



**KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ VE GÖRMEMİŞ D2 TAKIM
ÇELİKLERİNİN EDM İLE İŞLENEBİLİRLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Eda KARADAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Eda KARADAĞ

29/07/2022

KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ VE GÖRMEMİŞ D2 TAKIM ÇELİKLERİNİN EDM İLE İŞLENEBİLİRLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Eda KARADAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, kriyojenik olarak ısıtıl işlem görmüş ve görmemiş AISI D2 takım çeliklerinin elektro erozyon işlemi (EDM) ile işlenebilirlikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney numuneleri ticari olarak elde edilmiş ve numunelerden biri ≈ 203 K de kriyojenik işleme tabii tutulmuştur. Elektro erozyon işlemi (EDM) parametreleri olarak akım (4A, 8A, 16A) ve vurum seviyesi (2, 5, 8) seçilmiştir. Bu parametrelerin, Takım aşınma oranı (TWR) değerine ve boyutsal doğruluğuna etkileri incelenmiştir. Ayrıca, akım ve vurum sürelerinin yüzey durumuna etkisi taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri yardımıyla yorumlanmıştır. Buna ek olarak, parametrelerin etkileşimlerini daha net görebilmek için Varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. İşlem parametrelerinin 3 boyutlu grafikleri MATLAB yazılımında oluşturulmuştur. Çaptan sapma (OC) değerinin ölçümünde üç boyutlu koordinat ölçme cihazı (CMM) kullanılmıştır. İşleme süresi (T) ve takım aşınma oranı (TWR) açısından değerlendirildiğinde en etkili parametrenin akım olduğu görülmüştür. Çaptan sapma değerlerinde (OC) ise vurum süresinin akıma göre daha etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerinde kriyojenik olarak ısıtıl işlem görmüş numunelerde, çatlakların belirgin bir biçimde görülebildiği ve çatlak boylarının ölçülebildiği, akım 4A vurum seviyesinin (Ton) 5 olduğu koşulda, çatlak yoğunluğunda %64 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kriyojenik ısıtıl işlemin bu malzemenin elektro erozyon işlemi (EDM) ile işlenmesi öncesinde uygulanmasının uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon işlemi (EDM), Kriyojenik işlem, AISI D2 takım çeliği, Varyans analizi (ANOVA), Boyutsal doğruluk, Çaptan sapma (OC).
Sayfa Adedi : 65
Danışman : Doç. Dr. Hakan GÜRÜN

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY BY EDM
OF CRYOGENICALLY TREATED AND UNTREATED D2 TOOL STEELS

(M. Sc. Thesis)

Eda KARADAĞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

In this study, the machinability of cryogenically treated and non-cryogenically AISI D2 tool steels by electrical discharge machining (EDM) has been investigated. Experiment specimens were obtained as commercial, and one of the specimens was subjected cryogenic process in $\approx 203\text{K}$. Machining parameters were chosen current (4A, 8A, 16A) and pulse-on level (2, 5, 8) in the EDM process. It was examined whether these parameters have an effect on dimensional accuracy and Tool Wear Rate (TWR), which is an output parameter. Additionally, it was interpreted the effects of current and pulse-on time on surface status with the help of Scanning Electron Microscopy (SEM). In addition, Analysis of Variance (ANOVA) was applied to the results to show interactive analysis of parameters. It was found that the most effective parameter is current when evaluated in terms of machining time (T) and tool wear rate (TWR). It was determined that the pulse-on time has more effect on overcut (OC) comparison with the current. The crack density in cryogenically treated specimens is observed in SEM had decreased in 64%, this condition is when the current is 4A and the pulse-on time level is 5 because, in this condition, the cracks can be observed clearly. It is considered that the specimens which will be machined in EDM need to be applied cryogenically treatment before the EDM process.

Science Code : 91438

Key Words : Electrical Discharge Machining (EDM), Cryogenic proses, AISI D2 tool steel, Analysis of Variance (ANOVA), Dimensional accuracy, Overcut (OC)

Page Number : 65

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hakan GÜRÜN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, süreç içerisindeki sabrından dolayı başta kıymetli danışmanım Doç. Dr. Hakan GÜRÜN olmak üzere, tez yazım sürecinde, verilerin değerlendirilmesinde ve yorumlanmasında bilgi ve deneyimlerini bizden esirgemeyen Prof. Dr. Hakan DİLİPAK ve Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Ahmet GÜRAL 'a, Dr. Öğr. Üyesi Uğur ARABACI 'ya, Dr. Öğr. Üyesi Meryem BOLAT GÖNÜLLÜ 'ye, Öğr. Gör. Damla Dilara ÇAKIL 'a ve yine Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümünden Dr. Öğr. Üyesi Onur ÇAVUŞOĞLU 'na ve Arş. Gör. Duygu GÜRKAN 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca, maddi ve manevi hiçbir desteğini benden esirgemeyen sevgili ailem; babam Şenol KARADAĞ, annem Ayşe KARADAĞ, abim Fatih KARADAĞ ve değerli eşi Yıldız KARADAĞ 'a ve kuzenim Elif ORMANCI 'ya süreç boyunca göstermiş oldukları sevgi ve anlayışlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME YÖNTEMİ.....	15
4. MATERYAL VE METOT	19
4.1. AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliği (DIN 1.2379)	19
4.2. Elektrot.....	22
4.3. EDM Deneyleri	23
4.4. EDM Parametreleri ve Belirlenmesi	23
4.5. Çaptan Sapma Ölçümleri	24
4.6. Takım Aşınma Oranının (TWR) Hesaplanması.....	25
4.7. Metalurjik İncelemeler	25
4.8. Varyans Analizi.....	26
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	27
5.1. SEM Görüntüleri	27
5.1.1. İşlenen yüzeylerin SEM görüntüleri	27
5.1.2. Elektrotların yüzey SEM görüntüleri	36
5.2. EDS Verileri	38

	Sayfa
5.3. Varyans Analiz (ANOVA) Sonuçları	41
5.3.1. İşleme süresinin ANOVA verileri.....	41
5.3.2. TWR değerinin ANOVA verileri.....	45
5.3.3. Çaptan sapma değerlerinin ANOVA verileri.....	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. EDM’de kıvılcım oluşumunun şematik gösterimi	15
Şekil 3.2. Elektro erozyon işleminin (EDM) termo-elektrik modeli	16
Şekil 3.3. Elektro Erozyon İşlemi sırasında etkili parametrelerin bir şablonu	16
Şekil 5.1. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c) işleme süresine bağlı ana etki grafikleri.....	43
Şekil 5.2. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), takım aşınma oranına bağlı ana etki grafikleri.....	48
Şekil 5.3. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), çaptan sapma değerlerine bağlı ana etki grafikleri.....	52

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kriyojenik işlem uygulanmış AISI D2 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	21
Çizelge 4.2. Kriyojenik işlem uygulanmamış AISI D2 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	21
Çizelge 4.3. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin farklı bölgelerden alınmış sertlik değerleri	22
Çizelge 4.4. Kriyojenik işlem görmüş numunenin farklı noktalarından alınmış sertlik değerleri	22
Çizelge 4.5. EDM işleminde uygulanan parametreler ve değerleri	24
Çizelge 5.1. Kriyojenik işlem görmüş numunenin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları.....	41
Çizelge 5.2. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları.....	42
Çizelge 5.3. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları.....	42
Çizelge 5.4. Kriyojenik işlem görmüş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları	45
Çizelge 5.5. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları.....	46
Çizelge 5.6. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları.....	46
Çizelge 5.7. Kriyojenik işlem görmüş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları.....	50
Çizelge 5.8. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları.....	51
Çizelge 5.9. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları.....	51

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. EDM işlemi sonrası elektrotun görünümü.....	23
Resim 4.2. Elektro Erozyon Cihazı.....	23
Resim 4.3. CMM Cihazı	24
Resim 4.4. Hassas terazi	25
Resim 4.5. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı	26
Resim 5.1. 4A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri.....	27
Resim 5.2. 4A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	28
Resim 5.3. 4A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	29
Resim 5.4. 8A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	30
Resim 5.5. 8A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	31
Resim 5.6. 8A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	32
Resim 5.7. 16A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	33
Resim 5.8. 16A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	34

Resim	Sayfa
Resim 5.9. 16A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri	35
Resim 5.10. (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş ve (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğinde 4A ve T_{on} 2 değerlerinde işlem sırasında kullanılan elektrotların SEM görüntüleri	36
Resim 5.11. (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş ve (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğinde 16A ve T_{on} 8 değerlerinde işlem sırasında kullanılan elektrotların SEM görüntüleri	37
Resim 5.12. 4A T_{on} 2 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi	38
Resim 5.13. 4A T_{on} 2 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi	38
Resim 5.14. 16A T_{on} 8 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi	39
Resim 5.15. 16A T_{on} 8 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi	40
Resim 5.16. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c) işleme süresine bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri.....	44
Resim 5.17. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), takım aşınma oranına bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri.....	49
Resim 5.18. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), çaptan sapma değerlerine bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
-----------------	--------------------

$\varnothing$	Çap
A	Amper
I	Akım
K	Kelvin (Sıcaklık Ölçüm Birimi)
R_a	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
S/N	Sinyal Gürültü Oranı
T	İşleme süresi
Toff	Vurum Aralığı
Ton	Vurum Süresi
V	Voltaj

Kısaltmalar	Açıklamalar
--------------------	--------------------

ANOVA	Varyans Analizi
EDM	Electrical Discharge Machining (Elektro Erozyon İşlemi)
EDS	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılımlı Spektroskopi)
EWR	Electrode Wear Rate (Elektrot Aşınma Oranı)
MRR	Material Remove Rate (Malzeme Kaldırma Oranı)
OC	Overcut (Çaptan Sapma)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SR	Surface Roughness (Yüzey Pürüzlülüğü)
TWR	Tool Wear Rate (Takım Aşınma Oranı)

1. GİRİŞ

Günümüzde, ekonomik zorluklar ve üstün rekabet, minimum maliyette, daha kaliteli ve daha hızlı üretim için yeni yolların talep edildiği kalıcı veya sürekli bir sorundur [1]. Gelişen teknoloji ile birlikte üretim yöntemlerindeki gelişmelere de bu sorunların çözümünde bizlere ışık tutmaktadır. Bu nedenle, günümüzde, imalat endüstrisi, kompleks geometrilere ve yüksek sertliğe sahip olması nedeniyle, işlenmesi neredeyse imkansız görülen malzemelerin işlenmesinde elektro erozyon işlemi (EDM) yöntemini, zamandan ve enerjiden tasarruf etmesi açısından, bir alternatif olarak görmektedir. EDM prosesi, sert metallerin, havacılık ve kalıp endüstrisinde kullanılan alaşımların işlenmesinde kullanılır. Ana uygulamalar, basınçlı döküm kalıpları, dövme kalıpları, toz metalurjisi ve enjeksiyon kalıplarıdır. EDM'nin en önemli avantajlarından biri numune ve takımın birbiriyle temas geçmemesidir. Bu durum, titreşim problemlerinin elimine edilerek, makine gücü olmaksızın, küçük ve ince detayların elde edilmesine müsaade eder. İşleme sırasında, enerji boşalması gerçekleşir ve bu sayede ergiyen ya da yüksek sıcaklıklardan kaynaklı aniden buharlaşan iş parçasından malzeme kaldırılır ve işleme bu şekilde gerçekleşmiş olur [2].

AISI D2 takım çelikleri, kalıp endüstrisinde çokça kullanılan oldukça sert çelik türleridir. Günümüzde, bu metallerin, kalıp endüstrisinde, kullanım ömürlerinin uzun olması için daha sert olmaları istenir. Bu sertlik artışını elde etmekte, kriyojenik işlem gibi ters ısı işlem yöntemleriyle artık mümkündür. Ancak, bu gelişme, kalıba istenilen şeklin verilmesi için bir problemdir ve bu sertlik değerlerindeki malzemelerin işlenmesi için sertliğin önem arz etmediği bir yöntem olan EDM büyük bir alternatiftir. Yakın tarihlerde yapılmış olan çalışmalarda incelendiğinde, AISI D2 takım çeliklerinin, EDM yöntemi ile işlenmesinin, yüzey pürüzlülüğü, malzeme kaldırma oranı ve takım aşınma oranı açısından değerlendirmelerine çokça rastlanılmaktadır. Ancak, AISI D2 takım çelikleri üzerinde, kriyojenik işlem uygulamasının gittikçe yaygınlaşmasına rağmen, bu işlemin EDM ile işleme sırasında malzeme yüzeyinde ve aynı kimyasal içeriğe sahip farklı sertlikteki bu iki malzemenin çaptan sapma değerleri arasında belirgin bir farka sebep olup olmadığı üzerine bir çalışma yapılmadığı fark edilmiştir. Bunun üzerine, bu çalışmada, kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş iki ayrı AISI D2 takım çeliği numuneleri EDM (Elektro Erozyon Yöntemi) ile işlenmiştir. İşleme süreleri ölçülmüş ve işlem sonrasında numunelerin yüzey durumları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri karşılaştırılarak

değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, çaptan sapma değerleri ölçülmüş ve sapma değeri üzerinde en etkili parametrelerin ne olduğu ANOVA (Varyans Analizi) ile belirlenmiştir.

EDM ile işleme sırasında karşılaşılan en büyük problemlerden biri de ölçüsel doğruluğun sağlanmasıdır. Seçilen parametre değerlerine bağlı olarak çaptan sapma değerlerinin tespiti üç boyutlu koordinat ölçme (CMM) cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede işlem parametrelerinin kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerde ölçüsel sapmalar üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yakın zamanda, elektro erozyon işlemi (EDM) ve AISI D2 takım çeliği ile alakalı yapılan bazı çalışmalar incelenmiş ve çalışmaların içeriğinden ve elde edilen sonuçlarından kısaca bahsedilmiştir.

De Jesus çalışmasında, EDM işleminin AISI D2 takım çeliği üzerinde yorulma davranışına etkisini incelemiştir. Düz ve çentikli numuneler üzerinden malzemenin çentik darbe davranışı, kalıntı gerilme ve yorulma direnci diğer ticari işleme teknikleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, basma kalıntı gerilmesi gösteren ana malzeme ile karşılaştırıldığında, EDM ile işleminin yorulma direnci gösteren çekme kalıntı gerilmelerinin oluşumuna sebep olduğu sonucuna varılmıştır. EDM ve taşlama işlemleri karşılaştırıldığında, taşlama işlemi malzeme yüzeyinde, basma gerilimi gösterirken, EDM ile işleme yeniden katılmış tabaka olarak bilinen katmanda hem çatlak görünümüne sebep olmuş hem de çekme kalıntı gerilmesinin oluşmasına sebep olmuştur [1].

Guu, çalışmasında, AISI D2 takım çeliğini EDM ile işlemiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü ve işlem sonucunda oluşan mikro çatlaklar AFM tekniği ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, daha yüksek boşalım enerjisinin daha kötü yüzey yapısına sebep olduğu ortaya konmuştur. İşleme kusurlarının önlenmesi için düşük seviye boşalım enerjisinin tercih edilmesi gerektiği fikri öne sürülmüştür [2].

Prabhu ve Vinayagam çalışmalarında, dielektrik sıvı içerisine tek duvarlı nano karbon tüpler karıştırılmış EDM de işlenmesi sonucunda, AISI D2 takım çeliği olan iş parçasının yüzeyindeki pürüzlülükler ve mikro çatlakları incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda, nano karbon tüpün bulunmadığı dielektrik sıvıdaki EDM de işlenmiş numune ile karşılaştırıldığında, dielektrik sıvı içerisinde nano karbon tüp bulunan numuneler daha iyi yüzey kalitesine, azalmış mikro çatlaklara ve daha iyi yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmüştür [3].

Pragadish ve Kumar'ın çalışmasında, AISI D2 takım çeliği üzerinde, geleneksel EDM ve kuru EDM ile işleme yapılmış, her ikisinde de bakır takım ucu kullanılmış ve bu iki farklı işleme yönteminin malzeme kaldırma oranına (MRR), yüzey pürüzlülüğüne (SR) ve yüzey morfolojisine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kuru EDM ile işlenen numunedeki

MRR ve yüzey pürüzlülüğün (SR) değerlerinin, geleneksel EDM işlemine kıyasla daha iyi olduğu hatta SR değerinde %16,8 civarında bir azalma olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [4].

Abbas, dielektrik sıvı içerisinde bir yüzey aktif maddesi olan Span-20 ve nano krom tozu (NCP) kullanarak, AISI D2 çeliğinin EDM de işlenmesi sonucunda meydana gelen ortalama yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Mevcut çalışma, bu çelikler için yüzey pürüzlülüğünün ortalama davranışının, Span-20 ile olan davranışla karşılaştırıldığında NCP konsantrasyonu ve akım vurum süresinin maksimum seviyede olduğu durumda düştüğünü kanıtlamaktadır [5].

Srivastava ve Pandey 'in çalışmasında, ultrasonik kriyojenik olarak soğutulmuş EDM'de, sinterlenmiş bakır (75%Cu)-titanyum karbür (25%TiC) diğer bir adı ile Cermet takım ucu ile geleneksel bakır ucu karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Geleneksel bakır takım ucu ile karşılaştırıldığında, Cermet takım ucunda elektrot aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) nün ise Cermet takım ucu kullanıldığında arttığı görülmüştür. Ek olarak, Cermet kullanılarak yapılan işlem sonrasında, işlenen parçanın yüzeyinde, çatlak genişliği ve yüzey çatlak yoğunluğunun, geleneksel bakır numune kullanımına kıyasla daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır [6].

Khan ve arkadaşları, bir paslanmaz çelik olan D3 çeliğinin, EDM de akım (I), voltaj(V) ve vurum süresi (Ton) parametreleri değiştirilerek, malzeme kaldırma oranı (MRR), takım ucu aşınma oranı (TWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) için ideal değerler bulunmaya çalışmışlardır. Bu verilerin elde edilmesi için ise ANOVA ve Taguchi L9 kullanılmış ve sinyal gürültü oranı (S/N) hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, MRR, TWR ve SR için farklı akım (I), voltaj(V) ve vurum süresi (Ton) değerleri ideal sonuç olarak elde edilmiştir [7].

Pant ve Bharti, yüksek sıcaklık ve korozyon direncine sahip olan nimonik alaşımların EDM de işlenmesini incelemişlerdir. Günümüzde bu alaşımların işlenmesiyle alakalı yeterince araştırmanın olmaması bu çalışmayı değerli kılmaktadır [8].

Gupta, AISI D2 takım çeliği olarak seçilen iş parçası üzerinde EDM prosesi gerçekleştirilmiş ve sinyal gürültü oranı (S/N) ve ANOVA ya, maksimum MRR, minimum SR ve TWR değerleri elde etmek için başvurmuştur. Bu deneysel çalışma sonunda, MRR, SR ve TWR

değerleri için gerekli en uygun akım, vurum süresi ve vurum aralığı süresi değerleri elde edilirken, TWR değeri için en etkili parametrenin vurum aralığı süresi, SR için ise bu değerlerin vurum süresi olduğu sonucunda varılmıştır [9].

Hamid ve Lajis, EDM’de elektrot malzemesi olarak, yüksek aşınma direncine sahip toz metalürjisi ile üretilmiş bakır tungsten (Cu35%-W65%) kullanarak, gaz yağında sertleştirilmiş D2 takım çeliğini işlemişlerdir. Deneysel çalışma sonrasında, en düşük TWR ve en yüksek MRR değerlerini elde edebilmek için gerekli parametre değerleri hesaplanmıştır [10].

Guu, bu çalışmada, AISI D2 takım çeliğinin EDM’de işlenmesini incelemiştir ve EDM’den kaynaklanan yüzey karakteristiği ve işleme hasarı, işleme parametreleri açısından değerlendirilmiştir. İş parçası yüzeyindeki yeniden katılaşmış tabaka SEM ile görüntülenmiş ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Numune yüzeyinde kalıntı gerilme X-ray kırılması ile gözlemlenmiştir ve EDM prosesinin işleme ile yüzeyde çekme kalıntı gerilmesi meydana getirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, yeniden katılaşmış tabakanın kalınlığı, giriş parametreleri ile bağdaştırılmış ve yeniden katılaşmış tabakanın artan akım değeri ve vurum süresi ile daha ince olduğu sonucu gözlenmiştir [11].

Lee’nin çalışmada, SKD11 (JIS) takım çeliğinin EDM’de işlenmesi incelenmiştir. Aşınma direnci ve sertliği yüksek olan bu malzemelerin kalıntı gerilmesi ölçülmüştür. İşleme sırasında yeniden katılaşmış tabakanın malzemede ek strese sebep olduğu sonucuna varılmış ve yeniden katılaşmış tabakanın en ince olduğu ve yüzey kalitesinin en iyi olduğu akım, vurum süresi, vurum aralığı süresi ve voltaj değerleri ölçülmüştür [12].

Kansal, D2 kalıp çeliğinin, EDM ile işlenmesi sırasında, dielektrik sıvı içerisine silisyum toz karıştırılmasının, iş parçasının yüzey karakterizasyonuna etkisini incelemiştir. İncelemeler yapılırken, Taguchi methoduna ve ANOVA analizine başvurulmuştur. Araştırmacılar, yapılan bu çalışmayla, dielektrik sıvı içerisine katılan silisyum konsantrasyonunda ve akım değerinde meydana gelen değişikliklerin işleme oranına (MR) etkisinin en fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır ve bu değerlerdeki artışın işleme oranını arttırdığını belirtmişlerdir [13].

Kumar ve Batra, üç farklı kalıp çeliğinin (D2, H13 ve OHNS), tungsten tozu karıştırılmış dielektrik ortama sahip EDM de işlenmesi ile kalıp çeliklerinin yüzeyinde meydana gelen mikro sertlikteki değişikliği incelemiştir. Çalışma sonucunda, bu üç tip kalıp çeliğinin her birinde, mikro sertlik değerlerinde %100'den fazla bir gelişme gözlenmiştir ve işlem sırasında iş parçasının yüzeyinde önemli ölçüde tungsten ve karbon transferinin olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, her bir parça için en iyi mikro sertlik değerlerinin elde edilmesi amacıyla uygulanan parametre değerlerinin de aynı olduğu bulunmuştur [14].

