

**SOĞUK VE KRİYOJENİK İŞLEMLİ BAKIR ELEKTROT VE
BERİLYUM-BAKIR ALAŞIMI İŞ PARÇALARININ ELEKTRO
EROZYON İŞLEME PERFORMANSINA ETKİLERİ**

Yakup YILDIZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2010
ANKARA**

Yakup YILDIZ tarafından hazırlanan “SOĞUK VE KRIYOJENİK İŞLEMLİ BAKIR ELEKTROT VE BERİLYUM-BAKIR ALAŞIMI İŞ PARÇALARININ ELEKTRO EROZYON İŞLEME PERFORMANSINA ETKİLERİ” adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Muammer NALBANT

.....

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Muammer NALBANT

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

.....

Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tarih: 18/03/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yakup YILDIZ

**SOĞUK VE KRIYOJENİK İŞLEMLİ BAKIR ELEKTROT VE BERİLYUM-
BAKIR ALAŞIMI İŞ PARÇALARININ ELEKTRO EROZYON İŞLEME
PERFORMANSINA ETKİLERİ
(Doktora Tezi)**

Yakup YILDIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, kriyojenik ve soğuk işlemli bakır (Cu) elektrot ve berilyum-bakır (Be-Cu) alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları soğuk işlem için -100°C ve kriyojenik işlem için ise -185°C sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. Soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının tanecik boyutlarının büyüdüğü, mikrosertliklerinin azaldığı, kristal yapılarının değiştiği, bakır elektrotların elektriksel iletkenliklerinin azaldığı, berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektriksel iletkenliklerinin arttığı ve bakır elektrotların ısıl genleşme miktarlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Elektro erozyon işleme deneyleri 10A, 15A, 20A ve 25A akım değerleri ile $20\mu\text{s}$, $40\mu\text{s}$, $60\mu\text{s}$ ve $80\mu\text{s}$ vurum sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılmasıyla elektro erozyon işleme performansı, malzeme kaldırma hızının artmasıyla, elektrot aşınma hızının, yüzey pürüzlülüğünün ve beyaz katman kalınlıklarının azalmasıyla artmıştır.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Soğuk işlem, kriyojenik işlem, elektro erozyon işleme
Sayfa Adeti : 73
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Muammer NALBANT

**THE EFFECTS OF COLD AND CRYOGENICALLY TREATED COPPER
ELECTRODES AND BERYLLIUM-COPPER ALLOY WORKPIECES ON
THE PERFORMANCE OF ELECTRO DISCHARGE MACHINING
(PhD Thesis)**

Yakup YILDIZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
March 2010**

ABSTRACT

In this study, the effects of cold and cryogenically treated copper electrodes and beryllium-copper alloy workpieces on the performance of electro discharge machining (EDM) were investigated experimentally. Copper (Cu) electrodes and beryllium-copper (Be-Cu) alloy workpieces were subjected to -100°C for cold treatment and -185°C for cryogenic treatment. It was observed after cold and cryogenic treatments that the grain size of copper electrodes and beryllium-copper alloys were increased, microhardness of the materials were reduced, electrical conductivity of copper electrodes were reduced, electrical conductivity of beryllium-copper alloy workpieces were increased, crystal structure of the materials were changed and thermal expansion of the copper electrodes were reduced. EDM tests were conducted on 10A, 15A, 20A and 25A currents and 20µs, 40µs, 60µs and 80µs pulse durations. EDM performance was increased by increasing of material removal rate and by decreasing of electrode wear ratio, surface roughness and white layer thicknesses by employing cold and cryogenically treated copper electrodes and beryllium-copper workpieces.

**Science Code : 708.3.028
Key Words : Cold treatment, cryogenic treatment, EDM
Page Number : 73
Adviser : Prof. Dr. Muammer NALBANT**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Muammer NALBANT'a değerli katkıları ile çalışmalarına destek olan ve teşvik eden Prof. Dr. Kamlakar P. RAJURKAR (University of Nebraska-Lincoln) ve Dr. Murali Meenakshi SUNDARAM'a (University of Cincinnati), CNMR'daki arkadaşlarım (CNMR friends) Aarati Sarwade, Ajay Swain, Ala'a M. Al-Okaily, Jiaqing Wu ve Yu Zhang, David Siems ve Krishna Rachuri'ye elektriksel iletkenlik ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Nebraska-Lincoln'de NCEE laboratuvarları müdürü Doug KRAMER'e, X-ray ölçüm ve analizlerindeki yardımlarından dolayı Dr. Jay T.V. Jayaraman ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e, mikroyapı incelemelerindeki yardımlarından dolayı Wendy Keeler ve Chase Nielsen (UNL), Prof. Dr. Adem KURT ve Arş. Gör. Volkan KILILÇLI'ya ısı genleşme ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ'a, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. SOĞUBİLİM/KRİYOJENİ.....	5
2.1.Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	5
2.2.Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Isıl Özelliklerine Etkisi.....	6
2.3.Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Elektriksel Özelliklerine Etkisi.....	7
3. SOĞUK (SIFIR-ALTI) VE KRİYOJENİK İŞLEM.....	8
3.1.Soğutma Aşaması.....	9
3.2.Islatma/Emdirme Aşaması.....	9
3.3.Isıtma ve Temperleme Aşaması.....	10
3.4.Soğuk ve Kriyojenik İşlem için Genel Değerlendirme.....	11
3.5.Elektro Erozyon İşleme için Kriyojenik Soğutma ve Soğuk/Kriyojenik İşlemler.....	12
4. MALZEME VE METOT.....	14
4.1.Malzeme.....	14
4.2.Metot.....	15

Sayfa

4.2.1. Soğuk ve kriyojenik işlem döngüleri	15
4.2.2. Malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı ve elektrot şekil deformasyonu	17
4.2.3. Ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) testleri	17
4.2.4. Mikroyapı ve ortalama beyaz katman kalınlığı incelemeleri	18
4.2.5. Mikrosertlik testleri	19
4.2.6. Elektriksel direnç/iletkenlik testleri	19
4.2.7. X-ray testleri	20
4.2.8. Isıl genleşme testleri	22
4.2.9. İstatiksel analizler	22
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
5.1. Soğuk ve Kriyojenik İşlemlerin Malzeme Özelliklerine Etkileri	24
5.1.1. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme mikroyapılarına etkileri	24
5.1.2. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme mikrosertliklerine etkileri ...	26
5.1.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzemelerin elektriksel direnç/iletkenliklerine etkileri	27
5.1.4. X-ray analizi	29
5.1.5. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme ısı genleşme miktarına etkisi	29
5.2. Soğuk ve Kriyojenik İşlemleri Bakır Elektrotların Elektro Erozyon Performansına Etkileri	30
5.2.1. Soğuk ve kriyojenik işlemleri bakır elektrotların malzeme kaldırma hızına etkileri	30
5.2.2. Soğuk ve kriyojenik işlemleri bakır elektrotların elektrot aşınma hızına etkileri	33

