76 HBN çıkmıştır. Şekil 6.22 ‘de işlenmiş yüzeyin 3 Bar ve 4 Bar’da sertlik değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.12. Numune üzerinde alınan sertlik ölçüm değerleri.

Ölçüm No	INJ (Bar)	FF (A)	İşlenmiş Ölçüm Yüzeyi (HBN)
1	3	60	494,04
2	3	70	472,56
3	3	80	432,87
4	3	90	423,41
5	3	100	395,49
6	4	60	496,06
7	4	70	476,75
8	4	80	434,05
9	4	90	425,07
10	4	100	405,66



Şekil 6.22. İşlenmiş yüzeylerde ölçülen sertlik değerleri.

FF değerinin artması malzeme yüzeyinde daha fazla aşındırma ve erimeye neden olmuştur. Bu durum malzemenin sertliğinin azalmasına neden olduğu bilinmektedir [37].



BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Hardox 500 çeliğinin tel erozyon tezgahında kesilmesi sonrasında değişken işleme parametrelerine bağlı ölçü tamlığı, yüzey pürüzlülüğü, sertlik üzerindeki değişimler ile SEM görüntülerinin analizine ait aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar;

- FF değerinin artmasına bağlı yüzey kalitesi kötüleşmiştir. Dairesel form için INJ değerinin 3 bar, FF değerinin 60 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değeri 1,709 μm ölçülürken, FF değeri yüzde %66,6 kadar arttırılarak 100 Amper değerinde kesim gerçekleştiğinde yüzey pürüzlülüğü 2,958 μm değere yükselmiştir. Artış oranı %57 olarak hesaplanmıştır.
- Dikdörtgen form için INJ değerinin 3 bar olduğu durumda FF değerinin artmasına bağlı olarak yüzey kalitesi kötüleşmiştir. FF değerinin 60 A alındığı durumda yüzey pürüzlülük değeri 2,252 μm ölçülürken, FF değeri yüzde %66,6 kadar arttırılarak 100 A değerinde kesim gerçekleştiğinde yüzey pürüzlülüğü 3,089 μm değere yükselmiştir. Artış oranı %37,16 olarak hesaplanmıştır.
- Dairesel form için INJ değerinin 4 bar, FF değerinin 60 A olduğu durumda yüzey pürüzlülük değeri 1,671 μm ölçülürken, FF değeri yüzde %66,6 kadar arttırılarak 100 A değerinde kesim gerçekleştiğinde yüzey pürüzlülüğü 2,822 μm yükselmiştir. Artış oranı %68,8 olarak hesaplanmıştır.
- Dikdörtgen form için INJ 4 bar olduğu durumda FF değerinin artmasına bağlı yüzey kalitesi kötüleşmiştir. FF değerinin 60 A olarak yaptığımız deneyde yüzey pürüzlülük değeri 2,151 μm ölçülürken, FF değeri yüzde %66,6 kadar arttırılarak 100 A değerinde kesim gerçekleştiğinde yüzey pürüzlülüğü 2,916 μm değere yükselmiştir. Artış oranı %35,56 olarak hesaplanmıştır.
- Sıvı basıncı sonuçları incelendiğinde dairesel formlarda FF değerinin 100 A olduğu durumda INJ 3 bar iken yüzey pürüzlülüğü 2,954 μm , sıvı basıncı %33

arttırılarak 4 Bar olduğunda yüzey pürüzlülüğü 2,822 μm ölçülmüştür. Bu durumda yüzey pürüzlülük değeri %4,6 oranında azalmıştır.