Srivastava ve Pandey, M2 kalite yüksek hız çeliğinin işlenmesi sırasında ultrasonik destekli kriyojenik olarak soğutulmuş bakır elektrot (UACEDM) kullanarak EDM prosesi üzerinde parametrik çalışma yapmışlardır. Giriş parametreleri (akım, vurum süresi, çevrim süresi ve voltaj) üzerinde değişiklikler yapılarak elektrot aşınma oranı (EWR), malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) değerlerindeki değişiklikler incelenmiştir. Aynı zamanda, normal elektrot, kriyojenik olarak soğutulmuş elektrot ve ultrasonik destekli kriyojenik olarak soğutulmuş elektrotlar kullanılarak, yine bu değerler üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda ise, geleneksel EDM ile karşılaştırıldığında, ultrasonik destekli kriyojenik olarak soğutulmuş bakır elektrot (UACEDM)'da EWR ve SR değerlerinin önemli miktarda daha düşük, MRR değerinin ise her ikisinde de eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, UACEDM ile işlenmiş iş parçasının yüzey bütünlüğünün daha iyi ve takım ömrünün daha uzun olduğu sonucuna da varılmıştır [15].

Kumar ve Kumar'ın çalışması, geleneksel EDM (CEDM) ve kriyojenik soğutulmuş elektrotlu EDM (CCEDM) kullanılarak, 10% SiC_p ile sertleştirilmiş, Al-MMC'nin işlenmesi üzerinde yapılmıştır. İşleme parametreleri, akım, vurum süresi ve voltaj değişkenlerini içermektedir. Sonuçlar, SEM ve EDX analizlerinin, mikro sertliğin, mikro-yapının, iş parçası ve elektrotun sıcaklığının, yüzey pürüzlülüğünün, malzeme kaldırma oranının ve elektrot aşınma oranının oluşumunu açıklamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler vurum süresi ve akım iken; akım, vurum süresi ve voltaj parametrelerinin elektrot aşınma oranı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Elektrot aşınması, kriyojenik soğutma ile %18 azaltılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kriyojenik soğutulmuş elektrot ucunun kullanılarak işlenmesi ile iyileştirilmiştir [16].

Kumar Das, yapay bal arısı kolonisi (ABC) algoritması kullanarak, EN31 takım çeliğinin EDM’de en uygun seviyede malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü için, işleme parametrelerinin birleşimini denemiştir. Minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum MRR değerlerinin elde edildiği parametreler ölçülerek not edilmiştir. Deneyler sonucunda, akım ve vurum süresi değerlerindeki artış ile MRR ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna ulaşılmıştır [17].

Prathipati, AISI D2 takım çeliği, EDM’de çoklu delik bakır elektrot kullanılarak işlemiş ve işleme süresinde kısalma amaçlamışlardır. Bu teknik ile yapılan deneyde, yüzgece benzer yansımalar gözlenmiş, ancak bu görünümün taşlama ile kolayca giderildiği tespit edilmiştir. Deney sonucunda, çoklu delik elektrotlu EDM ile işleme süresi %50 kısaltılabilmektedir [18].

Matin, DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin EDM işleminde, elektrot şeklini, akım ve vurum süresi parametreleri değiştirilerek, MRR ve takım aşınma oranı (TWR) üzerindeki etkilerini çalışmıştır. Deney sonuçları, elektrot şeklinden bağımsız olarak, vurum süresindeki artışın MRR’nin artmasına sebep olduğunu, MRR ve takım aşınma oranının ise artan akımla birlikte arttığını, ancak artan takım aşınma oranı ile düştüğünü göstermektedir. Sonuçlara göre, en yüksek MRR değeri, üçgen, daire, kare R2 ve kare şeklindeki elektrotlarda elde edilmiştir. Ancak, en yüksek TWR değeri üçgen şeklindeki elektrotta bulunurken, en düşük TWR değeri daire şeklinde elektrotta elde edilmiştir [19].

Sharma ve Sinha, AISI D2 takım çeliğini, döner EDM’de saf bakır elektrot kullanılarak işlemiştir. Bu çalışmada, MRR, TWR ve MR değişkenlerini elde etmek için, akım (I), voltaj (V), çevrim süresi ve elektrot rotasyonundaki değişkenlerin saptanmasında, ANOVA analizi önemli bir rol oynamıştır. Bu çalışma, bu değişkenler arasındaki korelasyon hakkında bize bilgi vermektedir [20].

Sahu ve Nayak, A2 takım çeliğinin EDM’de tam faktöriyel işlenmesi üzerine çalışmıştır. 20mm çapındaki silindirik bakır (%99,9 saflıkta) elektrot, takım malzemesi olarak seçilmiştir. EDM işleminde, akım, vurum süresi, çevrim süresi ve voltaj gibi dört farklı önemli parametre çalışılmıştır. Bu parametrelerin etkisinin, MRR ve EWR gibi EDM’nin yanıt parametrelerindeki, nitel ve nicel koşulları düşünülmüştür. Nitel analiz için ANOVA yapılırken, nicel analiz için ana etki alanları çizilmiştir. Yapılan deneysel araştırmalar sonucunda, Ton, TWR’de %50.91 bir katkıya sahipken, akımın MRR’ye %87,90 katkıya

sahip olduğu bulunmuştur. Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis), MRR ve EWR yanıtları arasındaki en iyi dengeyi bulmak için uygulanmıştır [21].

Sharma, Mohanty ve Pardasani, takım aşınmasının, EDM ile işleme sırasında maliyeti ve işleme süresinin kötü etkilemesi ve buna bağlı olarak prosesin verimliliğinin düşmesine sebep olması dolayısıyla, Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method) temelli termosayısal model önermişlerdir. Önerilen model, deneylerin maliyetini, hatasını ve süresini azalmasına yardım edebilen, kriyojenik olarak iyileştirilmiş EDM’de, MRR ve TWR’nin doğru değerlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu çalışma hem üretim süresinde hem de deney maliyetinden tasarruf edecek olan gerçek işlemeye gitmeden önce, MRR ve TWR için parametreler ve en uygun gücün önceden belirlenmesine yardım edecektir. Bu çalışma sonrasında elde edilen diğer bir sonuç ise, kriyojenik işlem görmüş takım için sıcaklık dağılımının, görmemiş göre kıyaslandığında daha düşük olduğudur [22].

Singh, bakır elektrotlu EDM ile EN24 çeliği üzerinde bir çalışma yapmıştır. Bu araştırmanın ana odağı, MRR ve TWR gibi yanıt faktörleri için voltaj, çevrim süresi, vurum aralığı, vurum süresi ve akım gibi işleme parametrelerinin optimize edilmesi üzerinedir. Araştırma sonucunda, iyi MRR için, en etkili ve en önemli faktörlerin (vurum süresi, voltaj ve akım) olduğu anlaşılmıştır. Ancak, Ton, TWR ve MRR değerleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Akım ise, MRR değerinde, voltajdan çok az daha fazla etkiye sahiptir. Vurum süresinden sonra, TWR için, sadece voltaj baskın faktör olduğu bir diğer sonuç olarak ortaya çıkmıştır [23].

Singh, Routara ve Nayak, kriyojenik olarak soğutulmuş bakır elektrotun, Inconel 601 malzemesinin EDM’de işlenmesindeki etkilerini araştırmışlardır. Alınan giriş parametreleri, voltaj, tepe akımı ve vurum süresi iken, sonuç parametreleri ise, MRR, TWR ve SR ’dir. Deneysel çalışmada, Box-Behnken tasarımı kullanılırken, yüzey metodoloji yanıtı, farklı giriş değişkenleri değiştirilerek, sonuç değişkenleri için en uygun sonuçlar elde etmek için kullanılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, akım, sırasıyla MRR, TWR ve SR üç sonuç parametresinin tamamı için en önemli faktör olduğu sonucu elde edilmiş ve kriyojenik soğutulmuş elektrotun, iş parçasındaki SR ve MRR değerlerini iyileştirdiği gözlenmiştir. Bu bilgilere ek olarak, normal elektrot ile karşılaştırıldığında, kriyojenik işlem görmüş takım ucunun, TWR değerini %33’e kadar düşürdüğü sonucu elde edilmiştir [24].

Malhotra, silisyum karbür partikülleri ve magnezyum nano-partikülleri ağırlıkça %10 güçlendirilmiş, metal matrisli Alüminyum 7075 kompozitinin (Al 7075 / %10 SiC/Mg) EWR ve MRR üzerindeki deneysel çalışmaları sunmaktadır. Değişken işleme parametrelerinin, dönerek çalışan EDM ve geleneksel EDM süresince MRR ve EWR üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Vurum süresi, tepe akımı, çevrim süresi ve takım hızı, işleme parametreleri olarak seçilmiş, karma kompozitin, dönerek çalışan EDM ve geleneksel EDM'deki analiz karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, takımın rotasyonunun, iş parçası ve takım arasındaki boşluktan talaşın etkili tahliyesi ve dielektrik sıvının akışını geliştirdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, dönerek çalışan EDM için EWR'nin, aynı işleme parametrelerinin kurulduğu geleneksel EDM'deki EWR değeriyle kıyaslandığında nispeten daha düşük olduğu bulunmuştur [25].

Choudhary, takım çeşidi, akım, vurum süresi, vurum aralığı süresi ve voltaj gibi değişken giriş parametrelerinin, Titanyum grade 5 (Ti6Al4V)'in işlenmesi sırasındaki TWR üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Minimum TWR değeri için optimize edilmiş koşullar bulunmuş ve kriyojenik işlem görmüş ve herhangi bir ısıl işlem görmemiş takım ucu ile işlenmiş yüzeyin, yüzey topoğrafyasını gözlemlemek için mikro yapı analizleri yapılmıştır. Kriyojenik bakır takım ucuyla işlenmedeki TWR değerinin, ısıl işlem görmemiş takım ucuyla karşılaştırıldığında nispeten daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, TWR değerinin, vurum süresindeki artışla azaldığı ve akımdaki artışla arttığı bulunmuştur. Akım, vurum süresi ve elektrot çeşidinin, diğer işleme parametreleri ile kıyaslandığında, çok daha etkili parametreler olduğu bulunmuştur. Geniş yüzey çatlaklarıyla birlikte, kalın yeniden katılaşmış tabaka, ısıl işlem görmemiş takım ucu ile işlenmiş yüzeyde gözlemlenmiştir. Buna karşılık, kriyojenik işlem görmüş takım ucu ile işlenmiş yüzeyde, ince yeniden katılaşmış tabaka ile birlikte, dar mikro çatlaklar gözlemlenmiştir [26].

Prakash'ın yaptığı çalışmada, iş parçası olarak ağırlıkça hafif, bir implant malzemesi olan magnezyum AZ31B malzemesi tercih edilmiştir. Bu malzemenin işlenmesinde mikro-EDM yöntemine başvurulmuştur. Bunun sebebi ise, implantın yüzey bütünlüğünün, biyouyumluluk ve iyileşme sürecine önemli etkisi bulunduğundan, mikro-EDM yönteminin daha iyi bir sonuç elde etmekte etkili olacağı beklentisidir. AZ31B implant malzemesinin, mikro-EDM ile işlenmesi sırasında tungsten karbür elektrotun kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş olarak iki ayrı türü kullanılmış ve bu işlemin iş parçası üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar ise, kriyojenik işlem görmüş tungsten karbür

elektrotun MRR’de artış meydana getirdiği, işleme süresinde iyileşmeye sebep olduğu ve iş parçasının boyutsal doğruluğunun daha iyi olduğudur [27].

Rizvi’nin bu çalışmasında, dönebilen merkezi kompozit tasarımı ile birlikte Tepki Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology) kullanılarak, kalıp oyma EDM işleminde AISI 4340 işlenirken, yüzey pürüzlülüğü modellenmesine odaklanılmıştır. EDM parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Proses parametreleri, akım (I), vurum süresi (Ton), voltaj ve beş seviyeye sahip görev faktörüdür. Çalışmada, vurum süresi değerinin yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede etkilediği, diğer parametrelerin etkisinin ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır. Vurum süresi değerinin, yüzey pürüzlülüğüyle orantılı olduğu, Ton değerinin düşürüldükçe, yüzey pürüzlülüğünün de daha az olduğu sonucu elde edilmiştir. Araştırmacılar, daha iyi bir işleme yüzeyi için, akım ve vurum süresi değerlerinin daha düşük seviyede olmasının uygun olacağını ve görev faktörünün orta değerinde, voltajın daha düşük değerlerinin tercih edilmesi gerektiği önerisinde bulunmuşlardır [28].

Agarwal’ın çalışmasında, Jaya algoritması, optimizasyon problemlerini çözmek için başarıyla uygulanmıştır. MRR, TWR, dairesellikten sapma, sırayla maksimum, minimum ve minimum olması için, EDM’de akım, vurum süresi, çevrim süresi ve voltaj giriş parametreleri referans alınarak, hedef değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Minitab 18 tarafından deneyin matematiksel modeli geliştirildikten sonra, Jaya algoritması ile optimizasyon yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, maksimum MRR, minimum TWR ve minimum dairesellikten sapma değerlerinin elde edildiği EDM parametreleri not edilmiştir [29].

Kumar’ın bu çalışmasında, AISI D2 takım çeliğinin tel kesme elektrik deşarj işlemesi için L16 ortogonal dizisinin Taguchi kalite tasarımı kullanılarak süreç parametre optimizasyonu yapılmaktadır. Dört işleme kontrol parametreleri sırasıyla, tel hızı, voltaj, fışkırtma basıncı ve akım, iki tepki parametresi yani MRR ve SR için analiz edilmiştir. Fışkırtma basıncı, MRR üzerinde en az etkiye sahipken, tel EDM (WEDM) sırasında MRR üzerinde, akımın, birincil etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Buna karşılık, SR, WEDM boyunca tel hızından en çok etkilenen değerdir ve voltaj, WEDM işlemi sırasında D2 iş parçasının yüzey pürüzlülüğü (SR) üzerinde en az etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [30].

Singh ve Singh, vurum süresi, vurum aralığı, tepe akımı, kıvılcım aralığı voltajı, darbe tepe gerilimi ve akım gibi değişken işleme parametrelerinin, 600 μm çapında bakır elektrot kullanılarak sertleştirilmiş AISI D2 kalıp çelikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. MRR ve TWR değerlerinin tepkileri ölçülmüştür. Deneyler, Tepki Yüzey Morfolojisi ve deney yaklaşımının üç seviye Tepki Yüzey Morfolojisi tasarımı kullanılarak Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design) tarafından yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, en uygun işleme parametreleri, en uygun MRR ve TWR değerlerini elde etmek için çoklu tepki optimizasyonu regrasyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında, tepe akımının artmasıyla MRR değerinin arttığı ve diğer parametreler için öncelikle MRR değerinin arttığı, ancak belirli bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı sonucuna varılabilir. TWR, Toff ve kıvılcım aralığının artmasıyla artar ve Ton 'un artmasıyla azalmaya başlar, ancak diğer parametreler için önce arttığı ve belirli bir değere ulaştığında, azalmaya başladığı sonucu ortaya çıkmıştır [31].

Anand'ın çalışmasında, EDM işlemi kullanılarak yüksek kromlu takım çeliğinin işlenmesi incelenmiştir. Kontrol parametreleri olarak tepe akımı, darbe süresi, püskürtme basıncı ve dielektrik seviyesi seçilmiştir. İşlem parametrelerini optimize etmek için Taguchi yaklaşımı kullanılmış ve çıkış tepkilerinin, tepe akımı ve dielektrik seviyesinden büyük ölçüde etkilendiği, ancak en az etkinin ise darbe süresi üzerinde olduğu gözlemlenmiştir [32].

Rao, 8mm çapında bakır elektrot kullanılarak AISI D2 çeliğinin EDM ile işlenmesi için önerilen en uygun işleme parametrelerini, İdeal Çözüme Benzerliğine Göre Tercih Sıralaması Tekniği -TOPSIS- (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) ile belirlemişlerdir. Taguchi'nin L9 OA metodu, toplamda 9 deneyi tasarlamak için adapte edilmiş ve vurum süresi, servo voltajı ve tepe akımı, giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Her bir parametrenin üç seviyesi, deneyleri tasarlamak için seçilmiştir. Ayçiçek tohumundan çıkarılan uçucu olmayan bir yağ yani ayçiçek yağı dielektrik sıvı olarak alınmıştır ve her bir deney için MRR, TWR ve SR değerleri, sonuç tepkisi olarak not edilmiştir. ANOVA, sonuç tepkileri üzerindeki her bir giriş parametresinin etkisi desteklemek için yapılmıştır. Analitik Hiyerarşi Süresi (Analytical Hierarchy Process), her bir tepkinin ağırlığını seçmek için kullanılmıştır ve çoklu kriterlerin karar analizi TOPSIS, AISI D2 çeliğinin işlenmesi için ideal parametrelerin tanımı için ilave edilmiştir [33].

Papazoglou, Markopoulos ve Manolakos'un çalışması, yaygın olarak kullanılan bir takım çeliği olan AISI O1 için EDM parametreleri ile işleme sonuçları arasındaki ilişkiyi araştırmayı amaçlamaktadır. Deneysel prosedür boyunca kullanılan ve değiştirilen işleme parametreleri, akım ve vurum süresidir. Malzeme kaldırma oranı hesaplanmış, yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş (ortalama pürüzlülük ve maksimum pürüzlülük), son olarak, yeniden katılaşmış tabakanın kalite ve morfolojisini belirlemek için mikroskop gözlemleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü, yani ortalama pürüzlülük ve maksimum pürüzlülük, işleme parametrelerine ve özellikle boşalım enerjisine bağlıdır. Bu bağımlılık, yüzey pürüzlülüğünün bir tahminini mümkün kılan ve böylece deney ihtiyacını azaltan, yarı deneysel korelasyonlar yoluyla ifade edilebilir. Beyaz katman, darbe başına deşarj enerjisi ile ilişkilidir. Daha detaylı olarak ifade edildiğinde, deşarj enerjisinin artırılması, daha kalın ve daha homojen bir beyaz katman ile sonuçlanır. Aynı zamanda, daha yüksek deşarj enerjisi, yüzey çatlağı oluşma olasılığının artmasına neden olduğu sonucu ifade edilmiştir [34].

Kumar, geleneksel elektrot ve toz metalurjisi yoluyla elde edilmiş elektrotu, EDM işlemi aracılığıyla malzemenin yüzey karakterizasyonunu değiştirmek amacıyla denemişlerdir. Buna ek olarak, toz partikülleri, işlem verimliliğini arttırmak için dielektrik ortama ilave edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışma ile, geleneksel ve kompozit malzemelerin her ikisinde yüzey karakteristiği ve işlemenin iyileşmesinde, dielektrik sıvı içerisindeki partiküllerin varlığının etkisi belirtilmiştir. Ayrıca, dielektrik ortama karıştırılmış partiküllerin sık sık işleme sırasında iş parçasının ergimiş metaline bağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sıkıştırılmış elektrottan partiküller, iş parçasına göç eder ve işleme prosesi süresince malzeme yüzeyinde oluşan mikro çatlakları, boşlukları ve yeniden katılaşmış tabaka oluşumunu azaltır. Böylece, EDM ile işlenmiş yüzey, karşılaştırılabilir bir şekilde daha az kusura sahiptir. Toz karıştırılmış ve kompozit elektrot kullanılmış EDM prosesinin, kusursuz yüzey oluşumuna yardımcı olduğu sonucuna varılabilmektedir. Son olarak, malzemenin mikro sertliği, yüzey pürüzlülüğü, aşınma direnci ve korozyon davranışı, bu modifikasyon tekniği kullanılarak iyileştirilmiştir [35].

Keskin'in çalışmasında, AA7075 matrisli farklı yüzdelerde B4C+SiC takviyeli kompozit malzemenin, toz katkılı EDM'de işlenmesini incelemiştir. Üç farklı akım değerinde, %5 ve %10 B4C+SiC takviyeli kompozit malzemeler üzerinde deneyler yapılmış ve yapılan deneyler sonrasında, iş parçası yüzeyindeki görüntüler SEM'de incelenerek yüzey

pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve incelemeler neticesinde, B4C+SiC takviyesinin yüzdesinin ve akım değerinin artması ile birlikte, iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün kötü etkilendiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durum, elektrik iletkenliğine sahip olmayan takviye malzemesinin (B4C+SiC) yüzdesindeki artışla birlikte akım boşalımında da düzensizliklerin meydana gelmesi olarak yorumlanmıştır. Ancak, takviye malzemesinin yüzey pürüzlülüğünü kötü etkilemesine rağmen, akım değerindeki artışın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi takviye malzemesinin etkisine oranla daha fazla olmuştur [36].

Çaydaş'ın çalışmasında, iki farklı metalik biyomalzeme olan Ti6Al4V ve Rex734 malzemelerinin EDM yöntemi ile işlenmesini incelemiş ve bu çalışma sonucunda, iş parçası yüzeyindeki, yüzey çatlak yoğunluğuna, artık tabaka kalınlığına, MRR ve Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) verilerindeki farklılıklara odaklanılmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, araştırmacılar, Ti6Al4V biyomalzemesinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzeydeki çatlak yoğunluğundaki en etkili parametrenin vurum süresi olduğu sonucuna varırken, talaş kaldırma ve artık tabaka kalınlığında bu parametrenin akım değeri olduğu sonucuna varmışlardır. Rex734 biyomalzemesi incelendiğinde ise, vurum süresi ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde büyük bir etkiye sahipken, akım değerinin ise, yüzey çatlak yoğunluğu, talaş kaldırma (MRR) ve artık tabaka kalınlığı tepki parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [37].

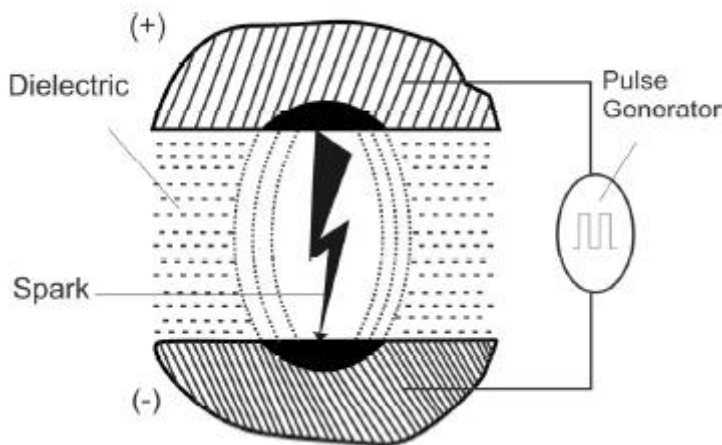
Kalyon çalışmasında, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin EDM 'de işlenmesi ile iş parçası yüzeyinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğünü incelemiştir. İşleme sırasında bakır elektrot tercih edilmiş ve işleme parametresi olarak vurum süresi ve akım değeri için üç farklı seviye denenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların neticesinde, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma oranı ve bağıl aşınma değerleri hesaplanmıştır. Son olarak ise, işlem sonrasında iş parçasının yüzeyi SEM ve mikroskop ile görüntülenmiştir. Toplanan bu veriler ile, boşalım akımının ve vurum süresinin, yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınma oranı değerleri üzerinde negatif etkiye sahip parametreler olduğu, iş parçası işleme hızı üzerinde ise olumlu etkiye sahip oldukları sonucuna varılmıştır [38].