Sayfa

5.2.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların elektrot şekil deformasyonuna etkileri	35
5.2.4. Soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların ortalama yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkileri	38
5.2.5. Soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların ortalama beyaz katman kalınlığına etkileri.....	40
5.3.Soğuk ve Kriyojenik İşlemlili Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçalarının Elektro Erozyon Performansına Etkileri.....	44
5.3.1. Soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının malzeme kaldırma hızına etkileri	44
5.3.2. Soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektrot aşınma hızına etkileri	46
5.3.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkileri	48
5.3.4. Soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının ortalama beyaz katman kalınlığına etkileri	51
5.4.İşlemsiz, Soğuk İşlemlili ve Kriyojenik İşlemlili Elektrot ve İş Parçaları ile Gerçekleştirilen Deney Şartları için Performans İndeks İncelemesi	53
5.5.Tartışma	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
6.1.Sonuçlar	60
6.2.Öneriler	62
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69
EKLER.....	72
EK-1 Berilyum-Bakır Alaşımı için Faz Diyagramı.....	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Elektro erozyon işleme yönteminde kriyojenik soğutma ve soğuk/kriyojenik işlem uygulamaları	13
Çizelge 4.1. C-122 bakır elektrot için bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler [58]	14
Çizelge 4.2. Moldmax Berilyum-Bakır alaşımını iş parçalarının bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri [14]	14
Çizelge 4.3. Elektro erozyon işleme girdi parametreleri ve ayarlama şartları	15
Çizelge 5.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları için varyans analizi	27
Çizelge 5.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları için Tukey testleri	27
Çizelge 5.3. Elektriksel iletkenlik ölçüm sonuçları için varyans analizi	28
Çizelge 5.4. Elektriksel iletkenlik ölçüm sonuçları için Tukey testleri	28
Çizelge 5.5. İşlemsiz, soğuk işlemli (Sİ) ve kriyojenik işlemli (Kİ) malzemeler için X-ray analiz sonuçları	29
Çizelge 5.6. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için varyans analizi	32
Çizelge 5.7. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için Tukey testleri	32
Çizelge 5.8. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için varyans analizi	34
Çizelge 5.9. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için Tukey testleri	34
Çizelge 5.10. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları için varyans analizi.	39

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.11. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları için Tukey testleri	40
Çizelge 5.12. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi.....	42
Çizelge 5.13. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için Tukey testleri	42
Çizelge 5.14. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için varyans analizi	45
Çizelge 5.15. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için Tukey testleri	46
Çizelge 5.16. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için varyans analizi	47
Çizelge 5.17. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için Tukey testleri	48
Çizelge 5.18. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları için varyans analizi	50
Çizelge 5.19. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları için Tukey testleri	50
Çizelge 5.20. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi	52
Çizelge 5.21. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen beyaz katman kalınlığı sonuçları için Tukey testleri	53

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.22. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin performans indeksleri için varyans analizi	55
Çizelge 5.23. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin performans indeksleri için Tukey testleri, E: Elektrot, İP: İş parçası	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Soğutma (Cool-down), ıslatma/emdirme (soak), ısıtma (Heat-up) ve temperleme (Tempering) aşamalarından oluşan tipik bir kriyojenik işlem döngüsü [32]	8
Şekil 4.1. Soğuk ve kriyojenik işlem döngüleri	16
Şekil 4.2. Elektriksel direnç test sistemi	20
Şekil 4.3. Bir difraksiyon eğrisi üzerinde B genişliği	21
Şekil 5.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları a) bakır (Cu), b) berilyum-bakır (Be-Cu)	26
Şekil 5.2. Elektriksel iletkenlik sonuçları a) bakır (Cu), b) berilyum-bakır (Be-Cu)	28
Şekil 5.3. Bakır elektrot malzemeleri için sıcaklığa ve ısı genleşme testlerine bağlı ısı genleşme eğrileri.....	30
Şekil 5.4. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızları.....	31
Şekil 5.5. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen elektrot aşınma hızları.....	33
Şekil 5.6. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları.....	39
Şekil 5.7. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlıkları.....	41
Şekil 5.8. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızları	45
Şekil 5.9. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen elektrot aşınma hızları	47

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri	49
Şekil 5.11. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlıkları	51
Şekil 5.12. Farklı önem derecelerine karşılık performans indeksleri.....	54

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Elektrot ve iş parçası malzemelerinin tanecik yapıları, a) işlemsiz bakır, b) işlemsiz berilyum-bakır, c) soğuk işlemlili bakır, d) soğuk işlemlili berilyum-bakır, e) kriyojenik işlemlili bakır, f) kriyojenik işlemlili berilyum-bakır	25
Resim 5.2. Aşınma ve deformasyon türleri a) işlenmiş bir iş parçası ve delik sonundaki şekil bozuklukları, b) aşınmamış bir elektrot, c) aşınmış bir elektrot üzerindeki aşınma ve deformasyon türleri.....	36
Resim 5.3. SEM görüntüleri (10A akım ve 80 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot	37
Resim 5.4. SEM görüntüleri (15A akım ve 80 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot	37
Resim 5.5. SEM görüntüleri (20A akım ve 20 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot	37
Resim 5.6. SEM görüntüleri (25A akım ve 60 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot	37
Resim 5.7. 10A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kriyojenik işlemlili elektrot ile.....	43
Resim 5.8. 15A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kriyojenik işlemlili elektrot ile.....	43
Resim 5.9. 20A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kriyojenik işlemlili elektrot ile.....	43
Resim 5.10. 25A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kriyojenik işlemlili elektrot ile	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
MRR_{max}	Maximum malzeme kaldırma hızı (mm^3/s)
MRR_{min}	Minimum malzeme kaldırma hızı (mm^3/s)
EW_{max}	Maximum elektrot aşınma hızı (%)
EW_{min}	Minimum elektrot aşınma hızı (%)
ASR_{max}	Maximum ortalama yüzey pürüzlülük (R_a , μm)
ASR_{min}	Minimum ortalama yüzey pürüzlülük (R_a , μm)
WLT_{max}	Maximum ortalama beyaz katman kalınlığı (μm)
WLT_{min}	Minimum ortalama beyaz katman kalınlığı (μm)
MRR_i	Performans indeksinin hesaplandığı deney şartı için malzeme kaldırma hızı (mm^3/s)
EW_i	Performans indeksinin hesaplandığı deney şartı için elektrot aşınma hızı (%)
ASR_i	Performans indeksinin hesaplandığı deney şartı için ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm)
WLT_i	Performans indeksinin hesaplandığı deney şartı için ortalama beyaz katman kalınlığı (μm)
a	Malzeme kaldırma hızının bağıl önemi (0-4)
b	Elektrot aşınma hızının bağıl önemi (0-4)
c	Ortalama yüzey pürüzlülüğünün bağıl önemi (0-4)
d	Ortalama beyaz katman kalınlığının bağıl önemi (0-4)
Kısaltmalar	Açıklama
NTM	Nontraditional manufacturing (Geleneksel olmayan imalat)
EDM	Electrical discharge machining (Elektro erozyon işleme)
EDD	Electro discharge drilling (Elektro erozyon delme)