- Dairesel formlarda FF değerinin 60 A olduğu durumda INJ 3 bar iken yüzey pürüzlülüğü 1,709 μm , sıvı basıncı %33,3 arttırılarak 4 bar olduğunda yüzey pürüzlülüğü 1,671 μm ölçülmüştür. Bu durumda yüzey pürüzlülük değeri %2,27 oranında azalmıştır. Sıvı basıncı etkisini arttırdığımızda yüzey pürüzlülüğü daha iyi çıkmaktadır.
- Ölçüm raporları sonuçları incelendiğinde dairesel form için ölçüm raporlarında INJ 3 bar olarak alındığı durumda nominal değeri $\varnothing 5$ mm istenen delikler 60 A değerinde 4,971 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda sapma oranı %0,58'dir. FF değerinin %66,6 oranında arttırarak 100 A yaptığımızda ölçüm değeri 4,978 mm olarak tespit edilmiştir. Bu durumda sapma oranı %0,44 olarak hesaplanmıştır.
- Dikdörtgen form için ölçüm raporlarında INJ 3 bar olarak alındığı durumda nominal değeri 8 mm istenen kenarda 60 A değerinde 8,002 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda sapma oranı %0,03'tür. FF değerinin %66,6 oranında arttırarak 100 A yaptığımızda 7,971 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda sapma oranının %0,36 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm raporlarında ölçülen değerler ile nominal değerlerin çok yakın çıktığı gözlemlenmiş olup hassas ölçümler yapılabildiği sonucuna varılmıştır.
- Farklı FF değerlerinde malzemenin SEM görüntüleri incelendiğinde FF'in artmasıyla çatlak genişliklerinin ve çatlak sayısının arttığı gözlemlenmiştir.
- FF değerinin artmasıyla birlikte krater derinliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- FF değerinin artması ile malzeme yüzeyinde oluşan beyaz tabaka kalınlığı artar ve bu da malzemenin sertliğinin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.
- Dikdörtgen formlu kesitin 3 Bar sıvı basıncında en düşük FF değeri olan 60 A'de işlenmiş yüzey sertliği 494,04 HBN olarak ölçülmüş, en yüksek FF değeri olan 100 A değerinde işlenmiş yüzeyindeki sertlik değeri 395,49 HBN olarak ölçülmüştür. Bu durumda sertlik değeri %19,94 oranında azalış göstermiştir.
- Dikdörtgen formlu kesitin 4 Bar sıvı basıncında en düşük FF değeri olan 60 A'de işlenmiş yüzey sertliği 496,06 HBN olarak ölçülmüş, en yüksek FF değeri olan 100 A değerinde işlenmiş yüzeyindeki sertlik değeri 405,66 HBN olarak ölçülmüştür. Bu durumda sertlik değeri %18,82 oranında azalış göstermiştir.

Çalışma sonrasında gerçekleştirilecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler verilmiştir. Bunlar;

- Farklı Hardox kaliteleri tez kapsamında yer alan işleme parametreleri ile incelenebilir.
- Yapılan deneyde sıvı basıncı olarak kullanılan değerler arttırılabilir ve sonuçlar tekrar gözlemlenebilir.



KAYNAKLAR

1. Çaydaş, U., Hasçalık, A. "Tel erozyon yönteminde işlem parametrelerinin malzemenin mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2): 281-290 (2004).
2. Eksilmez, N., Özlü, B., & Demir, H., "Hardox 500 çeliğinin lazerle işlenmesinde kesme geometrisine ve işleme parametrelerine bağlı kesim kalitesinin değerlendirilmesi " *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.*, 5 (1): 301-314 (2022).
3. Kalavathi, V., & Bhuyan, R. K., "Optimization of process parameters in wedm process on two workpieces of materials Hardox-400 and Hardox-500" *International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development*, 8: 71-82 (2018).
4. Dhale, S. R., & Deshmukh, B. B., "WEDM with different diameter wire electrodes on inconel 718: improved dimensional deviation, wire consumption and surface quality." *Materials Today: Proceedings* (2022).
5. Çelik, M., Gürün, H., ve Çaydaş, U. "Tel erozyon yöntemiyle işlenmiş Ti 6Al 4V alaşımının yüzey kalitesinin manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle iyileştirilmesi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33: 347-357 (2021).
6. Altuğ, M., "Investigation of machinability of welded jointed Hardox steel in WEDM", *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 20 (1): 92-103 (2019).

7. Sudharsan, S., Arul, R., Veera Ajay, C., and Veerakumar, S. "Multiple response optimization of WEDM parameters using grey relational method", **Materials Today: Proceedings**, 59 (1): 305-308 (2022).
8. Gürbüz, H., Baday, Ş., ve Hamarat, İ. "Cnc tel elektro erozyon tezgâhında işleme hızı üzerine elektrot malzemesinin, soğutma tipinin ve iş parçası malzemesinin etkisinin araştırılması", **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, 24: 343-350 (2019).
9. Altuğ, M. "Investigation of Hardox 400 steel exposed to heat treatment processes in WEDM." **Politeknik Dergisi**, 22 (1): 237-244 (2019).
10. Gökmeşe, H., & Özdemir, M. "Hardox 500 sac malzemenin şekillendirilebilirlik davranışı üzerinde ısıtıl işlemin etkisi", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Tasarım ve Teknoloji**, 4 (C): 343-349 (2016).
11. Tosun, N., & Çoğun, C. "Tel erozyonda kesme parametrelerinin ilerleme hızına etkisi", **Mühendis ve Makina**, 43: 16-20 (2002).
12. Shah, A., Mufti, N. A. and Rakwal, D., "Material removal rate, kerf, and surface roughness of tungsten carbide machined with wire electrical discharge machining" **Journal of Materials Engineering and Performance**, 20: 71-76 (2011).
13. Polzer, A., Muralova, K., Benes, L., Zahradnicek, R. and Fries, J. "Comparison of machinability of nickel alloys using wedm" **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture**, 236 (9): 1268-1281 (2022).
14. Muralova, K., Polzer, A. and Benes, L., "Multicut technology used in wedm machining of Mar-M247" **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 236 (6-7): 811-827 (2022).