Bu literatür araştırmasının ışığında, yeni sayılabilecek bir ters ısıtım işlem türü olarak kabul edilen kriyojenik işlemin uygulandığı ve uygulanmadığı AISI D2 takım çeliklerinin, aynı koşul ve parametrelerle, EDM'de işlenmesi sonucunda yüzey durumları arasında bir farklılık

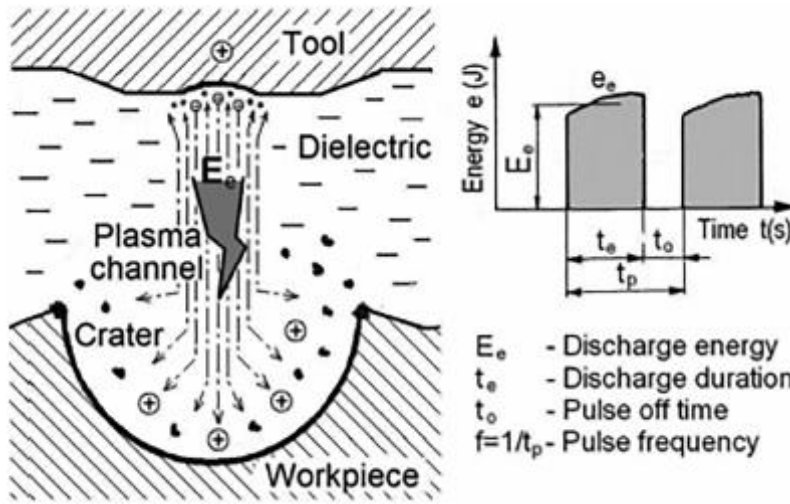
olup olmadığı ile ilişkili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma, aynı kimyasal kompozisyona sahip, yalnızca farklı sertlik ve farklı mikro yapı özellikleri gösteren bu iki malzemenin, EDM ile işlemede iş parçasında açılan deliklerin çaptan sapma değerleri ve işleme süresi üzerinde belirgin bir farklılığa yol açıp açmayacağı sonuçlarının incelenmesini amaçlamaktadır. Aynı zamanda, varyans analizi kullanılarak, hangi parametrelerin daha etkili olduğu bilgisinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

3. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME YÖNTEMİ

Elektro erozyon işlemi (EDM), iş parçası ile elektrot arasında fiziksel bir temas olmaksızın malzeme kaldırıldığı, bir elektro termal geleneksel olmayan işleme tekniğidir ve elektriksel iletkenliğe sahip sert malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Bu durumda, elektrik enerjisi, ısıya dönüştürülür [8]. Meydana gelen bu yüksek sıcaklık ile birlikte iş parçası ve elektrot arasında kıvılcımlar (Şekil 3.1) meydana gelir. İş parçası ile takım elektrot arasında yaklaşık $1,000 \approx 100,000$ kıvılcım/sn meydana gelir. Bu kıvılcımlar, iş parçasının yüzeyine vurur ve iş parçası yüzeyinde takım elektrot boyutunda iş parçasından malzeme kaldırılır [20]. Başka bir deyişle, meydana gelen yüksek sıcaklık, malzemede ergimeye ya da buharlaşmaya sebep olur ve böylece iş parçasından malzeme kaldırılır [29]. Bu sayede, kompleks geometriye sahip ve aynı zamanda oldukça sert malzemelerin, sertliğe bağlı kalmaksızın işlenebilmeleri mümkün olur. EDM işleminde, mekanizmanın nasıl çalıştığı daha detaylı incelendiğinde, işlenen iş parçası anot iken, elektron katottur (Resim 3.2). Buna bağlı olarak, dielektrik sıvıdan üretilen pozitif iyonlar katoda ve elektronlar anoda çarptığında, işleme anotu daha fazla aşınır. Daha hafif olan elektronlar, pozitif iyonlardan daha fazla enerji elde ederler ve böylece anotta daha yüksek malzeme çıkarılmasına neden olan daha yüksek hızlar elde edilir [20]. EDM işlemi sırasında, akışkan ortam işleme sırasında üretilen hidrokarbon gazları olduğundan, piroliz (malzemelerin asal bir ortamda yüksek sıcaklıklarda termal ayrışması) nedeniyle katot anottan çok daha fazla korunur. Bu gazlar, karbon partikülleri üretir ve bu partiküller katot üzerinde bir tabaka oluşturarak onu korur [20].

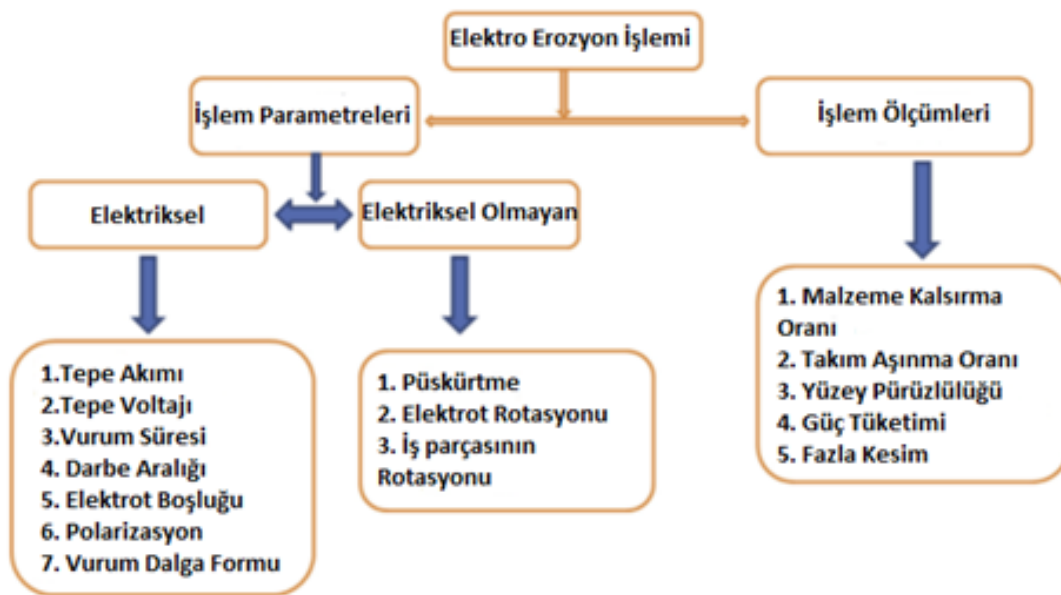


Şekil 3.1. EDM'de kıvılcım oluşumunun şematik gösterimi [29]



Şekil 3.2. Elektro erozyon işleminin (EDM) termo-elektrik modeli [8]

EDM in işleme karakteristiği, işleme parametrelerine bağlı olan MRR, TWR ve SR vasıtasıyla başlıca değerlendirilir. EDM durumundaki giriş parametreleri, elektriksel parametreler ve elektriksel olmayan parametreler olarak sınıflandırılır. Sınıflandırma Şekil 3.3’de verilmiştir. Elektriksel temelli parametreler, güç sağlayan bir sistem vasıtasıyla kontrol edilebilir ve parametreler, vurum süresi, vurum aralığı, akım, gerilim ve polarizasyon olarak adlandırılırlar ve elektriksel olmayan parametreler, püskürtme basıncı, elektrot rotasyonu, iş parçasının rotasyonu ve işleme süresi olarak adlandırılır [35].



Şekil 3.3. Elektro Erozyon İşlemi sırasında etkili parametrelerin bir şablonu [35]

Başlıca işlem ölçümleri olan MRR, TWR, EWR ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin denklemleri ise sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Performans karakteristikleri arasında, MRR, üretim hızıyla ilişkili olan EDM prosesinde önceliğe sahiptir. Bu, denklemde gösterildiği gibi işleme süresi ile ilgili olarak işleme süreci sırasında kaldırılan malzemenin ağırlığının hacmine dayalı olarak hesaplanabilir [35].

$$\text{Malzeme Kaldırma Oranı (MRR)} = \frac{\text{Malzeme kaldırma miktarı}}{\text{işleme süresi}} \quad (3.1)$$

TWR, işleme prosesinin verimliliğini arttırmak için yeterli kadar minimum olmak zorunda olan diğer bir ölçümdür. Öte yandan, takım aşınmasındaki bir artış takım maliyetini artırır, geometrideki doğruluğu azaltır ve bu da daha yüksek üretim maliyetine neden olur. TWR, takım malzemesinin aşınma miktarı ve işleme süresi arasındaki orandır [35].

$$\text{Takım Aşınma Oranı (TWR)} = \frac{\text{Takım aşınma miktarı}}{\text{işleme süresi}} \quad (3.2)$$

Elektrot aşınma oranı, malzeme kaldırma oranı ve takım aşınma oranı arasındaki oran olarak tanımlanır [35].

$$\text{Elektrot Aşınma Oranı (EWR)} = \frac{TWR}{MRR} \quad (3.3)$$

Bileşenlerin işlenmiş yüzeydeki kalitesi, yüzeydeki dalgalanmalara, pürüzlülüğe ve kusurlara bakılarak değerlendirilir. Yüzey pürüzlülüğü, çoğunlukla ölçüm için düşünülür ve genellikle ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) olarak tanımlanır. R_a , ortalama yüzeyden çeşitli noktalarındaki yüzey dalgalanmasının ortalama sapmasından hesaplanır [35].

Elektriksel olmayan, ancak işleme kalitesini oldukça etkileyen önemli parametrelerden biri seçilen elektrot malzemesidir, diğeri ise dielektrik sıvıdır. Elektrot malzemesi, doğal olarak elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler arasından seçilir ve bu malzemeler genellikle bakır, grafit, tungsten karbür gibi yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Takım malzemesi seçilirken, düşük elektriksel direnç, yüksek ergime noktası, iyi elektriksel iletkenlik, iyi işleme kabiliyeti ve düşük aşınma oranı gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır [20]. Dielektrik sıvı ise, işleme sırasında takım ile iş parçası arasında oluşan talaşı uzaklaştırmak için kullanılır [20]. İşlem sırasında oksidasyon kontrol edilmesi

ve önlenmesi gereken en önemli faktörlerden biridir. Oksidasyon, elektrotlar arasında, kötü iletkenlik oluşturarak işlemeyi engellemektedir ve bu nedenle, dielektrik yağ, daha yüksek dielektrik direncine sahip olmalıdır [35]. Dielektrik ortamın önemli işlevleri;

- (a) kıvılcım boşluğunda çok ince bir bölgedeki kıvılcım enerjisini yoğunlaştırmayı sağlamak,
- (b) takım elektrotun ve iş parçasının sıcaklığını azaltmaya yardımcı olmak,
- (c) kaldırılan malzemenin uzaklaştırılmasını sağlamaktır.

EDM işleminin, işleme özellikleri, dielektrik sıvıdan etkilenmektedir. Genellikle, kerosen, trafo yağı, deiyonize su ve EDM yağı gibi sıvılar, EDM işlemi için dielektrik bir ortam olarak kullanılır. İşleme alanı bölgesinde de kullanılırlar. Dahası, işleme sınırlarından, kaldırılan partikülleri uzaklaştırır ve takım elektrotun ve iş parçasını soğutur. Araştırmacılar, iyi bir dielektrik akışkanın temel özelliklerinin daha yüksek alev alma noktası sıcaklığı, oksidasyon kararlılığı, daha düşük maliyet, yeterli deşarj verimliliği, viskozite ve minimum koku olduğunu öne sürmektedirler. EDM işlemi için kullanılan farklı dielektrik sıvı türleri hidrokarbon yağı (yağ, kerosen, mineral ve transformatör yağı), su (deiyonize su, musluk suyu), gaz ve sıvı-gaz karışımıdır [35].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliği (DIN 1.2379)

Deneyde kullanılan iki tip AISI D2 takım çelikleri ticari olarak temin edilmiştir. Çeliklerin her ikisi de belirli bir aşamaya kadar aynı şart ve koşullarda imal edilmiş, sonrasında numunelerden biri katı karbondioksit ile yaklaşık $\approx 203\text{ K}$ ' de bekletilerek ters ısı işlem olarak tanımlanan, kriyojenik işleme maruz kalmıştır.

Malzeme içerisine ilave edilen alaşım elementleri, östenitteten martenzite geçiş sıcaklığının oda sıcaklığının altına düşmesine sebep olur. Geleneksel ısı işlem (CHT) uygulamaları sonucunda mikro-yapısı, çita martenzit, çeşitli karbürlerden ve kalıntı östenitten oluşmaktadır. CHT sonrasında, AISI D2 takım çeliği, ultra yüksek dayanım ve mükemmel aşınma direnci göstermektedir, ancak, düşük sünekliğe sahiptirler. Isıl işlem prosesi boyunca ($\approx 773\text{K}$ – dip kriyojenik) kalıntı östenitin, ferrit ve sementite (Fe_3C) ayrışması, bu alaşımın sünekliği kaybetmesiyle ilişkilidir. AISI D2 çeliğinin martenzit başlama ve bitiş sıcaklığının sıfırın altında sıcaklık olduğu kabul edilir ve kalıntı östenit miktarını azaltmak için, ek bir adım, kriyojenik soğutma, martenzit bitiş sıcaklığına ulaşmasını garanti etmek için kullanılır ve bu yüzden martenzitin maksimum hacim oranı elde edilir [39].

Takım çelikleri, aşınma direnci ve tokluğun yanı sıra yüksek dayanımın istendiği uygulamalar için modern endüstride oldukça fazla kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar, krom vanadyum, molibden ve tungsten gibi alaşım elementlerinin nispeten büyük miktarları ile karakterize edilirler ve her bir alaşımın özel ısı işlemi vasıtasıyla üstün mekanik özellikler içerirler. Takım çeliklerinin geleneksel ısı işlemleri, malzeme östenitik bölgedeyken su verilmesi ve ardından tekli ya da ikili temperlemeyi içerir. Bu çeliklerin son mikro-yapıları, martenzit matris, birincil karbürler, ikincil karbürler (temperleme işlemi sırasında oluşan) ve istenmeyen kalıntı östenitten oluşmaktadır [40].

Kriyojenik işlem, aşınma direncini geliştirmek için ve aslında mikro yapıdaki kalıntı östenitin transferinin sağlanması niyetiyle yapılan takım çeliklerinin geleneksel ısı işlemlerine ek bir prosestir. Bu proses, malzemenin sıvı nitrojen sıcaklığına (77 K) soğutulmasını, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesini, sonrasında oda sıcaklığına yükseltilmesini ve takibinde son temperlemesini içermektedir. Soğuk iş takım çeliklerinin,

yüksek hız çeliklerinin, karbon çeliklerinin ve paslanmaz çeliklerin bir kısmına kriyojenik işlem uygulanmıştır ve raporlar, bu çeliklerin aşınma dirençlerinde önemli bir miktarda gelişme meydana geldiğini göstermektedir [40]. Bu çalışmada kullanılan kriyojenik işlem görmüş numune, maliyetli olması sebebiyle, nitrojen (77 K) yerine katı karbondioksit (≈ 203 K) tercih edilerek üretilmiş, işlem görmüş son haliyle temin edilmiştir.

Literatür incelemeleri sonucunda da kriyojenik işlemin, AISI D2 takım çelikleri üzerindeki etkileri ile ilgili çokça çalışmalara rastlanmıştır. Bunlardan bazıları; Ghasemi Nanesa & Jahazi, 2015’de yaptığı bir çalışmada, Dilatometre (fiziksel veya kimyasal bir işlemin neden olduğu hacim değişikliklerini ölçen bilimsel bir araçtır) sonuçları, AISI D2 takım çeliğinin geleneksel ısıtıl işlemi süresince alternatif bir faz transfer yolu gösterilen mikro-yapı araştırmalarıyla birleştirilmiştir. Geleneksel olarak inanılan martenzitik dönüşüm yerine, elde edilen mikro-yapı, alanı $1 \mu\text{m}^2$ ’nin altında olan daha yüksek hacimli karbürler, allotriomorfik ferrit, Widmanstätten ferrit, sivri uçlu ferrit ve çoğunlukla beynitten oluşuyordu. Ayrıca, incelenen D2 çeliğinin oda sıcaklığına soğutmanın, tamamen martenzit ya da beynit mikro yapı elde etmek için yeterli olmadığı ve kalıntı östenitin soğutmadan sonra da yapıda mevcut olacağı bulunmuştur [39]. Bir diğer çalışmayı yine Ghasemi Nanesa & Jahazi 2014 yılında gerçekleştirmiştir ve çalışmalarında AISI D2 çeliğinin mekanik özellikleri ve mikro-yapı değişiminin üzerindeki kriyojenik ısıtıl işleminin etkileri çalışılmış ve geleneksel ısıtıl işlem ile karşılaştırılmıştır. Eş zamanlı, süneklik ve daha yüksek elastik modül ile birlikte sertlikteki gelişmeler, kriyojenik ısıtıl işlem görmüş alaşımda elde edilmiştir. Martensitte daha düşük karbon içeriği ve ortalama $1 \mu\text{m}$ ’nin altında çapa sahip karbürlerin daha homojen dağılımıyla birlikte, daha yüksek hacim oranı, ısıtıl işlem uygulanmış alaşımda mekanik özelliklerin gelişiminde büyük katkı sağlamıştır. Ayrıca, su verme işleminden sonra meydana gelen kalıntı östenitin, kriyojenik sıcaklıkta martensite geçişi, daha yüksek dayanıma ve sertliğe sebep olmaktadır. Kriyojenik ısıtıl işlemin uygulanması, çökeltinin kabalaşmasını geciktirir, böylece, çekme geriliminde kayıp olmadığı gözlemlenir [40]. Son olarak, Das et al., 2009’daki çalışmada, derin mikro-yapı analizi vasıtasıyla, dip kriyojenik işlem ile AISI D2 çeliğinin aşınma direncinin artmasından sorumlu, altta yatan mekanizmaların ortaya çıkarılmasını amaçlamaktadır ve böylece, yaşlandırma ve geleneksel ısıtıl işlemin referansı ile birlikte dip kriyojenik işlemin aşınma davranışının mikro-yapı ile bağlantısını sağlanmaktadır. Sonuçlar, dip kriyojenik işlemin, geleneksel ısıtıl işlem yöntemi ve yaşlandırma tekniğine kıyasla, seçilen çeliğin aşınma direncini belirgin bir şekilde iyileştirdiğini belirtmektedir. Beyaz katman oluşumu ve sonraki

katman ayrışmasını, etkili aşınma mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Aşınma davranışı ile, ikincil karbürlerin çökeltme davranışındaki modifikasyon ve mikro-yapıdaki kalıntı östenit içeriğindeki azalma (ki bunlar dip kriyojenik işlem ile takım çeliğinin aşınma direncinin artırılmasını yöneten mekanizmalardır) açık bir şekilde bağlantı kurulabilir [41]. Bu araştırmalar ışığında, ticari olarak elde edilen numunelerin ilk olarak spektral analizde kimyasal kompozisyonları (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2) incelenmiştir. Daha sonra bu numunelerin sertlik değerleri (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4) ölçülmüş ve kriyojenik işlem görmüş numunede belirgin bir sertlik artışı gözlenmiştir. Bu veriler, yapılmış diğer çalışmaları da desteklemektedir.

Çizelge 4.1. Kriyojenik işlem uygulanmış AISI D2 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu [42]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	%	%	%	%	%	%	%
1	1,424	0,340	0,422	<0,0010	<0,0010	>7,200	0,826
2	1,514	0,324	0,436	<0,0010	<0,0010	>7,200	0,845
3	1,467	0,323	0,413	<0,0010	<0,0010	>7,200	0,833
Ø	1,468	0,329	0,424	<0,0010	<0,0010	~7,200	0,835
	Ni	As	Co	Sn	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
1	0,149	0,0089	0,032	<0,0010	0,856	0,114	88,63
2	0,146	0,0084	0,031	<0,0010	0,891	0,107	88,49
3	0,147	0,0080	0,032	<0,0010	0,860	0,115	88,60
Ø	0,147	0,0084	0,032	<0,0010	0,869	0,112	88,57

Çizelge 4.2. Kriyojenik işlem uygulanmamış AISI D2 takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu [42]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	%	%	%	%	%	%	%
1	1,561	0,469	0,533	<0,0010	0,0016	>7,200	0,670
2	1,612	0,512	0,534	<0,0010	0,0032	>7,200	0,712
3	1,626	0,481	0,531	<0,0010	0,0015	>7,200	0,684
Ø	1,600	0,487	0,533	<0,0010	0,0021	~7,200	0,689
	Ni	As	Co	Sn	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
1	0,200	0,0096	0,021	<0,0010	0,774	0,049	88,51
2	0,201	0,011	0,022	0,0016	0,814	0,055	88,32
3	0,197	0,010	0,021	0,0013	0,785	0,056	88,41
Ø	0,199	0,010	0,021	0,0013	0,791	0,053	88,41

Çizelge 4.3. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin farklı bölgelerden alınmış sertlik değerleri [42]

Rocwell sertlik Değeri (HRC)	
1.Bölge	29,15
2.Bölge	39,36
3.Bölge	35,14
4.Bölge	28,48
5.Bölge	33,66
6.Bölge	41,30
7.Bölge	45,18
8.Bölge	46,15
9.Bölge	46,34
10.bölge	41,64
ORTALAMA	38,64

Çizelge 4.4. Kriyojenik işlem görmüş numunenin farklı noktalarından alınmış sertlik değerleri [42]

Rocwell sertlik Değeri (HRC)	
1.Bölge	56,99
2.Bölge	57,28
3.Bölge	59,03
4.Bölge	58,88
5.Bölge	57,73
6.Bölge	57,73
7.Bölge	56,10
8.Bölge	55,98
9.Bölge	58,40
10.bölge	57,66
11.Bölge	57,37
ORTALAMA	57,55

4.2. Elektrot

Çalışmada gerçekleştirilen elektro erozyon deneylerinde 99.9% saflıkta bakır elektrot malzemesi ticari olarak elde edilmiştir. Bakır malzemenin dalma yüzeyi Ø8mm olacak şekilde tornalanmıştır. İki farklı iş parçası, üç farklı vurum süresi ve üç farklı akım değerlerinin her birinde yeni bir takım ucu kullanılmış ve bu çalışma için toplamda 36 takım ucu hazırlanmıştır. Bu takım uçlarının her biri işlem öncesinde ve işlem sonrasında tartılmıştır. EDM işlemi sonrası elektrotun görüntüsü Resim 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. EDM işlemi sonrası elektrotun görünümü

4.3. EDM Deneyleri

EDM deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan CHARMILLES D20 EDM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın fotoğrafı Resim 4.2’de verilmiştir. EDM deneylerinde, dielektrik sıvı ortamında, 5 bar basınçla, gaz yağı olarak da bilinen kerosen kullanılmıştır.