Kısaltmalar	Açıklama
FCC	Face-centered cubic (Yüzey merkezli kübik)
BCC	Body-centered cubic (Hacim merkezli kübik)
DCT	Deep cryogenic treatment (Derin kryojenik işlem)
LN₂	Liquid nitrogen (Sıvı azot)
CNMR	Center for nontraditional manufacturing research
SEM	Scanning electron microscope (Tarama elektron mikroskobu)
NCEE	Nebraska center for excellence in electronics
FWHM	Full width at half maximum (Maksimum yoğunluğun yarısında tam genişlik)
ANOVA	Analysis of variance (Varyans analizi)
PI	Performance index (Performans indeksi)
AFM	Abrasive flow machining (Aşındırıcı akış ile işleme)
ECM	Electrical chemical machining (Elektro kimyasal işleme)

1. GİRİŞ

Süper alaşımlar, kompozit malzemeler ve seramikler gibi bazı ileri mühendislik malzemelerinin işlenmesi için gerekli imalat maliyeti, tornalama ve frezeleme gibi geleneksel imalat yöntemlerini kısıtlamaktadır. Çünkü, bu geleneksel imalat yöntemlerinin mekanizmaları kesici takımlar ve iş parçaları arasında meydana gelen mekaniksel temas ile ilişkilidir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri (NTM), bu zorlukların üstesinden gelebilmektedir. Elektro erozyon işleme (EDM), elektriksel enerjinin, sıvı dielektrik ortamına daldırılmış bir iş parçası ve elektrot arasındaki elektrik kıvılcımları vasıtasıyla termal enerjiye dönüştürüldüğü geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden birisidir. Bu kıvılcımlar vasıtasıyla oluşturulan ısı sürekli olarak iş parçasından küçük miktarlarda malzeme kaldırmaktadır ve kaldırılan bu küçük parçacıklar daha sonra dielektrik vasıtasıyla işleme bölgesinden dışarı atılmaktadır [1].

Elektro erozyon delme (EDD) işlemi, RAM tip (Kalıp-Dalma) elektro erozyon ile aynı çalışma prensibini kullanmaktadır ve bu yöntemde amaç, delik delme işleminin daha hızlı gerçekleştirilebilmesidir. Elektro erozyon delme işlemi özellikle türbin kanatları, yakıt enjektörleri, kesici takımların soğutma kanalları, sertleştirilmiş zımba ejektörleri, plastik kalıp havalandırma deliği ve tel elektro erozyon işleme başlatıcısı gibi delik delinmesi gereken takım ve parçaların imal edilmesinde kullanılabilir. Bu işlemin konvansiyonel delik delme, su jeti ile işleme, plazma, elektron demeti ve lazer ile işleme gibi yöntemlere göre üstünlüğü, çok sayıda küçük ve derin deliklerin elektrik iletkenliği olan ve konvansiyonel olarak işlenmesi zor olan sert malzemeleri kolayca delebilmesi, delme esnasında çapak oluşturmamasıdır. Bunun yanı sıra, önemli sayılabilecek elektrot aşınması, bu aşınmadan dolayı kör delikler için derinlik kontrolünün zor olması ve düşük delik kalitesi gibi mahzurları da vardır [2].

Elektro erozyon işleminin performansının geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Rajurkar ve Royo [3], elektro erozyon ile işlemede, dalma boşluğu kontrolü, orbital hareket kontrolü, radyo frekansı (R.F.) kontrolü ve orbital hareketli

radio frekansı kontrolü gibi bazı kontrol parametrelerinin malzeme kaldırma hızı ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, radio frekansı kontrolü ve orbital hareket kontrolünün elektro erozyon performansını önemli bir şekilde geliştirdiğini göstermişlerdir.

Kunieda ve ark. [4], püskürtmeyi, kuru elektro erozyon işleme olarak tanımlanan, elektro erozyon işlemede çalışma sıvısı olarak yüksek basınçlı gaz akışı kullanılması yoluyla sağlamışlardır. Geliştirdikleri bu tekniğin avantajları, özellikle oksijen gazı kullanıldığında, dikkat çekecek derecede az elektrot aşınması ve önemli bir şekilde yüksek malzeme kaldırma hızı olarak rapor edilmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda elektro erozyonda, erozyon boşluk mesafesinin frekans tepkimesini geliştirmek için piezoelektrik servo sistemi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak malzeme kaldırma hızı açısından önemli sonuçlar elde etmişlerdir [5].

Lee ve ark. [6], elektro erozyon işleme ile delik delme parametrelerinin bakır-tungsten elektrot ile AISI 1045 karbon çeliğinin işlenmesinde yüzey kalitesinin çeşitli yönleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, yüksek değerlerde akım ve vurum süresinde, malzeme kaldırma hızı, yüzey pürüzlülüğü, delik genişlemesi, ortalama beyaz tabaka kalınlığı ve indüksiyon ile oluşan kalıcı gerilmelerin artma eğiliminde olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar aynı zamanda, uzatılmış açık vurum süresi için malzeme kaldırma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey çatlağı yoğunluğunun azaldığını göstermişlerdir.

Sonuç olarak, elektro erozyon işleme performansını etkileyen parametreler; elektriksel değişkenlere (gerilim, akım, açık ve kapalı vurum süresi, polarite vb.), püskürtmeye (basınç, püskürtme yönü ve metodu) ve aynı zamanda malzeme karakteristiklerine (elektrot, iş parçası, dielektrik) bağlı olabilmektedir.

Kriyojenik soğutmanın ve soğuk/kriyojenik işlemin işleme performansına etkileri, tornalama [7, 8], frezeleme [9] ve delik delme [10] gibi geleneksel imalat yöntemlerinde geniş kapsamda incelenmektedir [11]. Ancak, kriyojenik soğutma ve soğuk/kriyojenik işlemin geleneksel olmayan imalat yöntemlerine etkileri henüz

geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi geniş kapsamda incelenmemiştir. Kriyojenik işlem yoluyla geleneksel imalat yöntemlerindeki olumlu gelişmeler özellikle kesici takımların kriyojenik işlem sonucunda artan sertliği ve aşınma dirençleri ile ilişkilendirilmiştir. Sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklere ek olarak kriyojenik işlem sonucunda malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri de iyileşebilmektedir. Kriyojenik işlem sonucunda elektrot ömrünün arttığı, bir çalışmada [12] rapor edilmiştir. Diğer taraftan, iş parçalarının kriyojenik işlemleri de aynı zamanda endüstride seri üretim için performans ve verimliliğe bağlı olarak önemli sonuçlar verebilir.