15. Tosun, N., & Cogun, C. "An investigation on wire wear in WEDM" *Journal of Materials Processing Technology*, 134 (3): 0924-0136 (2003).
16. Kara, R., Kayalı, Y., & Çolak, F. "Borlanmış Hardox 500 çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (1): 151-158 (2021).
17. Mohd Saif, Satyam Tiwari. "Investigation towards surface roughness & material removal rate in Wire-EDM of aluminium Alloy 6061 and 5083 using Taguchi method", *Materials Today: Proceedings*, 47 (4): 1040-1047 (2021).
18. Nourbakhsh, F., Rajurkar, K. P., Malshe, A. P., & Cao, J. "Wire Electro-Discharge Machining of Titanium Alloy", *Procedia CIRP*, 5: 13-18 (2013).
19. Zeng, Y., Li, H., Li, X., Li, S., & Chen, Y. "Effects of machining parameters on surface roughness in wire electrical discharge machining of cylindrical and rectangular rods", *Materials*, 12(22): 10-15 (2019).
20. Çaydaş, U., & Hasçalık, A. "Tel erozyon yönteminde işleme parametrelerinin alüminyum alaşımının yüzey yapısına etkisi", *Politeknik Dergisi*, 7 (1): 31-36 (2004).
21. Yılmaz, T. "Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen Hardox 400 çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2010).
22. Uluocak, M. E. "Hardox 450 çeliklerinin MAG kaynak bölgesi mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2008).
23. Metlioğlu, M. R., Uzun, M., Gökkaya, H., & Boca, G. D. "The effect of machining parameters on surface roughness in the drilling of Hardox 400"

XXVI. MicroCAD International Scientific Conference, Hungary, 29-30 (2012).

24. Brooks, J. A., & Lippold, J. C. "Selection of wrought austenitic stainless steel" **ASM Metal Handbook**, Texas, V.6, 456-469 (1993).
25. Noble, D. N. "Selection of wrought duplex stainless steel" **ASM Metal Handbook**, Texas, 471-479 (1993).
26. Yılmaz, R., Gedikli, M., ve Barlas, Z. "Hardox 400 çeliğinin sert dolgu kaynağında paso sayısının sertliğe, aşınmaya ve mikroyapıya etkisi." **Teknoloji**, 8(1): 56-64 (2005).
27. Hardox çok amaçlı aşınma levhası el kitapçığı, İstanbul (2007).
28. Gençdoğan, D. "AISI 430/Hardox 450 çeliğinin nikel ara tabaka kullanılarak TIG çift taraflı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adıyaman (2020).
29. Toprak, M. "Katı borlamanın Hardox 450 ve Hardox Hituf çeliklerin yüzey özelliklerine etkisi." **Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi** (2019).
30. Goyal, S., "Optimization of process parameters of wire cut edm for stainless Steel-316", **International Journal of Surface Engineering & Materials Technology**, 9 (1): 1-5 (2019).
31. Haşçalık, A.ve Savaş, V. "CNC tel erozyon tezgâhında D5 takım çeliği için kesme parametrelerinin araştırılması" **Teknoloji**, 3 (4): 10-12 (2000).
32. İnternet: Makine Eğitimi, "Tel Erozyonun çalışma sistemi", <https://www.makinaegitimi.com/tel-erozyon-nedir-nasil-calisir/> (2023)

33. Fan, Y. "Research on Precision Pulse Power Technology of WEDM." ***Procedia CIRP***, (6): 267-273 (2013).
34. İnternet: SSAB, "Hardox 500 kimyasal özellikleri nedir?", <https://www.ssab.com/tr-tr/markalar-ve-urunler/hardox/urun-programi/500>
35. Çaydaş, U., & Hasçalık, A. "Cnc tel erozyon tezgahlarında farklı malzemelerin işlenebilirliğinin araştırılması" ***Journal of Science and Technology of Dumlupınar University***, (6): 201-214 (2004).
36. Uhlmann, E., & Tekkaya, A. E. "Surface characterization of wire-EDM machined Inconel 718 with regard to microstructure and surface integrity" ***CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology***, 27 (1): 55-62 (2019).
37. Sahu, Nitin Kumar., Singh, Mukesh., Mwanza, Bupe and Sahu, Atul. "Investigation of machinability characteristics of Edmed Inconel 825 alloy under multidimensional parametric modeling by using holistic Grey-PCA statistical models", ***Advances in Materials Science and Engineering***. (3): 1-29 (2022)

ÖZGEÇMİŞ

2013 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2018 yılında Lisans eğitimini tamamlayarak, 2020 yılında Karabük Üniversitesi'nde Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2020 yılından bu yana Kardemir A.Ş bünyesinde çalışmaktadır.