Resim 4.2. Elektro Erozyon Cihazı

4.4. EDM Parametreleri ve Belirlenmesi

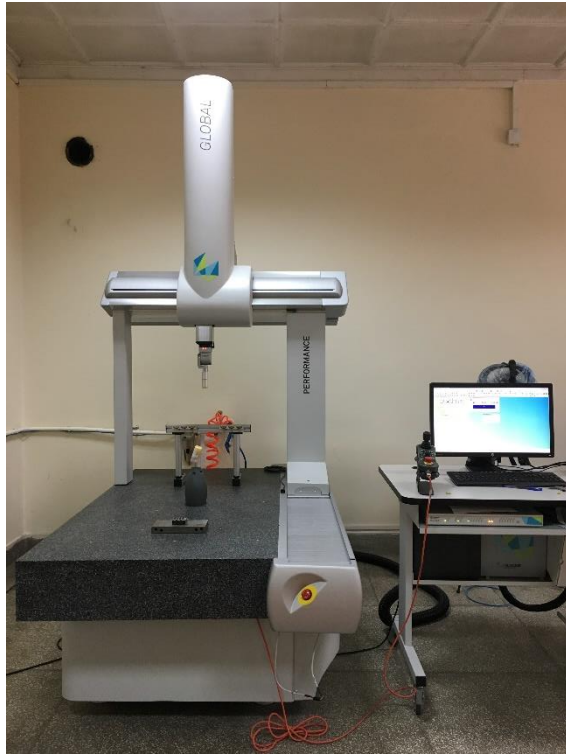
Yapılan literatür araştırması sonucunda, EDM’de işleme süresi ve parça kalitesi üzerinde en etkili parametrelerin akım ve vurum süresi olduğu görülmüştür. Bundan dolayı, yapılan çalışmada, akım ve vurum süresi değişken olarak kabul edilmiştir. Bu iki değişken için, kabul edilen işleme parametreleri Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. EDM işleminde uygulanan parametreler ve değerleri

Akımı (A)	4, 8, 16
Vurum Seviyesi veya Süresi (μ s) (T_{on})	2 (6 μ s), 5 (50 μ s), 8 (400 μ s)
Vurum Aralığı (μ s) (T_{off})	2 (6 μ s)
Kutuplama	Elektrot (-), İş parçası (+)
Elektrot Cinsi	Bakır (99,9% saflıkta)
Dielektrik Püskürtme	Yandan Püskürtme (5 Bar)

4.5. Çaptan Sapma Ölçümleri

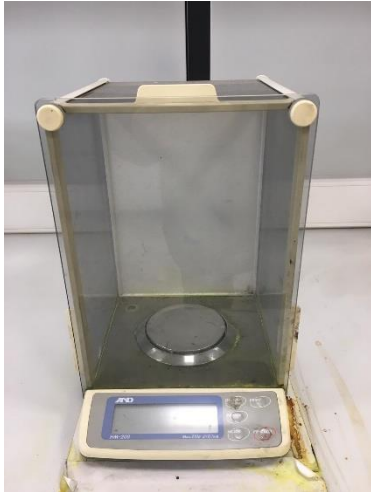
Çaptan sapma ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan CMM cihazı (Resim 4.3) ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle numuneler cihaza yerleştirilerek koordinatları belirlenmiştir. Daha sonra, ölçümler için 3mm çapındaki hassas uç tercih edilmiştir. Bu uç, deney sonucunda meydana gelen her bir deliğin içine yaklaşık 1,5mm derinlikte dalarak, üç farklı noktadan ölçüm yapmıştır. Bu işlem, elde edilmek istenen $\varnothing$ 8mm çaptan ne kadar sapma olduğunun belirlenmesinde yardımcı olmuştur.



Resim 4.3. CMM Cihazı

4.6. Takım Aşınma Oranının (TWR) Hesaplanması

Bu deneysel çalışmada, her bir EDM işlemi için farklı elektrotlar kullanılmıştır. Bu işlem, numunelerin kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş olmasının, elektrottaki aşınma oranı üzerinde etkisinin olup olmadığını inceleme amacıyla yapılmıştır. Her bir elektrot, işleme öncesinde ve sonrasında hassas terazide (Resim 4.4) tartılmış, aralarındaki fark, gram cinsinden aşınma miktarını vermektedir. Tartma işlemi, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında AND HM-200 marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar yapılırken aşınma miktarı gramdan mikrograma (mg) çevrilmiştir. TWR değeri, elde edilen bu aşınma miktarının, bu elektrotla gerçekleştirilen işleme süresinin dakika cinsinden oranına eşittir ve hesaplama için kullanılan denklem, Eş. 3.2’de verilmiştir.



Resim 4.4. Hassas terazi

4.7. Metalurjik İncelemeler

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, aynı akım ve vurum süresi parametrelerine sahip iki farklı iş parçasının karşılaştırılabilmesi için, işleme yüzeylerinin görüntüleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölümü Laboratuvarında bulunan JEOL JSM-6060LV SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı (Resim 4.4) ile görüntülenmiştir. En yüksek ve en düşük akım ve vurum süresindeki işlem için kullanılan iki elektrot rastgele seçilmiş ve yine aynı cihazda SEM görüntüleri ve kimyasal içeriklerinin incelenmesi için EDS verileri elde edilmiştir.



Resim 4.5. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı

4.8. Varyans Analizi

Yapılan çalışmada, kullanılan parametrelerin, takım aşınma oranı (TWR), işleme süresi ve çaptan sapma üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla, varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, kullanılan parametrelerin etki oranları ve birbirleriyle etkileşimleri değerlendirilmiştir. Varyans analizini daha detaylı tanımlamak gerekirse; değişkenler arasındaki etkileşimin ne kadar önemli olduğu etkili bir şekilde ölçülür; varyansı analiz edilir. Ölçülen değişkenler arasında önemli bir fark olmadığını belirten bir boş hipotez (H_0) oluşturularak başlanır. Test istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar verirse, sıfır hipotezi reddedilebilir ve değişkenler arasındaki etkileşimin anlamlı olduğunu belirterek alternatif hipotezi (H_1) kabul edilebilir. F istatistiği, sonuçların anlamlı olup olmadığını bize söyleyen ANOVA katsayısıdır. 1 civarında bir F değeri, değerlerde çok az fark olduğunu veya hiç fark olmadığını gösterir; yani gruplar arasında anlamlı bir farklılık yoktur [45].

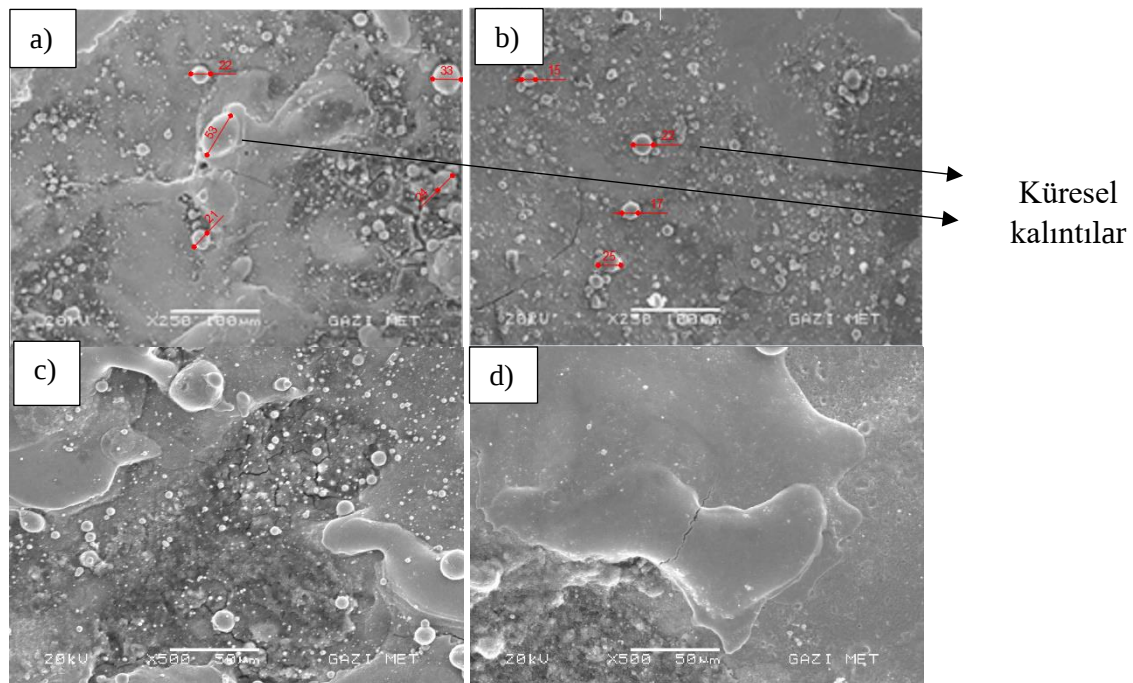
5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. SEM Görüntüleri

Bu bölümde, işlenmiş numunelerin yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri incelenmiş ve literatürdeki çalışmalar referans alınarak yorumlanmıştır. Buna ek olarak, en düşük akım (4A) ve vurum seviyesinde (2 (6 μ s)) kullanılan elektrotlar ile en yüksek akım (16A) ve vurum seviyesinde (8 (400 μ s)) kullanılan elektrotların yüzey durumları SEM’de incelenmiş ve yorumlanmıştır.

5.1.1. İşlenen yüzeylerin SEM görüntüleri

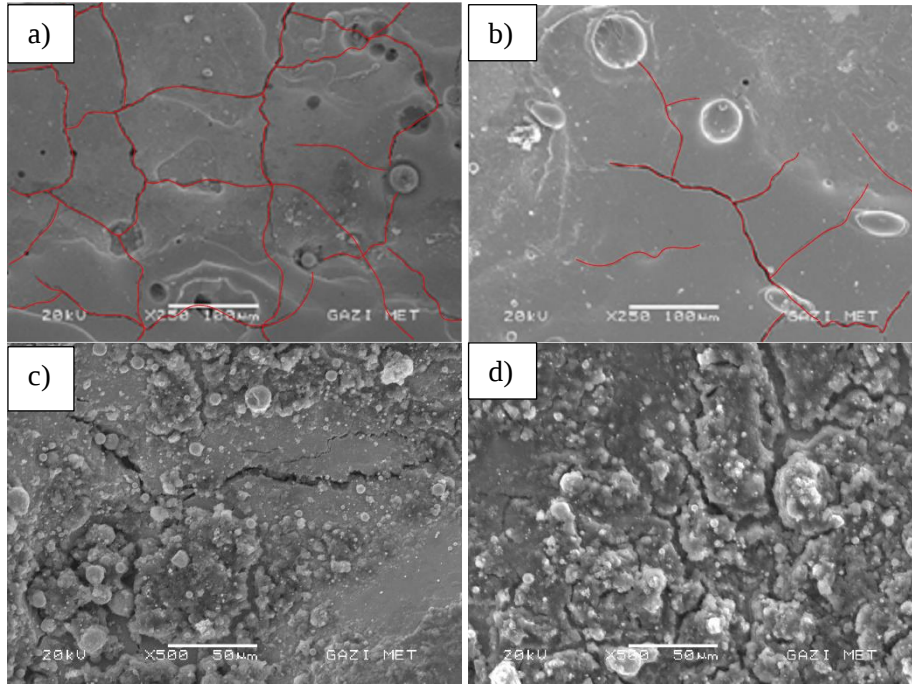
Yapılan çalışmada, farklı akım (4A, 8A, 16A) değerlerinde ve farklı vurum seviyelerinde (2,5,8) yapılan, EDM deneylerinden elde edilen işleme yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntülerinden parçaların yüzey durumları ve yeniden katılaşmış tabaka üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Akım değeri 4A ve vurum seviyesi 2 olarak alındığında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen SEM görüntüleri Resim 5.1’de verilmiştir.



Resim 5.1. 4A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Resim 5. 1’de görüldüğü üzere, (a) ve (b) görselleri karşılaştırıldığında, aynı akım ve vurum süresi değerlerinde kriyojenik işlem görmemiş takım çeliğinde, EDM işlemi sonrasında meydana gelen küreciklerin boyutu daha büyükken, kriyojenik işlem görmüş numunede (b) bu kürecikler yüzeyde daha küçük ve homojen olarak dağılmıştır. Küresel kalıntılardaki boyutsal farkın daha net anlaşılması için, Resim 5.1 (a) ve (b) görüntüleri üzerinde kürelerin sahip olduğu en uzun kısımların μm cinsinden değerleri üzerlerine yazılmıştır.

EDM ile işlemede, kriyojenik işlemin yüzey durumuna ve numunenin boyutsal doğruluğuna etkisinin incelendiği bu çalışmada, akım 4A ve vurum seviyesi 5 ikenki kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin SEM görüntüleri Resim 5.2’de verilmiştir.

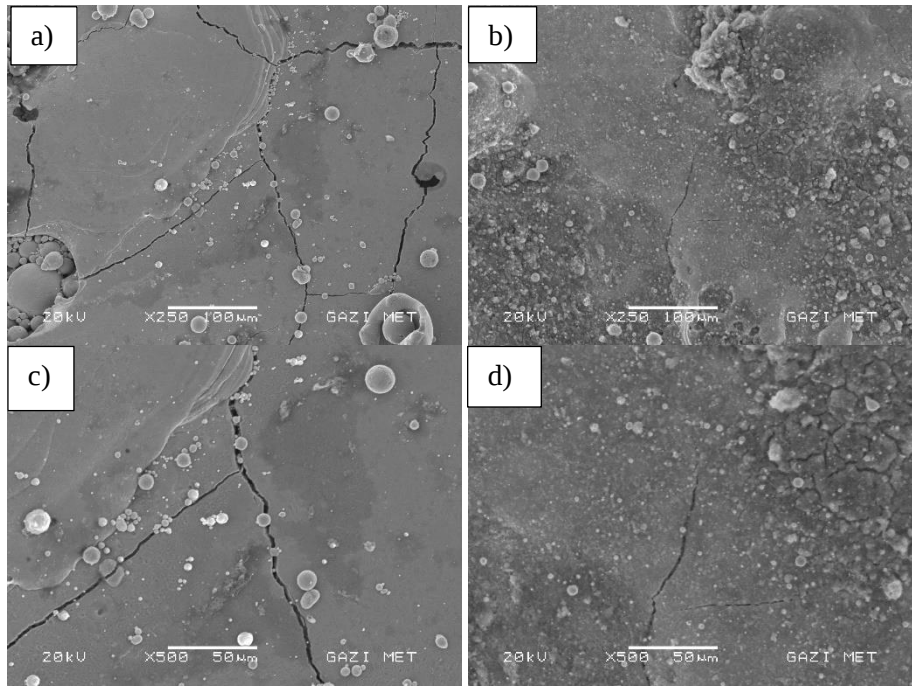


Resim 5.2. 4A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Resim 5.2 incelendiğinde, kriyojenik işlem görmemiş (a) ile kriyojenik işleme maruz kalmış (b) karşılaştırıldığında, kriyojenik işlem görmüş numunenin yüzeyindeki çatlak boylarının daha kısa olduğu ve çatlak dağılımının ve çatlakların uzamasının engellendiği belirgin bir şekilde görülmektedir. Prabhu ve Vinayagam çalışmalarında, mikro çatlakların termal stresin sonucunda meydana geldiği bilgisini vermektedirler. İşleme yüzeyindeki kalıntı gerilmenin öncelikli sebebinin, şiddetli ısınma ve soğuma oranı ve homojen olmayan sıcaklık dağılımı olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak, EDM yüzeyindeki morfoloji,

uygulanmış boşalım enerjisine bağlı olduğu bilgisi de bu çalışmada elde edilmiştir [3]. Başka bir makalede yapılan çalışmada, takım ucundaki aşınmayı azaltmak adına bakır takımının ucuna kriyojenik işlem uygulanmış ve işlem uygulanan takım ve işlem görmemiş takım arasındaki takım aşınma oranları incelenmiştir. R. Choudhary bu çalışmasının sonucunda, kriyojenik işlem uygulanmış takım ile iş parçası arasındaki ısı dağılımının, ek bir ısı işlem görmemiş elektrota kıyasla daha eşit olduğu tespit edilmiştir [26]. Mevcut çalışmada, Resim 5.2 (b)'de meydana gelen çatlaklardaki azalmanın, yapıda ısının daha homojen dağıldığı için meydana geldiği sonucuna varılabilir. Kriyojenik işlem görmemiş numune (Şekil 5.2.a) üzerinden yapılan çatlak boyu ölçümlerinde, görüntünün alındığı $0,2 \text{ mm}^2$ 'lik alanda toplam çatlak boyu $3295 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Kriyojenik işlem görmüş numune üzerinden yapılan çatlak boyu ölçümlerinde ise toplam çatlak boyu $1200 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu sonuç kriyojenik işlem görmüş numunede birim alanda ölçülen toplam çatlak boyunun yaklaşık olarak %64 oranında azaldığını göstermektedir.

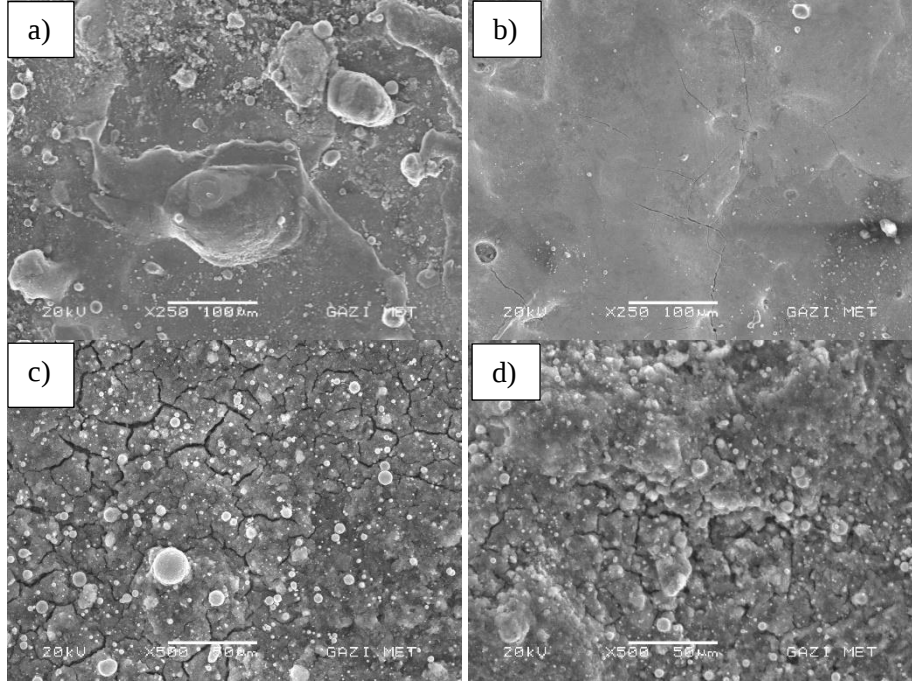
Kriyojenik işlemin EDM ile işlemede etkiye sahip olup olmadığının araştırıldığı bu çalışmada, akım 4A vurum seviyesinin 8 olduğu durumdaki EDM ile işleme sonrasındaki numunelerin yüzey durumları SEM'de incelenmiş ve Resim 5.3'de gösterilmiştir.



Resim 5.3. 4A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

İncelenen Resim 5.3, kriyojenik işleme maruz kalmış numunelerde (b ve d) çatlak yoğunluğunda belirgin bir azalmanın söz konusu olduğunu göstermektedir.

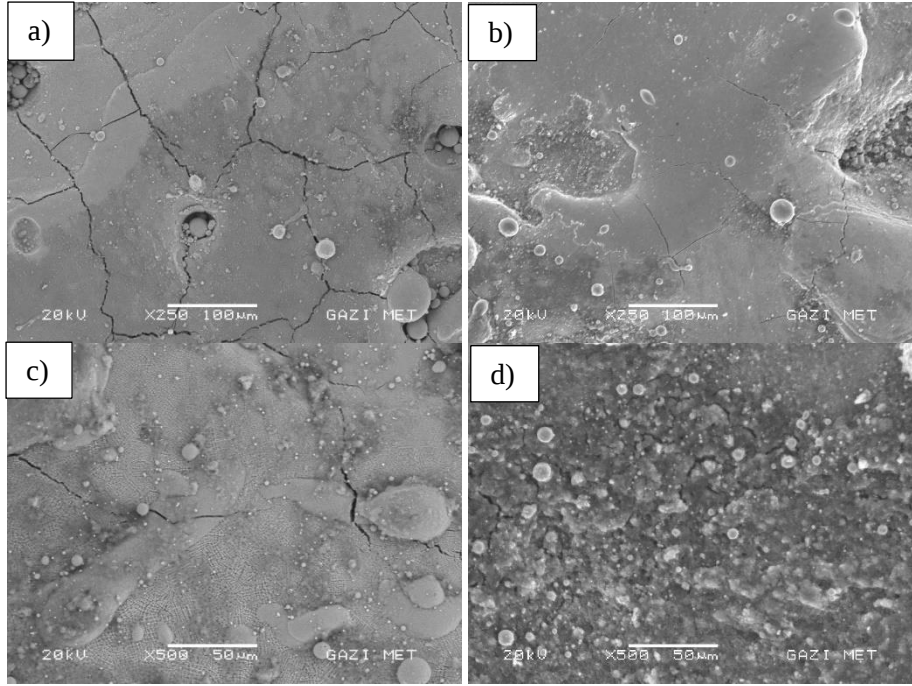
Resim 5.4’de akımın 8A’ya yükseltilip, vurum süresinin 2. seviyeye ayarlanarak kriyojenik işleme tabii tutulmuş ve kriyojenik işlem görmemiş numuneler üzerinde işleme sonrasında elde edilen işleme yüzeyleri verilmiştir.