Elektrot malzemesi olarak kullanılan bakır, kolay elde edilebilmesi, kararlı bir kaliteye sahip olması ve düşük maliyetinden dolayı tercih edilebilir özelliklere sahiptir. Ancak elektro erozyon işlemede, hızlı elektrot aşınması ve yavaş malzeme kaldırma hızı, bakır elektrotlar ile ilişkilendirilen ana problemlerdir [13].

Berilyum-bakır alaşımları, yüksek güvenilirlikli mühendislik malzemeleri olarak bilinmektedir ve otomotiv, uzay, elektronik, elektromekanik, bilgisayar, telekomünikasyon ve tıp endüstrisi gibi uygulamalarda, yüksek yorulma dayanımları, sertlikleri, mükemmel aşınma ve korozyon dirençleri, iyi termal-elektriksel özellikleri ve manyetik olmayan özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar, her türlü düz ve helisel yay, dişli parçası, kontrol valfleri, diyafram diski ve vibratör kollarında kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, aynı zamanda, plastik ekstrüzyon kalıpları ve darbe dayanımı ile yüksek elektrik iletkenliğinin birlikte önemli olduğu belirli makine parçalarının imalatında da tercih edilmektedir. Ancak berilyum ve bileşenleri, yüksek derecede toksik bir madde olduğundan dolayı, toz, duman veya buhar olarak dağıldığında teneffüs veya temas ile ciddi solunum yolu hastalıklarına sebep olabilmektedirler. Dolayısıyla, işleme, kesme veya ısıtma esnasında ortaya çıkan çok küçük berilyum parçacıkları tehlikeli olabilmektedir. Bakır eritildiğinde ve az miktarda başka bir element eklendiğinde bu element düzenli ve homojen bir sıvı çözeltisi oluşturmak için eriyecektir. Bu çözelti dondurulduğunda ise alaşımlama elementi katı bir çözelti oluşturmak için çözelti içerisinde kalacaktır. Böylece, ilave edilen elementler bakır kristalinin bir parçası

olacaktır. Böyle katı çözelti alaşımlarında, bakırın yüzey merkezli kübik yapısı genellikle muhafaza edilmektedir. İlave edilen elementin atomları aynı kafes pozisyonlarında katı çözeltisi oluşturarak bakırın yerini almaktadır. Sonuçta, berilyum, bakır ile düzenli bir katı eriyik ve tek bir faz meydana getirecektir [14].

Bu çalışmada, soğuk ve kriyojenik işleme maruz kalmış bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri incelenmiştir. Soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının performansları elektro erozyon delme işleminde, malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı veya bağıl elektrot aşınması, elektrot deformasyonu, yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman kalınlığı sonuçlarına bağılı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, işlem görmüş malzemeler üzerinde mikroyapı, mikrosertlik, elektriksel iletkenlik, X-ray difraksiyonu ve ısı genleşme miktarındaki değışiklikleri belirlemek amacıyla gerekli testler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile soğuk ve kriyojenik işlem sonucunda malzeme özelliklerinde meydana gelebilecek değışimlere bağılı olarak elektro erozyon performansının sonuçları ortaya konulmuştur.

2. SOĞUBİLİM/KRİYOJENİ

Soğubilim veya kriyojeni, çok düşük sıcaklıkların (-150°C 'den daha az ve -273°C 'ye kadar büyüeyebilen) etkileri ile ilgili düşük ısı fiziğinin bir branşıdır. Helyum, hidrojen, neon, azot ve oksijen gibi sürekli gazların normal kaynama noktaları -150°C 'nin altındadır [15].

Soğubilim ilk defa Michael Faraday tarafından incelenmiştir. Michael Faraday, gazların sıvılaştırılabileceğini ve -100°C sıcaklıklara sahip düşük sıcaklıkların üretilabileceğini göstermiştir [16]. 1850 ve 1900 yılları arasında termodinamik prensiplerinin gelişmesi, soğubilimindeki ilerlemelere ilk katkıyı sağlamıştır. 1950 yıllarında soğubiliminin en önemli uygulaması, kriyojenik sıvıların kullanılması olmuştur. Gazlar için sıvılaştırma teknolojisi, 1850 ve 1900 yılları arasında geliştirilmiştir ve sıvılaştırma teknolojisinin endüstriye transferi ve sıvılaştırma hızlarının gelişmesi 1900 yılından 1950 yılına kadar gerçekleşmiştir [17].

Kriyojeni biliminin, uzay araştırmalarından gıdaların nakliyesine kadar birçok alanda uygulamaları bulunmaktadır [18]. Kriyojeni bilimi ile ilgili olarak kriyojenik sıcaklıkların malzeme özelliklerine etkileri geniş ölçüde incelenmiştir ve incelenmeye devam etmektedir. Bu etkiler, mekanik özellikler, termal özellikler ve elektriksel özellikler olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilirler.

2.1. Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlamak açısından, metaller kristal yapılarına göre sınıflandırılabilirler. Bunlar, Alüminyum (Al), Bakır (Cu), Altın (Au), γ -Demir (Fe), Kurşun (Pb), Nikel (Ni) gibi yüzey merkezli kübik (FCC), Krom (Cr), α -Demir (Fe), Molibden (Mo), Tantal (Ta), Tungsten (W), Vanadyum (V) gibi hacim merkezli kübik (BCC) ve Berilyum (Be), Kadmiyum (Cd), Magnezyum (Mg), Titanyum (Ti), Çinko (Zn) gibi sıkı düzenli hegzagonal (HCP) yapılarıdır.

Yüzey merkezli kübik metallerin -196°C sıvı azot sıcaklığında genellikle sünek olduğu, hacim merkezli kübik metallerin yüzey merkezli kübik metallerin aksine düşük sıcaklıklarda kırılgan olma eğiliminde olduğu ve bazı sıkı düzenli hegzagonal metallerin de düşük sıcaklıklarda sünek olarak kaldığı ama bazılarının kalmadığı belirlenmiştir [19, 20].

Malzemeler, akma mukavemeti, gerilme mukavemeti, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, sertlik, süneklik, tokluk ve elastikiyet modülü gibi mekanik özellikleri açısından incelenmişlerdir. Sıcaklığın azalması ile birçok mühendislik malzemesi için akma dayanımı, gerilme dayanımı, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, sertlik ve elastikiyet modülünün arttığı belirlenmiştir [20-24].

Jiao ve ark. [25], magnezyum alaşımı (AZ31B) ve titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) gibi düşük yoğunluklu alaşımların kriyojenik sıcaklıklarda mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, sıcaklığın azalması ile her iki alaşım için akma ve gerilme mukavemetlerinin arttığını göstermişlerdir. Farklı alüminyum alaşımları ile saf bakır ve bakır alaşımları için de akma ve gerilme mukavemetlerinin sıcaklığın azalması ile arttığı belirtilmiştir [26, 27].