Resim 5.4. 8A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Verilen SEM görüntülerinde (Resim 5.4), (a) ve (b) görüntüleri karşılaştırıldığında (b)’de (a)’ya nazaran daha iyi bir yüzey elde edildiği açıkça görülmektedir. (c) ve (d) görüntülerine bakıldığında ise kriyojenik işlem görmemiş (c) numunede, kriyojenik işlem görmüş numuneye kıyasla çokça mikro çatlakla sahip olduğu görülmektedir.

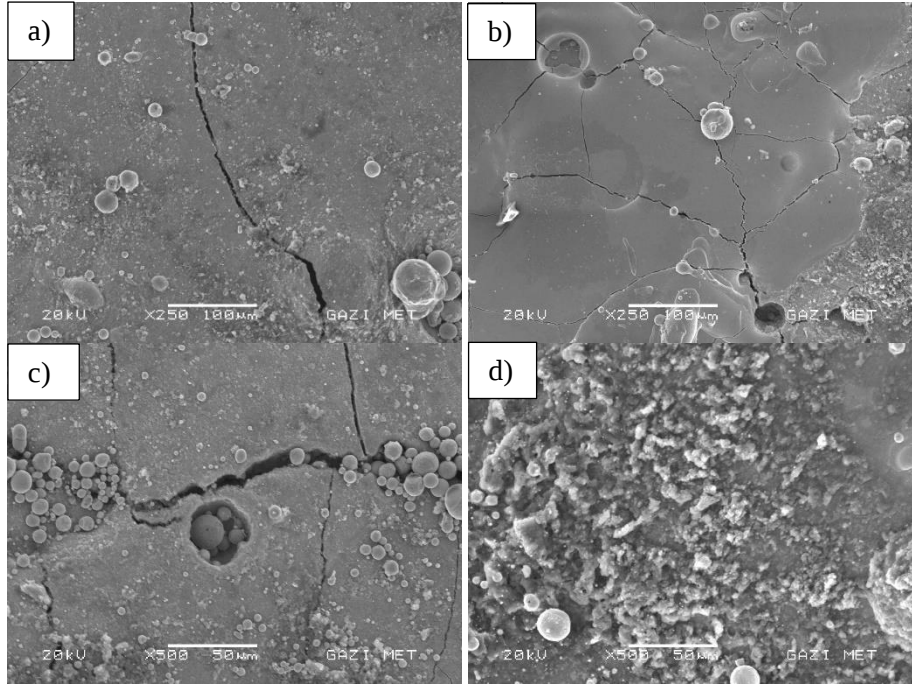
Resim 5.5’de akım değerinin 8A, vurum seviyesinin 5 olduğu durumdaki yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu resim, kriyojenik işlem görmüş numunenin, EDM ile işlemede etkisinin en belirgin görüldüğü bir SEM görüntülerinden biridir.



Resim 5.5. 8A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Kriyojenik işlem görmüş numunenin (Resim 5.5 b ve d) EDM ile işlenmesinde elde edilen yüzey kalitesinin, kriyojenik işlem görmemiş numuneye (Resim 5.5 (a) ve (c)) nazaran çok daha iyi olduğu Resim 5.5’de net bir biçimde görülmektedir.

Mevcut çalışmadaki, kriyojenik işlemin EDM ile işlemede malzemenin işlenebilirliğine etkileri incelenmiş ve SEM görüntüleri değerlendirilmiştir. Resim 5.6’da da akım değeri 8A, vurum süresi seviyesinin de 8 olduğu durumdaki iş parçalarının yüzey görüntüleri verilmiştir.



Resim 5.6. 8A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Resim 5.6'ya bakıldığında, kriyojenik işleme tabii tutulmamış iş parçalarında (a ve c) çatlak boylarının, kriyojenik işlem görmüş numuneye kıyasla, oldukça uzun olduğu kolayca söylenebilmektedir. Buna ek olarak, kriyojenik işlem görmüş numunede (b) mikro çatlakların oldukça kılcal oldukları görülürken, kriyojenik işlem görmemiş numuneye (a ve c) bakıldığında bu çatlakların çok daha geniş olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Bu çatlakların geniş olmaları aynı zamanda çatlak derinliğinin daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bu SEM görüntüsü, Pragadish'in 2014'de yapmış olduğu çalışmada elde ettiği, çatlak uzunluğunda, EDM işleminde akım ve voltaj değerleri arttıkça, artış gözleneceği bilgisinin de desteklemektedir [4]. Guu'un yapmış olduğu çalışmada, artan boşalım enerjisi ile yüzeydeki çatlakların derinliğinin arttığı ve çatlakların derinliğinin işleme hasarının kalınlığı ile ilişkili olduğu ifadelerini kullanmıştır [2]. Boşalım enerjisi ise, akım, voltaj ve vuruş süresinden etkilenmektedir ve Eş. 5.1'de matematiksel ifadesi verilmiştir [3].

$$Q = I \times V \times T_{on} \quad (5.1)$$

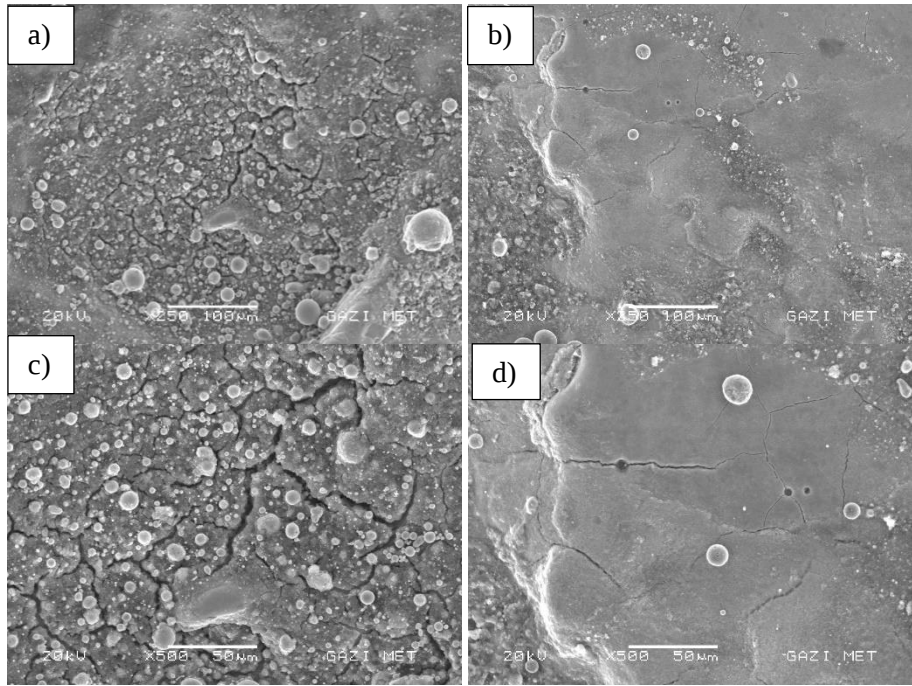
I: Akım

V: Voltaj

T_{on} : Vuruş süresi veya seviyesi

Bu eşitlik göz önünde bulundurulduğunda, mevcut çalışmada voltaj değeri her deneyde sabit tutulduğu için akım ve vurum süresinin boşalım enerjisinde oldukça etkili olduğu ve buna bağlı olarak çatlak derinliğinde bir artış olduğu görülmektedir.

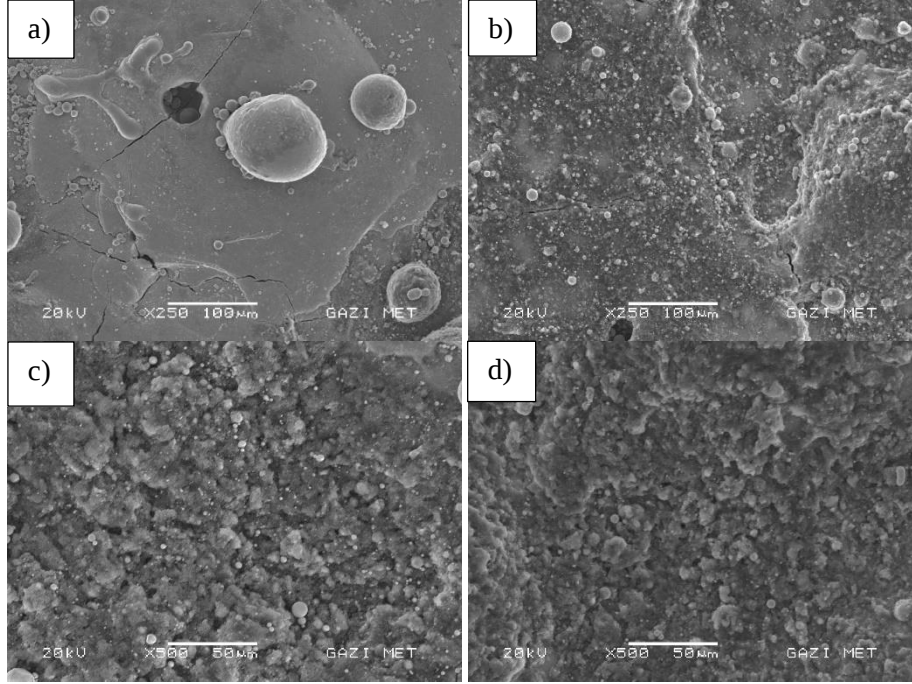
Farklı akım ve vurum sürelerinde gerçekleştirilmiş mevcut çalışmada en yüksek akım değeri olan 16A’da üç farklı vurum seviyesinde (2,5,8) değerlendirilmiş ve kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerin SEM görüntüleri değerlendirilerek yorumlanmaya çalışılmıştır.



Resim 5.7. 16A ve T_{on} 2 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Kriyojenik işlem görmüş numunelerde, diğer SEM görüntülerinde olduğu gibi, kriyojenik işlem görmemiş numunelere nazaran daha az çatlaklar gözlenmiş ve gözlenen çatlakların kılcal olduğu ve bu çatlakların genişleyerek ilerlemedikleri Resim 5.7’de belirgin olarak görülebilmektedir.

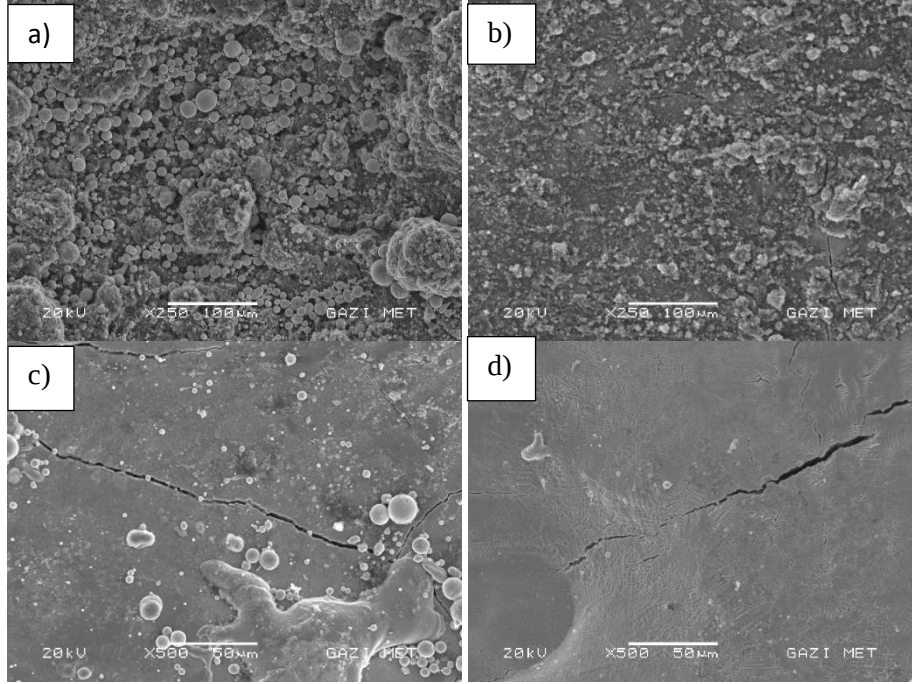
Resim 5.8’de akım 16A, vurum seviyesi 5 olduğu koşuldaki işleme görüntüleri verilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numuneleri SEM görüntüleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Resim 5.8. 16A ve T_{on} 5 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

Resim 5.8 detaylı bir şekilde incelendiğinde, kriyojenik işlem görmemiş numunede (a) küresel şeklindeki kalıntıların, X250 büyütmede, kriyojenik işlem görmüş numuneye kıyasla oldukça büyük oldukları, kriyojenik işlem görmüş numunede ise bu küreciklerin daha küçük ve homojen dağıldıkları açık bir biçimde görülebilmektedir. X500 büyütmedeki görüntüler incelendiğinde ise iki numune arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş her iki numune içinde akım arttıkça yüzeydeki çatlak yoğunluğunda azalma olduğu gözlemlenmiştir. 2015’de yapılan bir çalışmada, akımdaki artışın çatlak yoğunluğunu azalttığına dair net bir ifade kullanılmış ve akımın yüzey çatlak yoğunluğuyla ters orantılı olduğu, akımdaki artışın, boşlukları doldurma eğiliminde olan erimiş metalin tabaka kalınlığına yol açtığı ve böylece çatlak yayılmasının azaldığı belirtilmiştir [43].

Kriyojenik işlemin EDM ile işlemede yüzey kalitesine etkisinin değerlendirildiği bu çalışmada Resim 5.9’da en yüksek akım (16A) ve en yüksek vurum seviyesindeki (8) işleminin, iş parçası yüzeyindeki SEM görüntüleri verilmiştir.

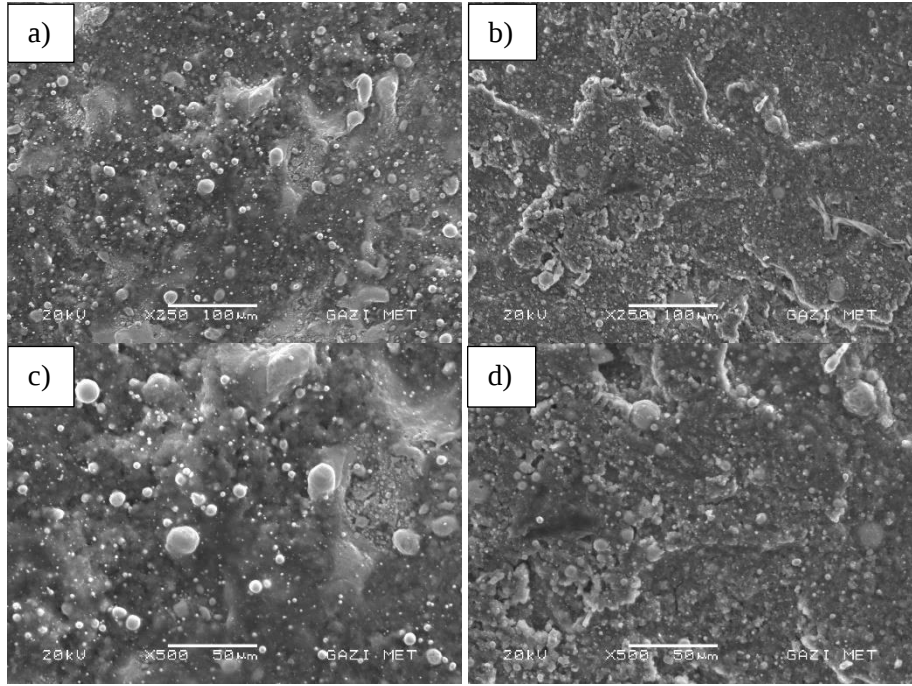


Resim 5.9. 16A ve T_{on} 8 değerlerinde EDM ile işleme sonrasında elde edilen AISI D2 takım çeliğinin (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş, (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş numunelerin x250 ve x500 büyütmede SEM görüntüleri

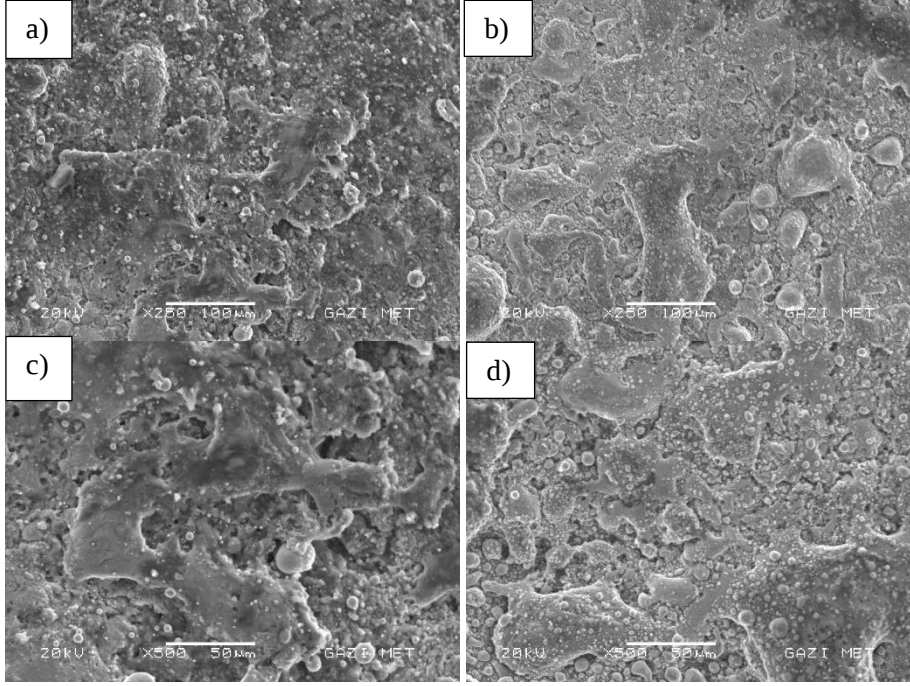
Resim 5.9'a daha yakından bakıldığında ise, diğer SEM görüntüleriyle benzer sonuçlar olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem görmüş numunede (d), çatlak uzunluğunun, kriyojenik işlem görmemiş numuneye (c) nazaran daha kısa olduğu aşıkardır. Mikro çatlakların oluşumu, malzemenin ısı iletkenliğine, ergime noktasına ve mukavemeti ile kırılma tokluğu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir [14]. Bu bağlamda, kriyojenik işleme bağlı olarak, aynı kimyasal kompozisyona sahip olmasına rağmen, sertlik ve kırılma tokluğu, değişen numune ile kriyojenik işleme maruz kalmamış malzeme arasında, mikro çatlakların, işleme sonucunda belirgin biçimde azalmasının sebebini açıklamaktadır. Bu bilgilere ek olarak, verilen bütün SEM görüntüleri incelendiğinde, akım değerlerinin aynı olduğu ancak vurum sürelerinin en yüksek olduğu durumlarda, vurum süresindeki artışa bağlı olarak, yüzey çatlak yoğunluğunun arttığı, aynı zamanda, yüksek vurum değerlerindeki SEM görüntülerine detaylı bakıldığında, çatlak boy ve genişliklerinde, buna bağlı olarak çatlak derinliklerinde de bir artış görülebilmektedir. E.L. Papazoglou 'da yapmış olduğu çalışmada, darbe enerjisindeki artışla çatlak yoğunluğunun arttığını belirtmiştir [34].

5.1.2. Elektrotların yüzey SEM görüntüleri

Yapılan deneysel çalışmada, her bir işlem için bir defaya mahsus elektrotlar kullanılmış ve her deney (aynı vurum seviyesi ve aynı akım değeri) iki defa tekrarlanmıştır. Deney sonucunda, en düşük akım değeri ve vurum seviyesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan, rastgele bir elektrot, aynı şekilde en yüksek akım ve vurum seviyesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için kullanılan elektrotlardan rastgele bir elektrot seçilmiştir. Bu elektrotların işleme yüzeyleri SEM’de görüntülenmiş ve EDS’leri alınmıştır. Bu görüntülere bakılarak, kriyojenik işlemin, akım değerinin ve vurum seviyesinin elektrot üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Resim 5.10. (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş ve (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğinde 4A ve T_{on} 2 değerlerinde işlem sırasında kullanılan elektrotların SEM görüntüleri

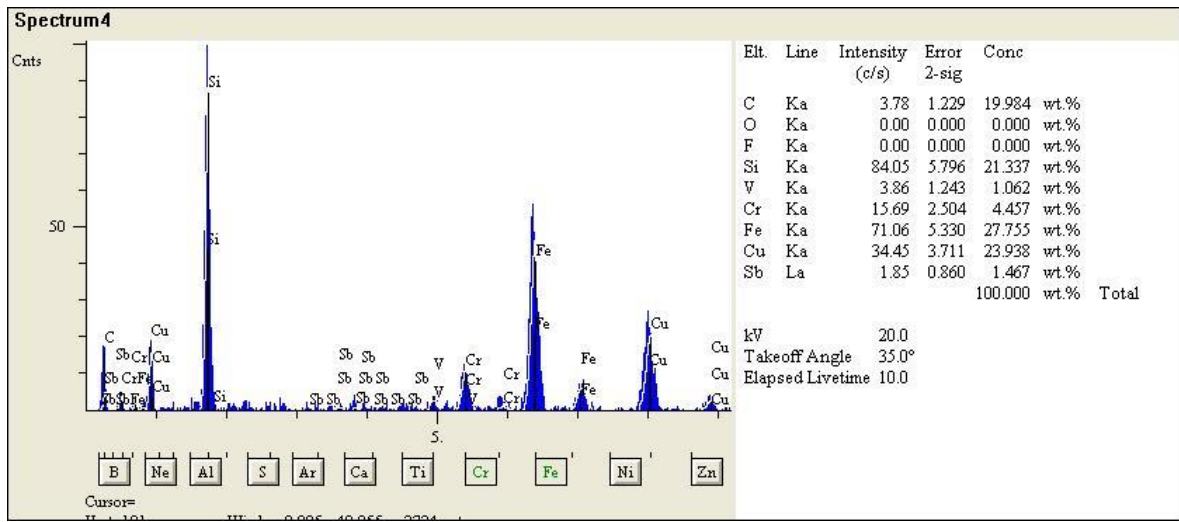


Resim 5.11. (a) ve (c) kriyojenik işlem görmemiş ve (b) ve (d) kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğinde 16A ve T_{on} 8 değerlerinde işlem sırasında kullanılan elektrotların SEM görüntüleri

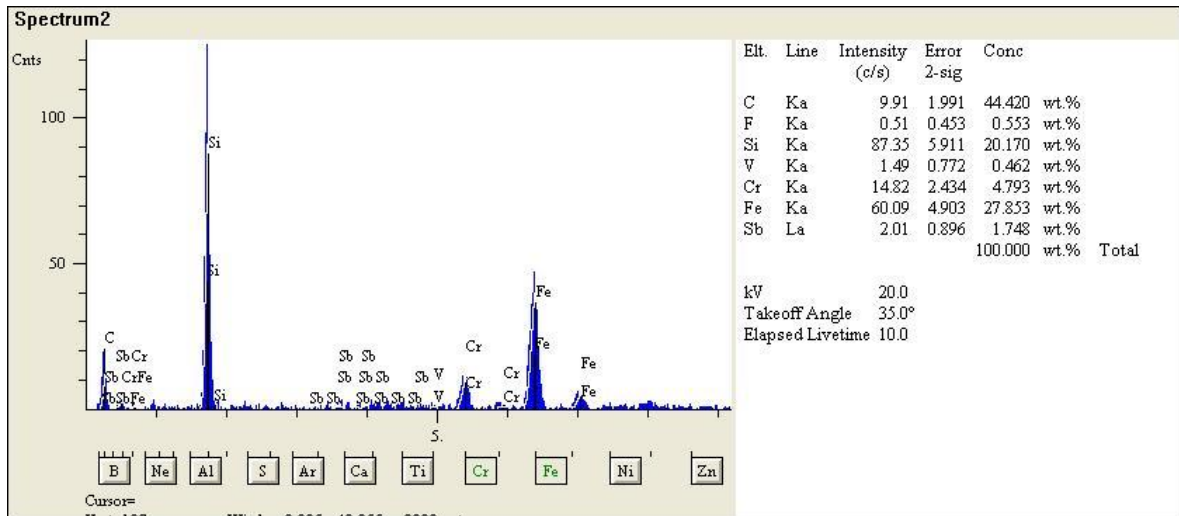
Resim 5.10 'a ve Resim 5.11'e bakıldığında akım ve vurum süresine bağlı olarak belirgin bir farkın gözlenmediği, ancak kriyojenik işlem görmüş numunelerin işlenmesinde kullanılan elektrotların yüzey durumlarının daha iyi olduğu görülmektedir. Srivastava ile Pnadey'nin yapmış oldukları çalışmada, artan vurum süresi (T_{on}) ile birlikte elektrot yüzeyinde, karbonla kaplı tabakanın meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu katmanın oluşum sebebinin ise artan vurum süresi ile birlikte, hidrokarbon bazlı dielektrik sıvının ayrışması sonucu, karbon atomlarının elektrot yüzeyini kaplaması olduğunu belirtmişlerdir [15]. Bu bilgileri referans alarak, Resim 5.11'deki görsele bakıldığında hem kriyojenik işlem görmüş hem de kriyojenik işlem görmemiş numunelerin EDM ile işlenmesinde kullanılan elektrot yüzeylerinin, Resim 5.10'a nazaran daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi artan vurum süresi ile birlikte, elektrot yüzeyindeki karbon tabakasının artması ve buna bağlı olarak da takımındaki aşınmanın azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Vurum süresindeki artışın, elektrot yüzeyindeki karbon tabakasındaki artışa sebep olduğu bilgisi, elektrot yüzeylerinden alınan EDS verileriyle desteklenebilmektedir. Vurum seviyesinin en yüksek ($T_{on}=8$) olduğu durumda, yüzeyde ölçülen karbon yüzdelерinin (Resim 5.14 ve Resim 5.15), vurum seviyesinin en düşük olduğu ($T_{on}=2$) (Resim 5.12 ve Resim 5.13) koşula nazaran çok daha yüksek olduğu da ayrıca görülebilmektedir.

5.2. EDS Verileri

Mevut çalışmada, en düşük akım değeri ve vurum seviyesinde kullanılan elektrotların EDS sonuçları kriyojenik işlem görmemiş numune (Resim 5.12) için ve kriyojenik işlem görmüş numune (Resim 5.13) için incelenmiştir. Böylece, elektrot yüzeyinde elementel seviyede mevcut olan elementler tespit edilerek, elektrottan iş parçasına veya iş parçasından elektrota geçişin değerlendirilmesi yapılmaya çalışılmış ve işleme sırasında dielektrik sıvının etkisi de incelenmiştir.



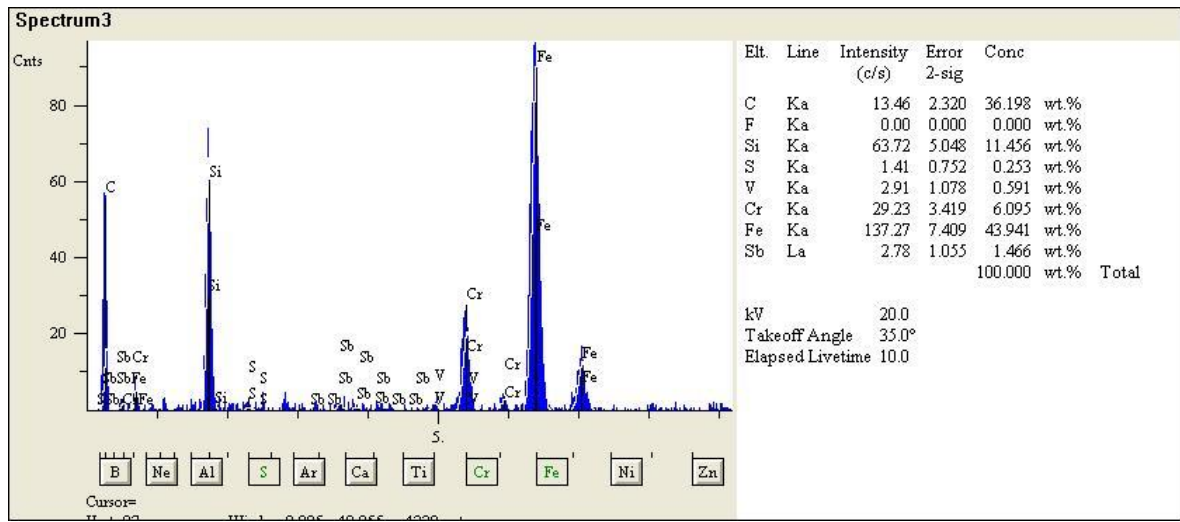
Resim 5.12. 4A T_{on} 2 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi



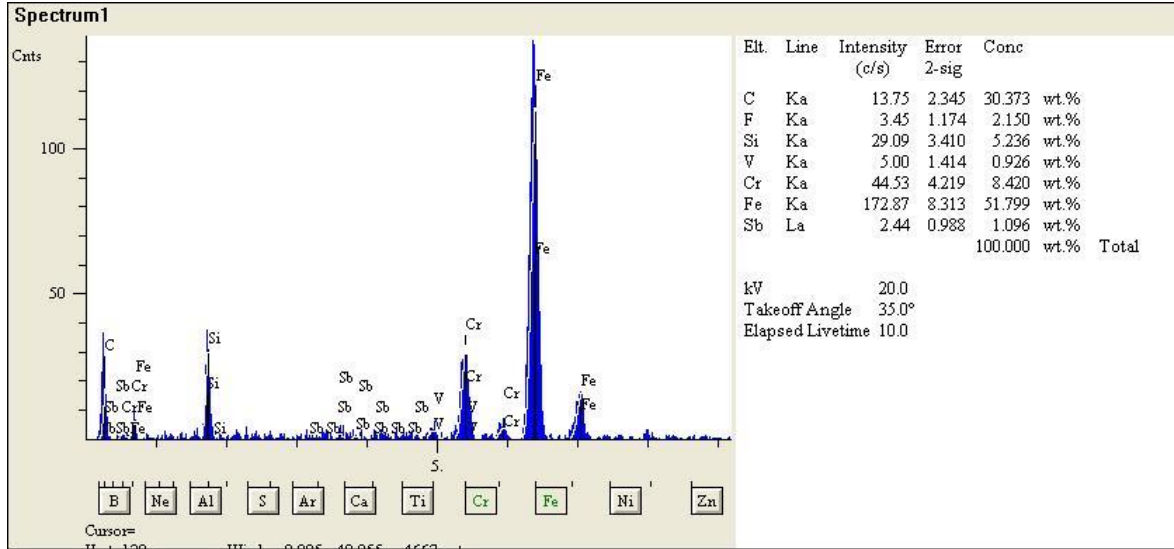
Resim 5.13. 4A T_{on} 2 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi

Resim 5.12 ve Resim 5.13 karşılaştırıldığında iş parçasından elektrotta malzeme geçişi olduğu, elektrot malzemesi 99,9% saflıkta bakır olmasından kaynaklı olarak, yüzeyde Fe ve Si elementlerinin tespitinden kanıtlanabilmektedir.

Resim 5.14 ve Resim 5.15’de ise, en yüksek akım değeri olan 16A ve en yüksek vurum seviyesinde (8), kriyojenik işleme maruz kalmamış numune (Resim 5.14) ile kriyojenik işleme tabii tutulmuş numune (Resim 5.15) için kullanılan elektrotların EDS analiz sonuçları verilmiştir.



Resim 5.14. 16A T_{on} 8 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmemiş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi



Resim 5.15. 16A Ton 8 parametreleri altında EDM ile işleme sonrasında kriyojenik işlem görmüş AISI D2 takım çeliğini işleyen elektrotun yüzeyinden alınan EDS analizi

Resim 5.14 ve Resim 5.15'deki verilere daha yakından bakıldığında, elektrotun saf bakır malzemeden seçilmiş olmasına rağmen, EDS analizinde bakıra rastlanmamıştır. Aynı zamanda, artan akım değerine ve vurum seviyesine bağlı olarak, akım değerinin 4A ve vurum seviyesinin 2 olduğu koşullarda kullanılan elektrot yüzeyine kıyasla, yüzde olarak daha çok karbona (C%) rastlanmıştır. Bu durumu, Srivastava ile Pnadey 2012'de yapmış oldukları çalışmada açıklamışlardır. Daha uzun darbe süresinde, hidrokarbon bazlı dielektrik sıvı ayrışır ve açığa çıkan karbon takımın yüzeyini kaplar. Takım yüzeyinde oluşan bu katman aynı zamanda takımın aşınmasını da engeller [15]. Yüzeyde meydana gelen bu katmandan dolayı, EDS analizinde bakır elementine (Cu) artan vurum süresi sebebiyle rastlanmamaktadır. Bu nedenle, Resim 5.12'de Cu'ya rastlanırken, Resim 5.14 ve Resim 5.15'de Cu'ya rastlanmaz. EDM ile işleme sonrasında, elektrot (Resim 4.1) ucunda meydana gelen siyahlık da bu katmanın bir kanıtıdır. Bu çalışmada, literatürden elde edilen bilgiye ek olarak, EDS verilerinde, en yüksek vurum süresinde (Ton) gözlenen %C 'un, en düşük vurum süresindeki %C oranına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu veriler ışığında, artan Ton değeriyle birlikte, elektrot yüzeyinde oluşan karbon katmanının kalınlığının arttığı ve bu tabakanın aşınmayı daha da azalttığı yorumu yapılabilir.

5.3. Varyans Analiz (ANOVA) Sonuçları

5.3.1. İşleme süresinin ANOVA verileri

Elde edilen bütün deneysel sonuçların varyans analizleri yapılarak, deneydeki girdi parametrelerinin, işleme süresi üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te sırasıyla, kriyojenik işlem görmüş, kriyojenik işlem görmemiş ve işlem görmüş- işlem görmemiş numunelerinin bir arada değerlendirildiği varyans analizleri verilmiştir.

Çizelge 5.1'de, kriyojenik işlem görmüş numunede yapılan deneylerde, akım ve vurum seviyelerinin işleme süresi üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Kriyojenik işlem görmüş numunenin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	2411,9	2411,9	1205,96	31,21	0,004	87,45%
Ton	2	191,5	191,5	95,77	2,48	0,199	6,95%
Error	4	154,6	154,6	38,64			5,60%
Total	8	2758,0					100,00%

S: 6,21592 R-sq: 94,40% R-sq(adj):88,79%

Verilen bu çizelgede (Çizelge 5.1), ilk bakılması gereken veri P anlamlılık değeridir. Bu değer 0,05 altında olması, o değişkenin elde edilen sonuç üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yine aynı çizelgede, akım değerinin 0,004 ile 0,05'den küçük olduğu ve işleme süresi üzerinde %87,45'lik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Vurum seviyesi (Ton) ise %6,95'lik bir etkiyle, işleme süresine etkisinin oldukça az olduğu sonucuna varılabilmektedir. Çizelgede verilen R-sq (adj) ifadesi ise, değerlendirilmek istenen sonuç için tercih edilen girdi parametrelerinin ne oranda etkili olduğunu göstermektedir. Bu parametreler çıktı üzerindeki açıklanabilirliği Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere, %88,79'dur.

Çizelge 5.2'de kriyojenik işlem görmemiş iş parçası üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen verilerin ANOVA sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 5.2. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	3415,4	3415,4	1707,7	14,75	0,014	79,46%
Ton	2	419,7	419,7	209,8	1,81	0,275	9,76%
Error	4	463,2	463,2	115,8			10,78%
Total	8	4298,3					100,00%

S: 10,7612 R-sq: 89,22% R-sq(adj): 78,45%

Çizelge 5.2’de, akımın 0,014 P anlamlılık değerine sahip olduğu ve işleme süresi için %79,46’lık bir oranla en etkin parametre olduğu görülmektedir. Ton değişkeni, %9,76’lık bir etki oranına sahiptir ve bu oran, akım ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bu tabloda, kriyojenik işlem görmüş numunede (Çizelge 5.1) olduğu gibi işleme süresi üzerinde en etkin parametrenin akım olduğu görülmektedir. R-sq(adj) değeri ise, Çizelge 5.2’de, %78,45 olarak verilmiştir.

Çizelge 5.3’de kriyojenik işleme maruz kalmış ve kalmamış numunelerin işleme süresine bağlı varyans analiz çizelgesi verilmiştir.

Çizelge 5.3. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerin işlem süresine bağlı varyans analiz sonuçları

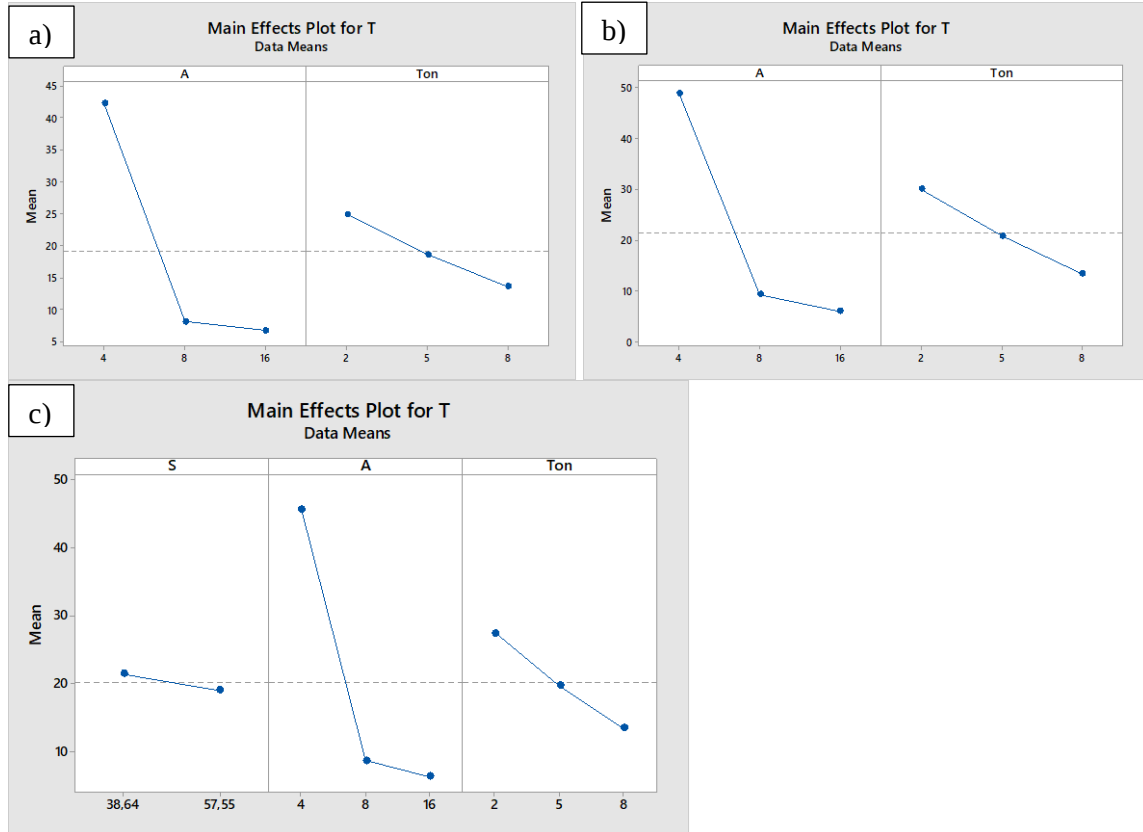
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
S	1	26,20	26,20	26,20	0,46	0,511	0,37%
A	2	5782,08	5782,08	2891,04	50,64	>0,00	81,64%
Ton	2	589,13	589,13	294,56	5,16	0,024	8,32%
Error	12	685,05	685,05	57,09			9,67%
Total	17	7082,46					100,00%

S: 7,55561 R-sq: 90,33% R-sq(adj): 86,30%

Bütün deney sonuçlarının bir arada değerlendirildiği Çizelge 5.3 incelendiğinde, A ve Ton değişkenlerinin P anlamlılık değerinin 0,05’den küçük olduğu, sertlik (S) değerinin ise büyük olduğu görülmektedir. Bu sebeple, S girdisinin işleme süresi üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığı, ancak A ve Ton değişkenlerinin etkili olduğu anlaşılmaktadır. Vurum süresi (Ton), işleme süresi üzerinde %8,32’lik bir etki oranına sahipken, akımın %81,64’lük

oranla işleme süresinde üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir. Girdilerin çıktı üzerindeki etki oranlarının ifade edildiği R-sq(adj) oranının 86,30% olduğu görülmektedir.

Kriyojenik işlem görmüş ve işlem görmemiş numunelerin işlem süresine bağlı ana etki grafikleri üç farklı değerlendirme ile Şekil 5.1’de verilmiştir. Kriyojenik işlem görmüş iş parçasında, işleme süresi üzerinde, akım ve vurum seviyelerinin etkisi Şekil 5.1 (a)’da kriyojenik işlem görmemiş numunenin ise Şekil 5.1 (b)’de gösterilmiştir. Şekil 5.1 (c) de ise bu iki numune arasındaki ısıtma işlem etkisine bağlı sertlik farkı da dahil edilerek, A ve Ton değerlerinin, işleme süresindeki etkileri genel olarak değerlendirilmiştir. Böylece, farklı numune, farklı akım değerleri ve farklı vurum seviyeleri etkileşimli olarak bir arada değerlendirilebilmektedir.

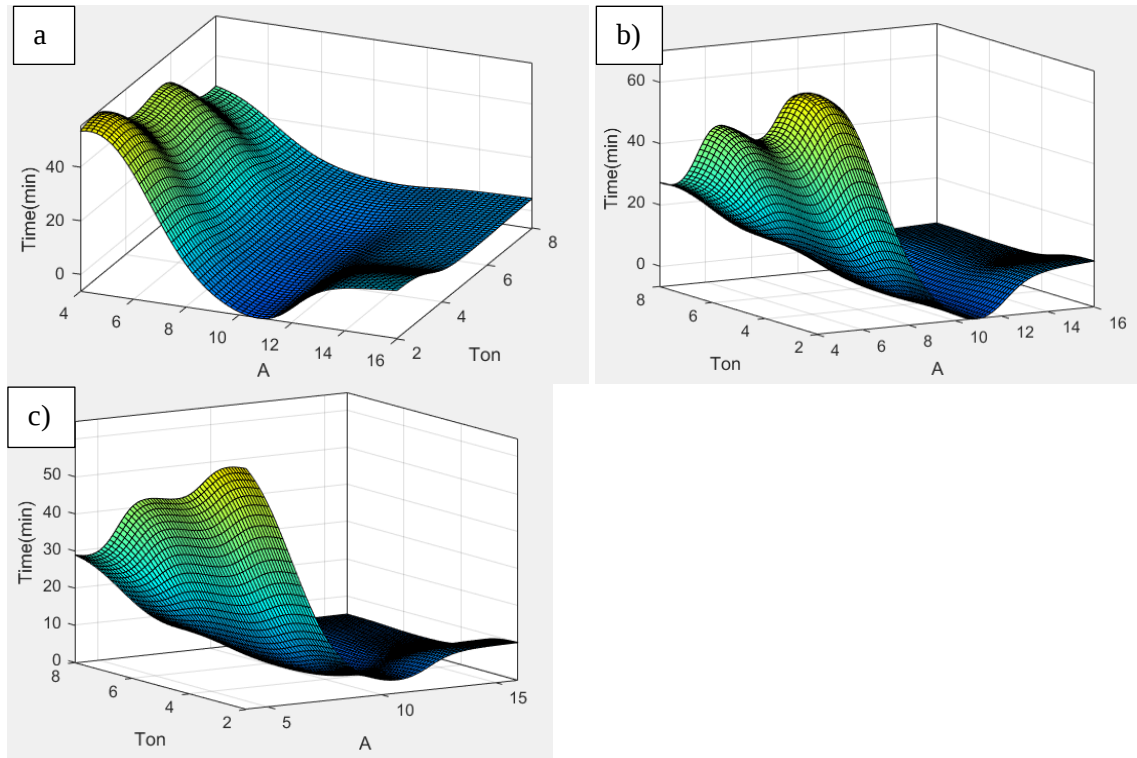


Şekil 5.1. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c) işleme süresine bağlı ana etki grafikleri

Şekil 5.1 (a) kriyojenik işlem görmüş numunenin ana etki grafiğidir. Yapılan bu deneyler sonucunda, işleme süresi üzerinde akımın, vurum süresine nazaran daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. İşleme süresi, 4A’dan ve 8A’ya artışla birlikte belirgin bir şekilde azalmış, 8A’dan 16A’ya artışla birlikte azalmaya devam etmiş ancak bu azalış 4A ile 8A

arasındaki kadar belirgin bir fark yaratmamıştır. Vurum süresindeki artış ile birlikte, işleme süresinin lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu grafiğe bakılarak, işleme süresinin artan akım ve vurum süresiyle azaldığı, yani akım ve vurum süresiyle ters orantılı olduğu söylenebilir. Şekil 5.1 (b)'de, kriyojenik işlem görmemiş numunedeki A ve Ton değerlerinin etkileri görülmektedir. Bu üç şekil, detaylı incelendiğinde, akım ve vurum seviyelerinin işleme süresi üzerindeki etkilerinin benzer olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, Şekil 5.1 (c), iki iş parçası arasındaki sertlik farkının işleme süresi üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

Girdi parametrelerinin işleme süresi üzerindeki etkilerinin daha net görülebilmesi için deney sonuçlarının MATLAB'da üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, Resim 5.16'da, sırasıyla (kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c) üç boyutlu yüzey grafikleri) verilmiştir.