2.2. Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Isıl Özelliklerine Etkisi

Ortam sıcaklığından aşağı derecedeki sıcaklıklarda ve özellikle mutlak sıfır sıcaklık değerinde özgül sıcaklık hızla düşmekte ve sıfıra yaklaşmaktadır [18, 20]. Tüm alaşımlar ve saf olmayan metaller için ısı iletkenlik, sıcaklığın azalması ile azalmaktadır. Örneğin, magnezyum (AZ31B) ve titanyum alaşımlarının (TC4) ısı iletkenliklerinin sıcaklığın azalmasıyla azaldığı gösterilmiştir [25]. Isıl uzama katsayısı, malzeme üzerindeki basınç sabit kalırken sıcaklıktaki birim değişme başına uzunluktaki değişim olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık arttıkça, ısıl uzama katsayısı da artmaktadır [21]. Paslanmaz çelik, alüminyum ve titanyumun ısıl uzamalarının (%) sıcaklığın azalmasıyla azaldığı gösterilmiştir [28].

2.3. Kriyojenik Sıcaklıkların Malzemelerin Elektriksel Özelliklerine Etkisi

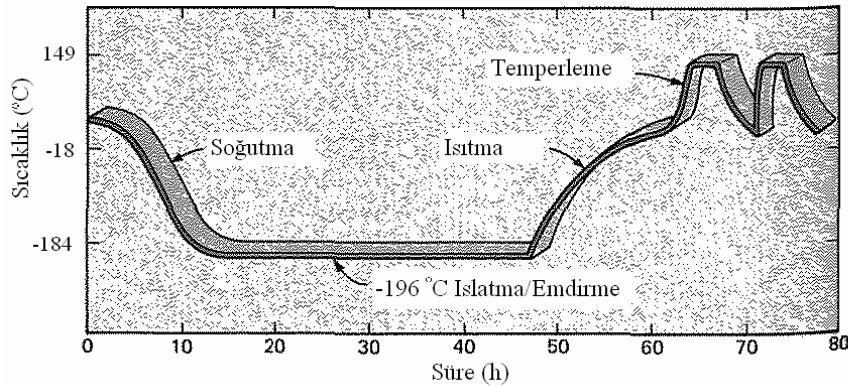
Bir malzemenin elektriksel iletkenliği, akım akış yönünde birim kesit alan başına düşen elektrik akımının gerilim gradyanına bölünmesi ile tanımlanmaktadır. Elektriksel özdirenç ise elektriksel iletkenliğin tersidir [21]. Sıcaklığın artmasıyla, bir metaldeki atomların termal titreşimleri daha güçlü olmaktadır ve bu titreşimler elektronların hareketlerini elektronların yönleri boyunca daha da zorlaştırmaktadırlar. Sonuç olarak bu durum, elektriksel özdirence sebep olmaktadır [29]. Ancak, bir metal soğutuldukça, atomların termal titreşimleri çok daha zayıf olacaktır. Bundan dolayı, elektriksel direnç azalacak ve elektriksel iletkenlik artacaktır. Magnezyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu alaşımların elektriksel dirençlerinin sıcaklık ile arttığı gösterilmiştir [25].

Brandao ve ark. [30], kriyojenik bir tel çekme yöntemi geliştirerek, kriyojenik sıcaklıkların bakırın elektriksel iletkenliği üzerine etkilerini sunmuşlardır. Uluslararası sertleştirilmiş bakır standardına göre oda sıcaklığında %92'den daha fazla bir iletkenlik değeri elde etmişlerdir. Benzer şekilde başka bir çalışma [31], sıcaklığın azalmasıyla bakırın elektriksel özdirencinin azalacağını ve dolayısıyla elektriksel iletkenliğinin artacağını göstermiştir.

Sonuç olarak yukarıdaki bulgular, düşük sıcaklıkların malzemelerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine etkilerinin dikkate değer olduğunu kanıtlamıştır. Bu sonuçlar, endüstride düşük sıcaklıkların bir ısıtım işlem yöntemi olarak kullanılması için ilgi uyandırmıştır ve bu işlemler soğuk veya sıfır altı ve kriyojenik işlem olarak adlandırılmıştır. Bu işlemler, imalat ve otomotiv endüstrilerinde geniş ölçüde birçok takıma (matkaplar, kılavuzlar, raybalar, frezeler, zımbalar, bıçaklar, azdırma dişliler vb.) ve parçaya (krank mili, fren diskleri, kalıplar, rulmanlar vb.), takım ve parçaların dayanımlarını, sertliklerini ve aşınma dirençlerini artırmak için uygulanmıştır [12, 32]. Böylece endüstride önemli kazançlar elde edildiği rapor edilmiştir [33].

3. SOĞUK (SIFIR-ALTI) VE KRIYOJENİK İŞLEM

Tanım olarak -150°C sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkları ifade eden kriyojeni veya soğubilimine bağlı olarak kriyojenik işlem -150°C 'den aşağıdaki veya yaklaşık -196°C sıvı azot sıcaklığındaki uygulama sıcaklıkları ile tanımlanabilmektedir. Soğuk işlem veya sıfır altı işlem ise, sıfırın altındaki ama kriyojenik sıcaklıklardan yüksek sıcaklıkları (yaklaşık -80°C) içermektedir. Endüstrinin kriyojenik işleme ilgisi, 1950 ve 1960 yıllarında ilk uzay programı ve bu uzay programının takım üreticilerini teşvik etmesi ile başlamıştır. Başlangıçta bu firmalar kriyojenik işlemi takımları sıvı azot içerisine daldırarak denemişlerdir; ancak bu yöntem takımların termal şoklar sonucu zarar görmesi ile sonuçlanmıştır. Dolayısıyla, termal şok olasılığını azaltmak için programlanabilir sıcaklık denetleyicilerini, sıvı azot akışını kontrol etmek için bir selenoid valfi ve iş parçası sıcaklığını görüntülemek için bir ısı çifti de içeren daha etkili ve kontrollü teknikler geliştirilmiştir [33-36]. Şekil 3.1, tipik bir kriyojenik işlem döngüsünü göstermektedir.



Şekil 3.1. Soğutma (Cool-down), ıslatma/emdirme (soak), ısıtma (Heat-up) ve temperleme (Tempering) aşamalarından oluşan tipik bir kriyojenik işlem döngüsü [32]

Soğuk ve kriyojenik işlemler, parçaların ortam sıcaklığından soğuk/kriyojenik sıcaklıklara belirli bir zaman aralığında (derece/saat veya derece/dakika) soğutulduğu yavaş soğutma aşaması/döngüsü, parçaların soğuk/kriyojenik sıcaklıklarda belirlenen sürede (saat) bekletildiği ıslatma aşaması ve parçaların soğuk/kriyojenik sıcaklıklardan temperleme sıcaklıklarına kadar başka bir zaman aralığında

(derece/saat veya derece/dakika) ısıtıldığı temperleme/ısıtma aşaması olmak üzere üç ana aşamadan meydana gelmektedir. Bu seçenekler, istenilen özelliklere, maliyete ve parçaların şekil ve boyutuna bağlıdır [34, 37, 38].