Resim 5.16. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c) işleme süresine bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri

Resim 5.16'daki üç yüzey grafiğine birlikte bakıldığında, üç grafikte de benzer motifler olduğu görülmektedir. Resim 5.16'da verilen bütün grafiklerde, artan akımla işleme

süresinin kısaldığı, yine artan Ton değeriyle işleme süresinin azaldığı görülmektedir. Ancak, Ton parametresinin, A 'ya nazaran etkisinin daha az olduğu azalmadaki eğimden kolayca anlaşılabilmektedir. Grafiklerden de anlaşılabileceği üzere, en uzun işleme süresi, akım ve vurum seviyesinin en düşük olduğu değerlerde elde edilmiştir.

5.3.2. TWR değerinin ANOVA verileri

Takım aşınma oranı (TWR), Eş. 3.2'de verildiği üzere, takım aşınma miktarının, dakika cinsinden işleme süresine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Takım aşınma miktarı, kullanılan elektrotların işlemden önceki ağırlıklarının ve işlemden sonraki ağırlıklarının hassas terazide ölçülerek, farklarının alınmasıyla elde edilmiştir. Aynı akım ve vurum süresinde tekrarlanan deneylerde kullanılan elektrotların, elde edilen aşınma miktarlarının ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalama değerler, dakika cinsinden, kronometre ile ölçülen işleme süresine oranlanmıştır. TWR değerleri, mg/dak cinsinden elde edilmiş ve varyans analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, kriyojenik işlem görmüş numunede kullanılan elektrotların TWR değerleri analiz edilmiş ve ANOVA sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Kriyojenik işlem görmüş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	511548818	511548818	255774409	3,36	0,139	30,42%
Ton	2	866073126	866073126	433036563	5,70	0,068	51,50%
Error	4	304139091	304139091	76034773			18,08%
Total	8	1681761035					100,00%

S: 8719,79 R-sq: 81,92% R-sq(adj): 63,83%

Kriyojenik işlem görmüş numunenin varyans analiz tablosu (Çizelge 5.4) detaylı incelendiğinde, ilk olarak P anlamlılık değerlerinin 0,05'in altında olmadığı görülmektedir. Etki oranlarına bakıldığında, Ton girdisi %51,50'lik bir paya sahipken, A %30,42'dir. Bu veriler, vurum süresinin TWR değeri için akımdan daha etkin bir parametre olduğunu göstermektedir. R-sq(adj) değeri, analizde kullanılan A ve Ton girdisinin, TWR üzerinde, %63,83'lük bir oranda etkin parametreler olduğunu, kalan yüzdelik payın başka girdi parametrelerinden kaynaklanabileceğini göstermektedir.

Kriyojenik işleme tabii tutulmamış iş parçasının işlenmesinde kullanılan elektrotların aşınma oranlarının ANOVA sonuçları Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	733496776	733496776	366748388	3,28	0,144	32,91%
Ton	2	1047949650	1047949650	523974825	4,68	0,090	47,02%
Error	4	447432801	447432801	111858200			20,07%
Total	8	2228879227					100,00%

S: 10576,3 R-sq: 79,93% R-sq(adj): 59,85%

Çizelge 5.5, kriyojenik işlem görmemiş numunenin TWR değerlerinin A ve Ton girdilerine bağlı varyans analiz sonuçlarını göstermektedir. P anlamlılık değerlerinin bu tabloda da 0,05’in üzerinde olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem görmüş iş parçasının varyans analiz sonuçlarına (Çizelge 5.4) benzer olarak Ton girdisinin %47,02 ile A (%32,91) girdisinden fazla olduğu görülmektedir. Buda, vurum süresindeki değişkenliğin TWR değerini, akımdaki değişikliğe nazaran daha çok etkilediği anlamına gelmektedir. R-sq (adj) değeri, kriyojenik işlem görmemiş numune için %59,85’tir. Bu değer, TWR değerinin, yaklaşık %40 oranında başka parametrelerden etkilendiği bilgisini vermektedir.

Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş iş parçalarında kullanılan bütün elektrotlar için TWR değeri ortak değerlendirilmiştir. Numunedeki sertlik farkının, akımdaki ve vurum süresindeki değişimin TWR üzerindeki etkileri bir arada Çizelge 5.6’da verilmiştir.

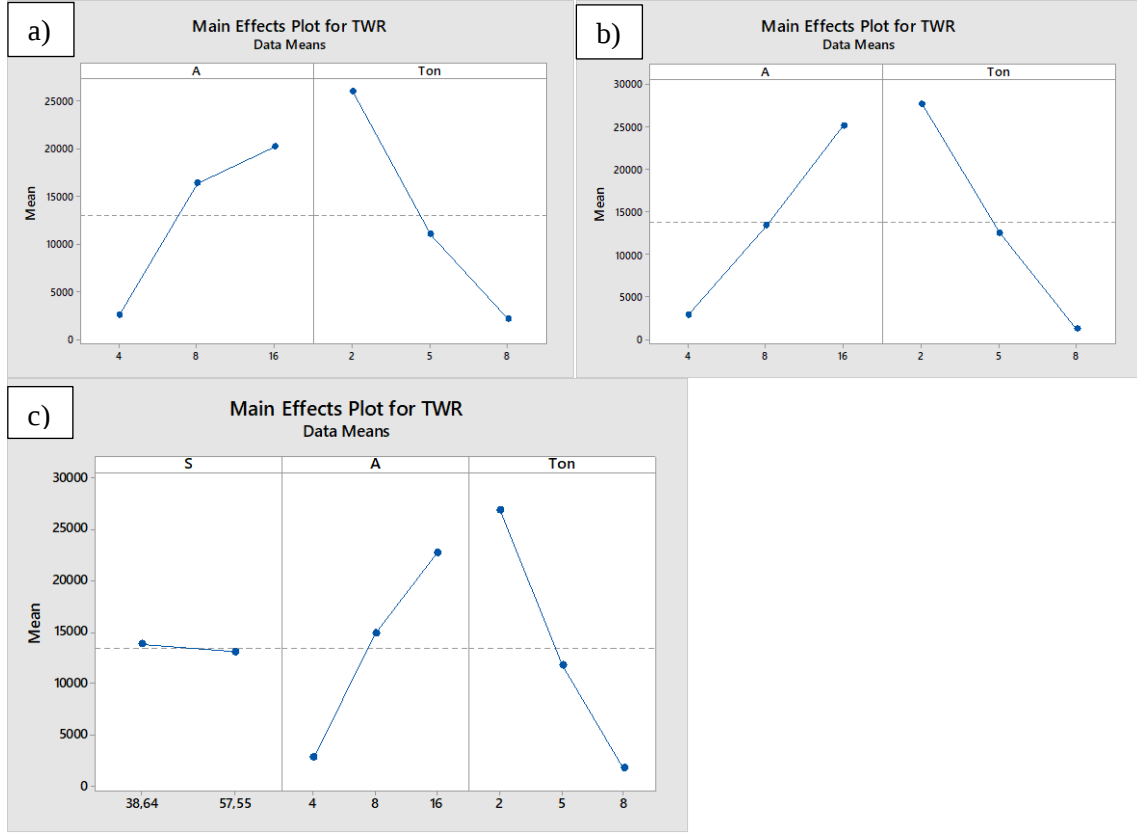
Çizelge 5.6. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin takım aşınma oranına bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
S	1	2309683	2309683	2309683	0,03	0,856	0,06%
A	2	1198506764	1198506764	599253382	8,94	0,004	30,63%
Ton	2	1907789745	1907789745	953894873	14,23	0,001	48,76%
Error	12	804343753	804343753	67028646			20,56%
Total	17	3912949945					100,00%

S: 8187,10 R-sq: 79,44% R-sq(adj): 70,88%

S, A ve Ton girdilerinin bir arada değerlendirildiği Çizelge 5.6'da, P anlamlılık değerinin S değeri için 0,856 olduğu görülmektedir. S değerinin katkı oranı ise %0,06 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, EDM ile işlemede numunedeki sertliğin hiç etkisinin bulunmadığını bir kez daha kanıtlamıştır. A ve Ton girdilerinin katkı oranları, kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerin ayrı ayrı değerlendirilen ANOVA sonuçlarına yakın değerlerdir ve sırasıyla %30,63, %48,76'dır. S. N. Sahu 'da A2 takım çeliği üzerinde yapmış olduğu çalışmada, Ton değişkeninin TWR değeri üzerinde %50,91 'lik bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır [21]. Bu veri, elde edilen ANOVA sonuçlarını da desteklemektedir. Son olarak, R-sq(adj) değeri, kriyojenik işlem görmüş (Çizelge 5.4) ve görmemiş (Çizelge 5.5) iş parçalarında elde edilenden çok daha yüksektir ve bu değer S, A ve Ton değişkenlerinin, TWR üzerinde %70,88'lik etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sertlik değerinin, EDM ile işlemede önemli bir faktör olmadığı bilinmesine rağmen, S değerinin ANOVA ile değerlendirilmede eklendiğinde, R-sq(adj) değerinde belirgin bir artış meydana getirdiği görülmektedir.

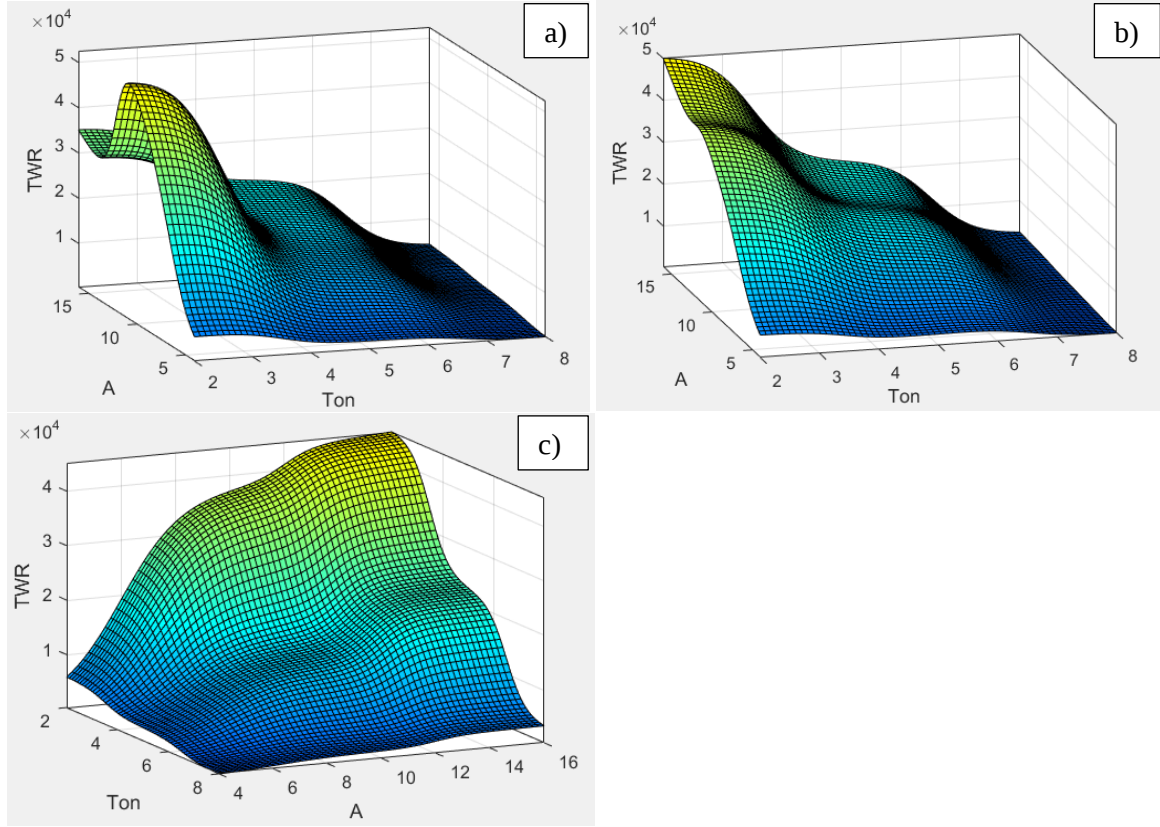
Kriyojenik işlem görmüş (Şekil 5.2 (a)) ve görmemiş (Şekil 5.2 (b)) iş parçalarının, akım (A) ve vurum seviyelerindeki (Ton) değişime bağlı olarak TWR değeri üzerindeki etkilerin daha net görülebilmesi için ana etki grafikleri Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2 (c)'de, buna ek olarak, her iki numunede kullanılan elektrotların aşınma oranlarının birlikte verildiği ana etki grafiği bulunmaktadır.



Şekil 5.2. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), takım aşınma oranına bağlı ana etki grafikleri

Verilen üç ana etki grafiğinde, Ton girdisinin, her üç grafikte de benzer etkiler gösterdiği görülmektedir. Ton değişkeni arttıkça, TWR değerinde belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Ton'un bu etkisi, Srivastava ile Pnadey'nin yapmış oldukları çalışmada açıkladıkları üzere, artan vurum süresiyle hidrokarbon bazlı dielektrik sıvının elementel seviyede ayrışması sonucu, serbest hale gelen karbon atomlarının takım yüzeyini kaplaması ile ilişkilendirilebilir [15]. Bu bilgiye dayanarak, artan vurum süresiyle birlikte, takım yüzeyindeki karbon katmanının arttığı, bu katmanında aşınmayı engellediği düşünülebilir. Ana etki grafiği (Şekil 5.2) de bu yorumu desteklemektedir. Şekil 5.2'de akımın, kriyojenik işlem görmüş (Şekil 5.2 (a)) iş parçasında, TWR değeri üzerindeki etkisinin 8A'dan 16A'ya arttırıldığında, artışta azalma olduğu görülmektedir. Şekil 5.2 (b) ve (c)'de, akımın TWR üzerindeki etkisinin lineer bir seviyede olduğu belirlenmiştir. Akım arttıkça, TWR 'da artış olduğu, üç ana etki grafiğinde de açıkça görülebilmektedir. S değerinin ise TWR üzerinde neredeyse hiçbir etkiye sahip olmadığı bir kez daha kanıtlanmıştır.

Girdilerin, TWR üzerindeki etkilerinin daha net görülebilmesi için MATLAB kullanılarak, üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiş ve Resim 5.17'de verilmiştir.



Resim 5.17. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), takım aşınma oranına bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri

Resim 5.17 incelendiğinde, kriyojenik işlem görmüş (Resim 5.17 (a)), kriyojenik işlem görmemiş (Resim 5.17 (b)) ve her iki numune verilerinin bir arada değerlendirildiği (Resim 5.17 (c)), boyutlu yüzey grafiklerinin oldukça benzer oldukları, TWR değerinin, akımın artmasıyla arttığı, Ton değerinin artmasıyla azaldığı, verilen üç grafiğin her birinde net bir biçimde görülmektedir.

5.3.3. Çaptan sapma değerlerinin ANOVA verileri

Herhangi bir işleme prosesi için, yüzey bütünlüğü ve boyutsal doğruluk, işlenen malzeme için önemli bir değerlendirmedir [44]. Çaptan sapmada, tanımlanan boyutsal doğrulukta en önemli etkenlerden biridir. Çaptan sapma değerlerinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade Eş. 5.2’de verilmiştir.

$$OC = \frac{Djt - Dt}{2} \quad (5.2) [44]$$

OC: Çaptan sapma

Djt: Ölçülen çap (mm)

Dt: Takımın çapı (mm)

İş parçalarının işlenmesinde, 8mm çapında takım elektrotlar kullanılmıştır. Elde edilen deliklerden, CMM ile 4 farklı noktadan ölçüm alınmış, Ø8mm'den ne kadar sapma olduğu ölçülmüştür. Bu ölçümler, Eş. 5.2 kullanılarak yapılan hesaplamalarda kullanılmış, aynı akım ve vurum süresinde tekrarlanan deneylerin ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak OC değerleri elde edilmiştir.

Çaptan sapmada etkili parametrelerin saptanmasında ANOVA 'ya başvurulmuştur. Kriyojenik işlem görmüş numunedeki, A ve Ton değerlerinin çaptan sapma üzerindeki etkilerinin varyans analizi Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kriyojenik işlem görmüş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	0,001384	0,001384	0,000692	0,83	0,499	5,37%
Ton	2	0,021042	0,021042	0,010521	12,66	0,019	81,72%
Error	4	0,003324	0,003324	0,000831			12,91%
Total	8	0,025750					100,00%

S: 0,0288286 R-sq: 87,09% R-sq(adj): 74,18%

Kriyojenik işlem görmüş numunenin ANOVA sonucu detaylı olarak incelendiğinde, Ton girdisinin, P anlamlılık değerinin 0,05'den az olduğu görülebilmektedir. Bu, Ton değerinin, çaptan sapmada %81,72'lik bir etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. A değişkeninin, %5,37 ile Ton değerine göre çok az olduğu, çaptan sapma üzerinde neredeyse bir etkiye sahip olmadığı anlamı çıkarılmaktadır. R-sq(adj) ifadesi, %74,18 ile A ve Ton değişkenlerinin, çaptan sapma üzerinde etkili olan iki parametre olduğunu göstermektedir.

Kriyojenik işlem görmemiş numunenin, işlenen yüzeylerindeki deliklerin, çaptan sapma verileri, A ve Ton değişkenlerine bağlı olarak incelenmiştir. İncelemede varyans analizleri elde edilmiş ve Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kriyojenik işlem görmemiş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
A	2	0,001111	0,001111	0,000555	5,41	0,073	6,51%
Ton	2	0,015534	0,015534	0,007767	75,66	0,001	91,08%
Error	4	0,000411	0,000411	0,000103			2,41%
Total	8	0,017056					100,00%

S: 0,0101318 R-sq: 97,59% R-sq(adj): 95,19%

Çizelge 5.8’de A ve Ton girdilerinin, kriyojenik işlem görmemiş numunede, çaptan sapma değerlerini ne oranda etkilediğinin görülebildiği varyans analiz sonuçları bulunmaktadır. P anlamlılık değerine bakıldığında, Ton değerinin 0,05’in altında olduğu görülmektedir. A için P anlamlılık değeri ise bu değer üzerinde. Ton değişkeninin, kriyojenik işlem görmemiş iş parçası için çaptan sapma değeri üzerindeki etkisinin %91,08 olduğu görülmektedir. Bu durum, Ton ve A değerlerinin değişken kabul edildiği bir ortamda çaptan sapma için en etkili parametrenin Ton olduğu, A değişkeninin ise %6,51’lik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. R-sq(adj) ise %95,19’luk oranla, değişken kabul edilen A ve Ton girdilerinin, çaptan sapma verilerini elde etmek için oldukça yeterli parametreler olduğunu tanımlar.

Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş iki iş parçasının yüzeyindeki deliklerin çaptan sapma oranları birlikte değerlendirilmiş ve ANOVA sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

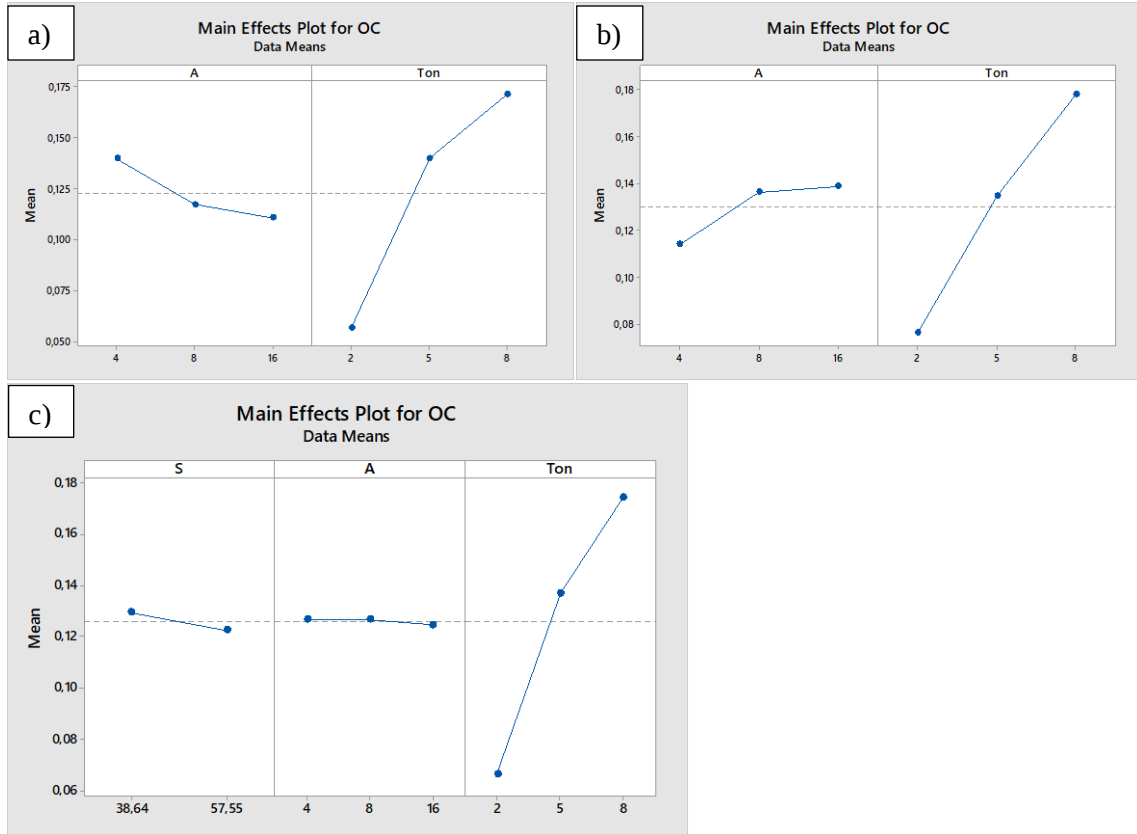
Çizelge 5.9. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin çaptan sapma değerlerine bağlı varyans analiz sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
S	1	0,000228	0,000228	0,000228	0,41	0,535	0,53%
A	2	0,000016	0,000016	0,000008	0,01	0,986	0,04%
Ton	2	0,036098	0,036098	0,018049	32,37	>0,00	83,88%
Error	12	0,006692	0,006692	0,000558			15,55%
Total	17	0,043033					100,00%

S: 0,0236142 R-sq: 84,45% R-sq(adj): 77,97%

Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunenin, Çizelge 5.9'da S, A ve Ton değişkenlerinin çaptan sapma üzerindeki etkilerinin incelendiği varyans analiz sonuçları bulunmaktadır. Bu tabloda, P anlamlılık değerlerine bakıldığında, Ton değerinin 0,05'den az olduğu ve %83,88'lik bir oran ile çaptan sapma üzerinde en etkili parametre olduğu görülebilmektedir. Ton değerini, %0,53 ile S, %0,04 ile A değişkenleri takip etmektedir. Bu değerler, çaptan sapma için en etkili parametrenin Ton parametresi olduğunu göstermektedir. R-sq(adj) değerine bakıldığında, hesaba katılan S, A ve Ton değişkenlerinin, çaptan sapma üzerinde yüzde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir ve bu değer %77,97'dir. S ve A değişkenlerinin etkisi olmadığı da bilindiğine göre, Ton değerinin çaptan sapma değerini en çok ve neredeyse tek etkileyen parametre olduğu rahatlıkla söylenebilir.