3.1. Soğutma Aşaması

Soğutma aşamasında parçalar ortam sıcaklığından soğuk/kriyojenik sıcaklıklara belirli bir zaman aralığında (derece/saat veya derece/dakika) soğutulmaktadır. Soğutma aşamasının, işlem gören malzemenin nihai özelliklerine çok az bir etkisinin olduğu belirlenmiştir [39]. Dolayısıyla, malzemelerin işlem sıcaklığına, işlem zamanını azaltmak ve böylece maliyeti de azaltmak için termal şoklara sebep olmadan mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde soğutulması tavsiye edilmektedir.

3.2. Islatma/Emdirme Aşaması

Islatma aşamasında, parçaların soğuk/kriyojenik sıcaklıklarda belirlenen sürede (saat) bekletilmesi sağlanmaktadır. Islatma aşamasının, işlem gören malzemenin nihai özellikleri açısından önemli olduğu belirtilmiştir ve bu aşama, malzeme içerisindeki atomların yeni konumlara yayılması için gerekmektedir [39]. Moore ve Collins [40] yaptıkları çalışma sonucunda değişken kriyojenik bekletme sürelerinin, D2 takım çeliğinin sertliğini etkilemediğini ancak H13 takım çeliğinin sertliğinin süreye bağlı olarak arttırdığını göstermişlerdir. Ancak, Collins ve Dormer [41], artan süreli kriyojenik sıcaklıkların D2 takım çeliğinin aşınma direncini geliştirdiğini göstermişlerdir. Araştırmacılar, karbür sayısı ve sonuç olarak aşınma direnci açısından kriyojenik işlemde azami miktarda fayda elde edilmesi için kriyojenik sıcaklıklarda bekletme süresinin en az 24 saat olması gerektiğini tavsiye etmişlerdir. Sonuç olarak Collins [42, 43], takım çelikleri için kriyojenik sıcaklıklarda daha uzun bekletme süresine bağlı olarak daha iyi karbür dağılımı ve aşınma direncinde daha fazla artış olacağını belirtmiştir. 24 saat ve 48 saat ıslatma süreleri arasında başka bir karşılaştırma da T1 ve M2 yüksek hız çelikleri için yapılmıştır [44]. T1 takım çeliğinin darbe tokluğu ve eğilme dayanımı 48 saat ıslatma süresi ile artarken, M2 takım çeliğinin sonuçlarının ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Mohan Lal ve ark.

[45] farklı soğuk ve kriyojenik işlem şartlarından sonra M2, T1 ve D3 takım çeliklerinin aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar karşılaştırma sonucunda, -110 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile işlem gören numuneler ile -180 °C sıcaklıkta 6 saat süre ile işlem gören numunelere göre daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir. Bu sonuçlar, ıslatma süresinin, sıcaklığı düşürmekten daha önemli olduğunu kanıtlamaktadır. Lulay ve ark. [46] 7075 alüminyum alaşımının kriyojenik işleminde ıslatma süresinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Ancak, 2 saat ve 48 saat ıslatma süreli kriyojenik işlemler arasında, akma dayanımı, gerilme dayanımı, uzama ve sertlik gibi özelliklerin karşılaştırılmasında önemli bir fark olmadığını göstermişlerdir. Sadece Charpy darbe testi, 48 saat bekletme süreli kriyojenik işlem sonucunda 12% ile en büyük değişimi göstermiştir.

3.3. Isıtma ve Temperleme Aşaması

Temperleme, genellikle kriyojenik işlemten sonra, işlem gören malzemelerin darbe dirençlerini geliştirmek için gerçekleştirilmektedir. Temperleme, malzeme karakteristikleri ve istenilen özelliklere bağlı olarak tek, çift veya üçlü döngüler olarak gerçekleştirilebilmektedir [34]. Ancak, nihai etki için herhangi bir temperleme işleminin kriyojenik işlem sürecinden önce gerçekleştirilmesi tavsiye edilmemektedir [47]. Ayrıca, en önemli faydanın, kriyojenik işlemin sertleştirme (su verme) ve temperleme işlemlerinin arasına yerleştirildiğinde türetildiği belirtilmiştir [43]. Yun ve ark. [44], derin kriyojenik işlemin (DCT) üçlü bir temperleme işleminden önce ve sonra olmak üzere T1 ve M2 yüksek hız çeliği malzemelerinin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, temperleme işleminden önceki derin kriyojenik işlemin darbe tokluğu ve eğilme dayanımı açısından temperlemeden sonraki derin kriyojenik işleme göre daha iyi sonuçlar gösterdiğini sunmuşlardır. Molinari ve ark. [48], H13 takım çeliği için, çift temperleme şartlarından önce ve sonra gerçekleştirilen derin kriyojenik işlemi incelemişlerdir. Araştırmacılar, temperleme işleminden önce yapıldığında, derin kriyojenik işlemin H13 takım çeliğinin sertlik ve aşınma dirençlerini artırdığını göstermişlerdir. Collins [43], D2 takım çeliklerinde ince tanecikli karbürlerin ve aşınma oranının iyileşmesi açısından 560°C temperleme sıcaklığı ile kriyojenik işlemin 200°C temperleme

sıcaklığı ile kriyojenik işleminden daha iyi sonuç verdiğini ifade etmiştir. Ancak bu bilgilere ek olarak başka bir çalışmada, ısıtma aşamasının yavaş olarak gerçekleştirilmesinin gerektiği ve temperleme işlemi için sıcaklığın 500°C'den daha yukarı artırılmasının kriyojenik işlemin yararlı etkilerini ortadan kaldıracağı belirtilmiştir [39].

3.4. Soğuk ve Kriyojenik İşlem için Genel Değerlendirme

Barron [49], soğuk ve kriyojenik işlemlere maruz kalan birçok takım çeliği ve paslanmaz çelik malzemelerin aşınma dirençlerini incelemiştir. Barron, her iki işlem için aynı soğutma oranı (3°C/dak.) ve ıslatma süresini (24 saat) kullanmıştır ve her iki işlem için de aşınma dirençlerinin arttığını ve paslanmaz çelik malzemeler için soğuk ve kriyojenik işlem sonuçlarının birbirine yakın olduğunu bulmuştur. Ancak, takım çeliklerinin çoğunda en iyi sonuçlar kriyojenik işlem sonucunda elde edilmiştir. Benzer şekilde, farklı tür takım çelikleri için, kriyojenik sıcaklıkların daha düşük sıcaklıklar ile karşılaştırıldığında aşınma direncini daha fazla geliştirdiği gösterilmiştir [41, 45].