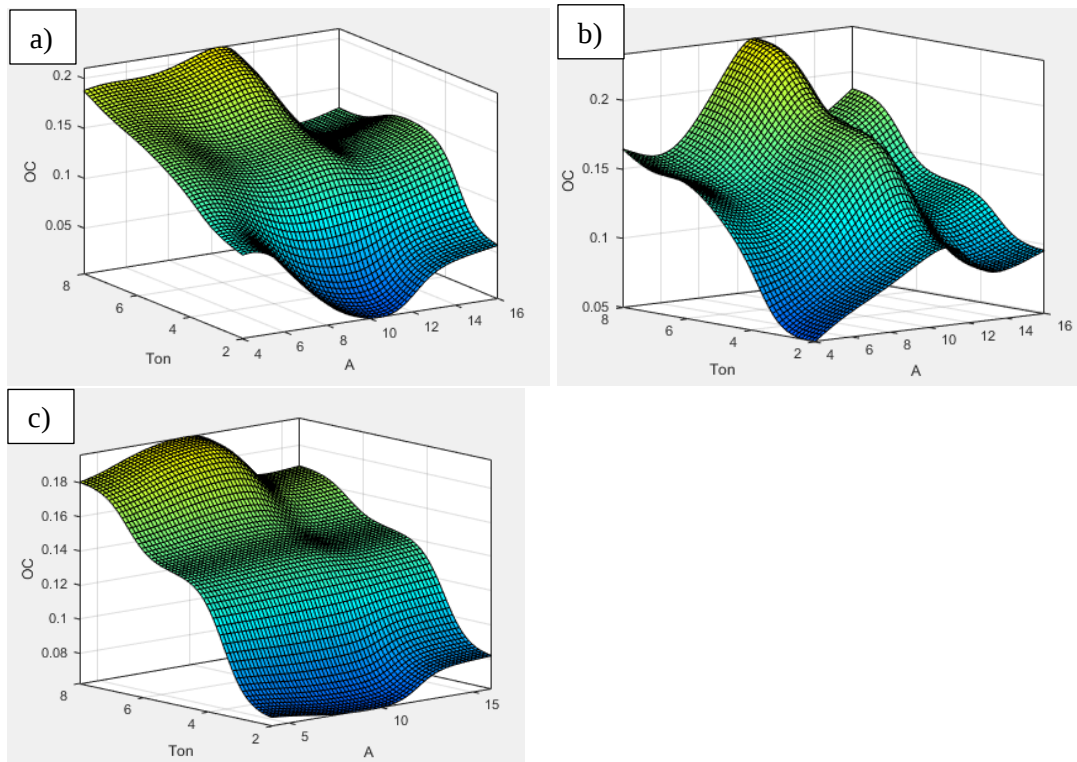
Şekil 5.3'de, çaptan sapma üzerinde en etkili parametrenin saptanmasında yardımcı olacak ana etki grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.3. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), çaptan sapma değerlerine bağlı ana etki grafikleri

Ana etki grafiklerinin bir arada verildiği Şekil 5.3’de Ton parametresinin üç grafikte de en etkili parametre olduğu açık bir biçimde görülmektedir. Kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş numunelerdeki ana etki grafikleri (Şekil 5.3 (a) ve Şekil 5.3 (b)) incelendiğinde, kriyojenik işlem görmüş numunede (a), artan akımla çaptan sapmanın azaldığı, kriyojenik işlem görmemiş iş parçasında (b), bu durumun tam tersi olduğu, artan akım değeri ile birlikte sapmanın arttığı görülmektedir. Ancak, akıma bağlı sapma, 0,05 ‘lik bir aralıkta gerçekleşmektedir. Bu değer, varyans analiz sonuçlarında (Çizelge 5.7, Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9) A parametresinin hiçbir etkisinin olmadığı da göz önünde bulundurulduğunda, ihmal edilebilir bir değerdir. S değişkeninin, A parametresinde olduğu gibi çaptan sapma üzerinde neredeyse hiçbir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Şekil 5.3’de verilen bu grafikler, ANOVA sonuçlarının daha net anlaşılmasını sağlamıştır.

Akım ve vurum süresi parametrelerinin çapta sapma üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için MATLAB ‘da üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, Resim 5.18 ‘de bir arada verilmiştir.



Resim 5.18. Kriyojenik işlem görmüş (a), kriyojenik işlem görmemiş (b) ve her iki numunenin de bir arada değerlendirildiği (c), çapta sapma değerlerine bağlı üç boyutlu yüzey grafikleri

Resim 5.18’de Ton ve A parametrelerine baēlı, kriyojenik işlem görmüş numunenin sapma oranları (a)’da kriyojenik işlem görmemiş numunenin sapma oranları (b)’de ve son olarak her iki numunede meydana gelen sapmaların bir arada deēerlendirildiēi üç boyutlu yüzey grafiēi (c)’de verilmiştir. Resim 5.18 (a) ve (b) grafikleri incelendiēinde, her ikisinde de akımdaki deēiřikliēe baēlı sapma deēerlerindeki deēiřiklik görülmektedir. Ancak, akımın, çaptan sapma üzerindeki etkisinin neredeyse olmadıēı bilindiēi için ve deēiřimin çok sınırlı bir aralıkta (0.05) meydana geldiēi göz önünde bulundurulduēunda bu deēiřikliēin ihmal edilebilir olduēu söylenebilir. Resim 5.18 (c), A ve Ton parametrelerinin, çaptan sapma üzerindeki etkilerini en net yansıtan grafiktir. Akımın neredeyse hiçbir etkisinin olmadıēı, Ton deēerinin ise çaptan sapmayı oldukça arttırdıēı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aynı kimyasal kompozisyona sahip, kriyojenik işleme maruz kalmış ve kriyojenik işleme maruz kalmamış iki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin, EDM prosesi ile işlenmesi incelenmiştir. İşleme sırasında, %99,9 saflıkta, 8mm çapında bakır elektrotlar tercih edilmiştir. Numunelerde, 4mm'lik derinlikte deliklerin açılması hedeflenmiş ve işlem süreleri ölçülmüş. 4A, 8A, 16A akım ve 2, 5, 8 vurum seviyeleri değişken olarak belirlenmiştir. Her bir akım değeri ve vurum seviyesi, her iki numune için de iki kez gerçekleştirilmiştir. Her deney için farklı elektrotlar kullanılmıştır. Bu takım uçlarının, işlem öncesinde ve sonrasında ağırlıkları hassas terazide ölçülerek takım aşınma oranları (TWR) hesaplanmıştır. İşleme yüzeyleri SEM 'de görüntülenmiş, x250 ve x500 büyümelerdeki yüzey durumları incelenmiştir. Son olarak, işleme yüzeyindeki deliklerin her birinin, 4 farklı noktasından CMM ile ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler ile, elektrot çapı olan 8mm'den işleme ile ne kadarlık bir sapma olduğu hesaplanmıştır. Bütün veriler ANOVA'da değerlendirilmiştir. Vurum süresi (Ton) ve akım değerinin (A), çaptan sapma (OC), takım aşınma oranı (TWR) ve işleme süresi (T) çıktıları üzerindeki etki oranları elde edilmiş ve iki tip numune arasında bu değerlerin nasıl bir farklılık gösterdiği anlaşılmaya ve yorumlanmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Elde edilen SEM görüntülerinde, kriyojenik işlem görmüş numunenin yüzeyinde, kriyojenik işlem görmemiş numuneye nazaran küresel kalıntıların daha küçük olduğu ve yapıda daha homojen dağıldıkları tespit edilmiştir.
2. Yüzey durumları çatlak yoğunluğu açısından da incelenmiştir. Kriyojenik işleme maruz kalmış malzemenin çatlak boyunda, çatlak yoğunluğunda ve çatlak genişliklerinde ciddi oranda bir azalış gözlenmiştir. Çatlak yoğunluk farkının en belirgin görüldüğü, akım değerinin 4A, vurum seviyesinin 5 olduğu SEM görüntüsünde (Resim 5.2), x250 büyütmede çatlak boyları ölçülmüş ve kriyojenik işlem görmüş numunede %64'lük çatlak yoğunluğunda bir azalma gözlenmiştir.
3. İş parçalarının görmüş oldukları ısı işleminden bağımsız olarak, akım değerindeki artışa ters orantılı olarak, çatlak yoğunluğunda azalma olduğu tespit edilmiştir.

4. Gerçekleştirilen varyans analizleri sonucunda, işleme süresinin en çok akımdaki değişiklikten etkilendiği ve aralarında doğru orantılı bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.
5. ANOVA sonuçları takım aşınma oranı (TWR) açısından değerlendirildiğinde, vurum seviyesinin (Ton), akıma nazaran daha etkili bir parametre olduğu, ancak aralarında yüzde olarak büyük bir fark olmadığı, her iki değişkenin de TWR değeri için etkin parametreler oldu tespit edilmiştir.
6. TWR'de vurum seviyesindeki (Ton) artışla, takım aşınma oranında (TWR) azalma meydana geldiği görülmüştür.
7. Çaptan sapma (OC) verilerinin varyans analiz sonuçları, vurum seviyesindeki artışın, sapmayı arttırdığını göstermiştir. Ton değişkeninin, çaptan sapma için en etkili ve neredeyse tek değişken olduğu saptanmıştır.
8. EDM ile işlemede, en düşük TWR, OC ve T değerlerinin elde edilmesi istenir. Yapılan çalışmada en düşük TWR değeri 273,776 mg/dak olarak, OC değeri 0,024mm olarak ve T değeri 4,03 dakika olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin hepsi kriyojenik işlem görmüş iş parçalarından elde edilen verilerdir.

Öneriler

1. D2 takım çeliklerinin EDM ile işlenmeden önce kriyojenik işlem görmeleri tavsiye edilir. Yüzey durumlarını olumlu yönde etkileyen bu ters ısıtıl işlem, EDM ile işleme sonrasında taşlama için harcanan enerjiden tasarruf edilmesinde yardımcı olabilir.
2. D2 takım çeliklerinde delme işleminin gerçekleştirilebilmesinde, kriyojenik işlem görmüş numunede daha fazla sapma olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem görmüş numunede delme gerçekleştirilmesi durumunda, çaptan sapma oranının fazla olduğu hesaba katılmalı ve elektrot çapının ona göre seçilmesi önerilmektedir.
3. Bu çalışmanın devamında, kriyojenik işlem sonrasında oluşan kalıntı gerilmelerin, EDM ile işleme sonrasında yüzeyde meydana gelen yüzey çatlaklarına etkisi incelenebilir.
4. Kriyojenik işlem görmüş malzemenin EDM işlemi sonrasında işleme yüzeyinde meydana gelen beyaz tabakanın kalınlığı incelenebilir.
5. EDM ile işlenmiş, kriyojenik işlem görmüş numunenin yüzey topoğrafyaları incelenerek karşılaştırılabilir.

6. EDM işlemi sonrasında, meydana gelen yüzey çatlaklarının giderilmesi için lazer ısıtma işlemi uygulanarak, kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş malzemelerin yüzey durumları incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. De Jesus, A. M. P., Ramos, G. F. S., Gomes, V. M. G., Marques, M. J., De Figueiredo, M. A. V., ve Marafona J. D. R. (2020). Comparison between EDM and grinding machining on fatigue behaviour of AISI D2 tool steel. *International Journal of Fatigue*, 139(105742), 1-11.
2. Guu, Y. H. (2005). AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM process. *Applied Surface Science*, 242(3-4), 245-250.
3. Prabhu, S. ve Vinayagam, B.K. (2010). Analysis of surface characteristics of AISI D2 tool steel material using Electric Discharge Machining process with Single wall carbon nano tubes. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 2(1), 1793-8236.
4. Pragadish, N. ve Kumar, M. P. (2015). Surface characteristics analysis of dry EDMed AISI D2 steel using modified tool design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4), 1737-1743.
5. Abbas, M. A., Lajis, M. A., Abbas, D. R., Merzah, O. M., Kadhim, M. H., ve Shamran, A. A. (2020). Influence of additive materials on the roughness of AISI D2 steel in electrical discharge machining (EDM) environment. *Materwiss Werksttech*, 51(6), 719-724.
6. Srivastava, V. ve Pandey, P. M. (2013). Study of ultrasonic assisted cryogenically cooled EDM process using sintered (Cu-TiC) tooltip. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1), 158-166.
7. Khan, F., Kumar, J., ve Soota, T. (2019). Optimization of EDM process parameter for stainless steel D3. *Materials Today: Proceedings*, 25, 635-638.
8. Pant, P. ve Bharti, P. S. (2019). Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*, 25, 765-772.
9. Gupta, S., Jain, S. K., ve Singh, G. (2017). Experimental Study of MRR, TWR, SR on AISI D2 Steel using Aluminium Electrode on EDM. *Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering*, 17(1), 16-22.
10. Hamid, F. E. A. ve Lajis, M. A. (2012). High performance in EDM machining of AISI D2 hardened steel. *Advanced Materials Research*, 500, 259-265.
11. Guu, Y. H., Hocheng, H., Chou, C. Y., ve Deng, C. S. (2003). Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel. *Materials Science and Engineering A*, 358(1-2), 37-43.

12. Lee, H. T., Rehbach, W. P., Hsu, F. C., Tai, T. Y., ve Hsu, E. (2004). The study of EDM hole-drilling method for measuring residual stress in SKD11 tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), 88–93.
13. Kansal, H. K., Singh, S., ve Kumar, P. (2007). Effect of silicon powder mixed EDM on machining rate of AISI D2 die steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(1), 13–22.
14. Kumar, S. ve Batra, U. (2012). Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(1), 35–40.
15. Srivastava, V. ve Pandey, P. M. (2012). Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(3), 393–402.
16. Kumar, S. V. ve Kumar, M. P. (2015). Machining process parameter and surface integrity in conventional EDM and cryogenic EDM of Al-SiCp MMC. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 70–78.
17. Das, M. K., Kumar, K., Barman, T. Kr., ve Sahoo, P. (2014). Application of Artificial Bee Colony Algorithm for Optimization of MRR and Surface Roughness in EDM of EN31 Tool Steel. *Procedia Materials Science*, 6, 741–751.
18. Prathipati, R. P., Devuri, V., Cheepu, M., Gudimetla, K., ve Kiran, R. U. (2018). Machining of AISI D2 Tool Steel with Multiple Hole Electrodes by EDM Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330(1), 1-12.
19. Internet: Matin, R. ve Shabgard, M. R. (February, 2015). Effect of electrode shape configuration on tool steel (DIN1.2379) in Electrical Discharge Machining (EDM). Web: <https://www.researchgate.net/publication/292090953> Son Erişim Tarihi: 08.10.2021
20. Internet: Sharma, A. ve Sinha, A. K. (2018). Rotary electric discharge machining of AISI D2 tool steel: present and future scope. Web: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings Son Erişim Tarihi: 09.10.2021
21. Internet: Sahu, S. N. ve Nayak, N. C. (2018). Multi-criteria decision making with PCA in EDM of A2 tool steel. Web: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings Son Erişim Tarihi: 08.10.2021
22. Internet: Sharma, A., Mohanty, C. P., ve Pardasani, K. (2018). Finite Element Analysis of Cryogenically Treated EDM. Web: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings Son Erişim Tarihi: 09.10.2021

23. Internet: Singh, G., Singh, S., Dhiman, D. P., Gulati, V., Kaur, T., ve Professor, A. (2018). Optimization of EN24 Steel on EDM Machine using Taguchi & ANOVA Technique. Web: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings Son Erişim Tarihi: 08.10.2021
24. Internet: Singh, N., Routara, B. C., ve Nayak, R. K. (2018). Study of machining characteristics of Inconel 601 with cryogenic cooled electrode in EDM using RSM. Web: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings Son Erişim Tarihi: 08.10.2021
25. Malhotra, P., Tyagi, R. K., Singh, N. K., ve Sikarwar, B. S. (2020). Experimental investigation and effects of process parameters on EDM of Al7075/SiC composite reinforced with magnesium particles. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1496–1501.
26. Choudhary, R., Kumar, A., Yadav, G., Yadav, R., Kumar, V., ve Akhtar, J. (2019). Analysis of cryogenic tool wear during electrical discharge machining of titanium alloy grade 5. *Materials Today: Proceedings*, 26, 864–870.
27. Prakash, D., Tariq, M., Davis, R., Singh, A., ve Debnath, K. (2021). Influence of cryogenic treatment on the performance of micro-EDM tool electrode in machining of magnesium alloy AZ31B. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1198-1201.
28. Internet: Asghar, S., Rizvi, H., Agarwal, S., ve Bharti, P. K. (2019). ScienceDirect Modeling of Surface Roughness of AISI 4340 Using Copper-Tungsten Tool in Die Sinking EDM. Web: www.sciencedirect.com Son Erişim Tarihi: 11.10.2021
29. Internet: Agarwal, N., Shrivastava, N., ve Pradhan, M. K. (2018). ScienceDirect Optimisation of EDM process parameters using Jaya Algorithm. Web: www.sciencedirect.com Son Erişim Tarihi: 10.10.2021
30. Kumar, A. vd. (2020). Wire EDM process parameter optimization for D2 steel. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 2478–2482.
31. Singh, A. P. ve Singh, D. K. (2020). Multi response optimization for micro-EDM machining of AISI D2 die steel using RSM and neural network. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1449–1455.
32. Anand, B., Giri A., Mohanty, C. P., ve Sharma, D. (2020). Tool wear and energy consumption optimization in EDM of chromium tool steel. *Materials Today: Proceedings*, 43, 268–272.
33. Rao, K. M., Kumar, D. V., Shekar, K. C., ve Singaravel, B. (2021). Optimization of EDM process parameters using TOPSIS for machining AISI D2 steel material. *Materials Today: Proceedings*, 46, 701–706.

34. Papazoglou, E. L., Markopoulos, A. P., ve Manolakos, D. E. (2018). Experimental research on EDM of AISI O1 tool steel and study of the surface white layer formation. *Procedia Structural Integrity*, 10, 235–242.
35. Kumar, S. S., Varol, T., Canakci, A., Kumaran, S. T., ve Uthayakumar, M. (2021). A review on the performance of the materials by surface modification through EDM. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1), 127–144.
36. Keskin, G., Küçüktürk, G., Pul, M., Gürün, H., ve Baydaroğlu, V. (2021). AA7075 Matrisli B4C+SiC Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Toz Takviyeli EEİ Yöntemiyle İşlenmesinde Boşalım Akımı ve Takviye Oranının İşlenmiş Yüzeyin Mikroyapısı ve Pürüzlülüğüne Etkisi. *Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi*, 13(2), 489–495.
37. Çaydaş, U. vd. (2020). Metalik Biyomalzemelerin Elektro Erozyon Yöntemiyle İşlenebilirliklerinin Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13, 489-495.
38. Kalyon, A. (2019). AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Elektro Erozyon Tekniği İle İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 75–86.
39. Nanesa, H. G. ve Jahazi, M. (2015). Alternative phase transformation path in cryogenically treated AISI D2 tool steel. *Materials Science and Engineering A*, 634, 32–36.
40. Ghasemi-Nanesa, H. ve Jahazi, M. (2014). Simultaneous enhancement of strength and ductility in cryogenically treated AISI D2 tool steel. *Materials Science and Engineering A*, 598, 413–419.
41. Das, D., Dutta, A. K., ve Ray, K. K. (2009). Correlation of microstructure with wear behaviour of deep cryogenically treated AISI D2 steel. *Wear*, 267(9–10), 1371–1380.
42. Atalar, S., Karadağ, E. (2016). *Kriyojenik Isıl İşlemin Farklı Takım Çeliklerinin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi*. Yayınlanmamış Lisans Bitirme Tezi, Metalurji ve Malzeme, Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi.
43. Dewangan, S., Gangopadhyay, S., ve Biswas, C. K. (2015). Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 63, 364–376.
44. Kumar, P., Dewangan, S., ve Pandey, C. (2020). Analysis of surface integrity and dimensional accuracy in EDM of P91 steels. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5378–5383.

45. Internet: Tamplin, T. (June 2022). *Analysis of Variance (ANOVA) Definition*. Web: https://learn.financestrategists.com/finance-terms/anova/?gclid=Cj0KCQjwx2XBhDBARIsAOjDZ36q2YuWiA1YttZpRIOe4kl7F_AtrU5jQEW0PGLFhj7tOpVNYG-fFOMaAlJcEALw_wcB Erişim Tarihi: 07.08.2022



GAZİ GELECEKTİR..