Kriyojenik işlemin çelik malzemeler üzerine etkilerinin sebepleri ile ilgili olarak en önemli bulgulardan birisi östenitin martensite dönüşmesi ve diğer önemli bulgu ise büyük miktarda ince tanecikli karbürlerin çökeltisi sonucunda aşınma direnci açısından malzemenin kuvvetlendirilmesidir [34, 42]. Bakır alaşımları ile ilgili olarak kriyojenik işlemin, kristal yapının homojenliğini artırdığı, boşlukları ve alaşım elementlerinin yer değiştirmelerini ortadan kaldırdığı ve sonuç olarak iyileştirilmiş yapısal yoğunluğun elektriksel iletkenliğini geliştirdiği iddia edilmektedir [50].

Tarr ve Rhee [51], temperleme işlemini (2 saat süreli 589 K) içeren kriyojenik işlemin krom-bakır alaşımı esaslı direnç kaynağı elektrotlarının termal iletkenliği üzerine etkisini incelemiştir. Araştırmacılar, kriyojenik işlemin, krom miktarının bakır eriyiği içerisinde düşük sıcaklıklarda daha az seviyede olmasından dolayı malzemenin sertliğini etkilemeksizin, termal iletkenliği %3 ile %4 arasında artırdığını ortaya koymuşlardır.

Isaak ve Reitz [52], kriyojenik işlemin, başka bir bakır alaşımı (GRCop-84) üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacıların bulguları şunlardır; temperleme işlemi tarafından takip edilen kriyojenik işlem, malzemenin sertliğini %6 civarında azaltmıştır, kriyojenik işlem aynı zamanda elektriksel öz direncin %5-6 civarında azalmasına ve buna bağlı olarak da daha yüksek termal iletkenliğe (Wiedemann-Franz-Lorenz kanununa göre) sebebiyet vermiştir, temperleme işlemi olmaksızın kriyojenik işlem daha büyük elektriksel öz direnç değerlerine sebep olmuştur. Ancak mekanik özellikler açısından, Chillar ve Agrawal [38], kriyojenik işlem sonucunda bakır ve bakır alaşımlarının kesme dayanımı ve sertlik gibi özelliklerinde herhangi bir kazanç sağlanmadığını göstermişlerdir.

3.5. Elektro Erozyon İşleme için Kriyojenik Soğutma ve Soğuk/Kriyojenik İşlemler

Elektro erozyon işleme için ideal bir elektrot malzemesinin yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe ve işleme esnasında milyonlarca şok dalgasına dayanabilmesi için yüksek yorulma dayanımına sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda, elektro erozyon ile işlemede daha iyi elektriksel özellikler iş parçası malzemesi için de gerekmektedir. Soğubilim ve soğubilimin imalat yöntemlerine uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar, kriyojenik soğutmanın ve kriyojenik işlemin uygulanan malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini geliştirebildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kriyojenik işleme maruz bırakılmış elektrot ve iş parçası malzemelerinin elektro erozyon işleme performansına net etkilerini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışmanın gerçekleştirilmesi ilgi çekici olacaktır. Literatürde bu konu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Çizelge 3.1, literatürde bulunan, kriyojenik soğutma ve kriyojenik işlemin elektro erozyon işleme yöntemindeki uygulamalarını içeren bazı çalışmaları, bu çalışmalarda kullanılan elektrot-iş parçası çiftlerini ve elde edilen sonuçları özetlemektedir. Kriyojenik soğutma uygulanan metotlarda elektrot malzemeleri işleme esnasında bir kriyojen ile kriyojenik olarak soğutulmuştur. Örnek olarak, Gavrilas ve ark.'nın [53] kurduğu deneysel düzende sıvı azot (LN_2) ve freon, elektroda bir boru ile

taşınmaktadır. Bu düzenekte sıvı azot akış kontrolü, sıvı azot kaynağı, elektrot üzerine yerleştirilen bir güç çevirici ve manyetik valfi kontrol etmek için kullanılan bir regülatör ile sağlanmıştır. Abdulkareem ve ark. [54] ise sıvı azot akışını kare şekilli bir elektrot üzerine yerleştirilen sıvı azot giriş ve çıkışları ile sağlamışlardır. Literatürde bulunan çalışmalarda [55, 56], kriyojenik işlemler elektrot malzemelere, elektro erozyon işleme performanslarının belirlenmesi amacıyla, sıvı azot sıcaklıklarında uygulanmışlardır. Bu çalışmada ise kriyojenik işlem ile birlikte malzemelere ikinci bir yöntem olarak soğuk işlem de uygulanmıştır. Ayrıca mevcut olan çalışmalardan farklı olarak soğuk ve kriyojenik işlemler berilyum-bakır alaşımı iş parçalarına uygulanmıştır.

Çizelge 3.1. Elektro erozyon işleme yönteminde kriyojenik soğutma ve soğuk/kriyojenik işlem uygulamaları

Metot	Elektrot Malzemesi	İş Parçası Malzemesi	Elde Edilen Sonuçlar	Araştırmacılar
Freon ve Sıvı Azot ile Kriyojenik Soğutma	Bakır Alüminyum Dökme Demir Çelik	C120 Çelik	-Malzeme kaldırma hızında Artış -Relatif Elektrot Aşınmasında Azalma -Yüzey Pürüzlülüğünde Azalma -Beyaz Katman Kalınlığında Azalma	Gavrilaş ve ark. [53]
Dielektrik olarak Sıvı Azot Kullanımı	Bakır Grafit	AISI H13	-Beyaz Katman Kalınlığında Önemsiz Değişim -Elektrot Malzemesi ile Alaşımlanmış Beyaz Katman -Düşük Malzeme kaldırma hızı	Fredriksson ve Hogmark [57]
Kriyojenik İşlem	Bakır	Inconel 738	-Malzeme kaldırma hızında Artış -Elektrot aşınma hızında Azalma	Mukkapati ve ark. [55]
Sıvı Azot ile Kriyojenik Soğutma	Bakır	Ti-6Al-4V	-Elektrod Aşınmasında Azalma -Yüzey Pürüzlülüğünde Azalma	Abdulkareem ve ark. [54]
Kriyojenik İşlem	Bakır Bakır-Krom Titanyum	CP Titanyum (Titan 15)	-Malzeme kaldırma hızında Artış -Elektrot aşınma hızında Azalma -Yüzey Pürüzlülüğünde Azalma -Ölçüsel Tamlıkta Artış	Singh ve Singh [56]

4. MALZEME VE METOT

Deneyler Nebraska-Lincoln Üniversitesi'nde Geleneksel Olmayan İmalat Araştırmaları Merkezi'nde (CNMR), ZNC/50A model Elektro Erozyon Delik Delme Tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1. Malzeme

İş parçası malzemesi olarak 26x26x13 ölçülerinde Moldmax Berilyum-Bakır alaşımı ve elektrot malzemesi olarak da web tip çok kanallı (2 kanallı), Ø3x300 ölçülerinde C-122 bakır kullanılmıştır. Bu bakır elektrotlar ekstrüzyon ile üretilmişlerdir ve yarı sert malzeme olarak bilinmektedirler. İş parçası ve elektrot malzemelerinin kimyasal bileşimleri ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de sırası ile verilmiştir. Dielektrik sıvısı olarak, elektro erozyon delik delme işlemi için tavsiye edilen Commonwealth EDM-244 yağ kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. C-122 bakır elektrot için bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler [58]

Kimyasal Bileşim (% ağırlıkça)	Bakır (Cu)		Fosfor (P)
	99.90		0.015-0.04
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Yoğunluk (kg/m ³)	Gerilme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)
	8940.609	220.632	68.947

Çizelge 4.2. Moldmax Berilyum-Bakır alaşımı iş parçalarının bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri [14]

Kimyasal Bileşim (% ağırlıkça)	Berilyum	Kobalt+Nikel	Kobalt+Nikel +Demir	Kurşun	Bakır
	1.8	0.2	0.6	0.4	97
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastikiyet Modülü (N/mm ²)	Isıl Genleşme Katsayısı (in./in./°F, 70-400°F)	Termal İletkenlik (W/m.°F)	Ergime Noktası (°C)
	8387.011	131x10 ³	9.7x10 ⁻⁶	5.35	871-926

4.2. Metot

Çizelge 4.3 bu çalışmada kullanılan elektro erozyon işleme girdi parametre ayarları için değişkenleri ve farklı deney şartlarını göstermektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada, her bir deney şartının sonuçlarını incelemek amacıyla toplam olarak 80 deneyden meydana gelen iki faktörlü ve dört seviyeli bir tam faktöriyel deneysel tertibi (4x4x5) seçilmiştir. Bu deneyler ve deneyler sonucundaki ölçümler hata oranını azaltmak için iki defa tekrar edilmiştir. Sonuçlar, bu deneylerin ortalamalarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma gerilimi, kapasitans, mil hızı, boşluk gerilimi, servo ilerleme hızı ve dielektrik basıncı gibi diğer girdiler sırasıyla 150 V, 3 μ F, 187 dev/dak, 20 V, 50 ve 75 kg/cm² olacak şekilde sabit olarak muhafaza edilmiştir. Dielektrik püskürtme işlemi sadece elektrotların iki kanalı yoluyla sağlanmıştır. Kör delik elde etmek amacıyla, tüm testlerde 20mm delik derinliği ayarlanmıştır.

Çizelge 4.3. Elektro erozyon işleme girdi parametreleri ve ayarlama şartları

Elektro Erozyon İşleme Parametreleri	Ayarlama Şartları
Çalışma Akımı (A)	10, 15, 20, 25
Açık (t_{on}) / Kapalı (t_{off}) Vurum Süresi (μ s)	20, 40, 60, 80
Vurum Süresi Faktörü - $t_{on}/(t_{on}+t_{off})$ (%)	50
Deney Şartları	1- İşlemsiz Elektrot ve İşlemsiz İş Parçaları 2- Soğuk İşlemlili Elektrot ve İşlemsiz İş Parçaları 3- Kriyojenik İşlemlili Elektrot ve İşlemsiz İş Parçaları 4- İşlemsiz Elektrot ve Soğuk İşlemlili İş Parçaları 5- İşlemsiz Elektrot ve Kriyojenik İşlemlili İş Parçaları

4.2.1. Soğuk ve kriyojenik işlem döngüleri

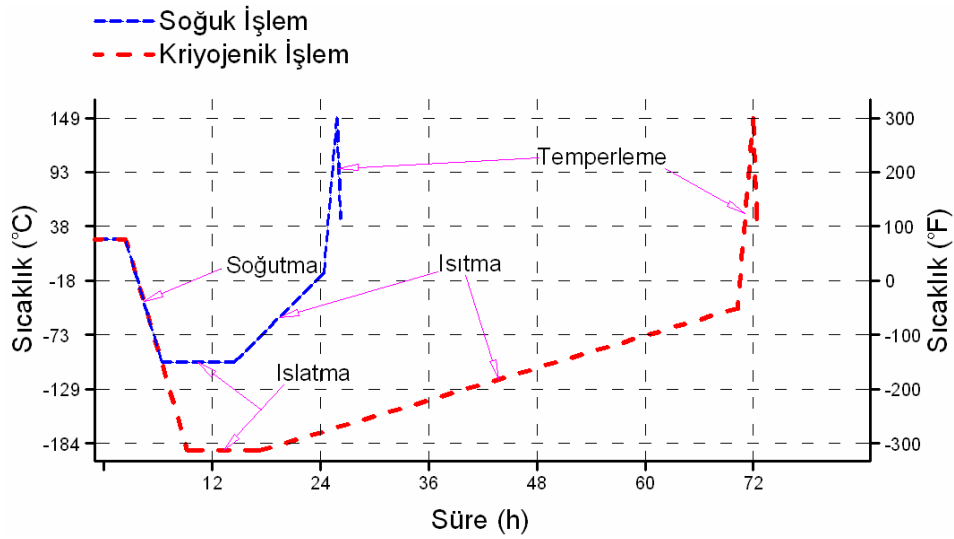
Soğuk ve kriyojenik işlemler, her iki işlem için de soğutma oranı ve ısılatma süreleri aynı olacak şekilde, Applied Cryogenics, Inc. Firması tarafından Şekil 4.1'de gösterilen işlem döngüleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Soğuk işlem için termal döngü aşağıda anlatılmıştır.

- 4 saat sürede oda sıcaklığından -100 °C (-150 °F) sıcaklığa doğrusal azalış,
- 8 saat süre ile -100 °C (-150 °F) sıcaklıkta bekletme,

- Yaklaşık olarak 10 saatin üzerinde kapalı hazne içerisinde ortam ısı kazancı ile oda sıcaklığına yakın ısıtma,
- 1 saat içerisinde $+150^{\circ}\text{C}$ ($+300^{\circ}\text{F}$) sıcaklığa kadar doğrusal artış,
- 1 saat süre ile $+150^{\circ}\text{C}$ ($+300^{\circ}\text{F}$) sıcaklıkta bekletme,
- Açık haznede parçaların tekrar oda sıcaklığına kadar soğumasının sağlanması.

Kriyojenik işlem için ise termal döngü aşağıdaki gibidir:

- 6 saat süre ile oda sıcaklığından -185°C (-300°F) sıcaklığa doğrusal azalış,
- 8 saat süre ile -185°C (-300°F) sıcaklıkta bekletme,
- Yaklaşık olarak 52 saatin üzerinde kapalı hazne içerisinde ortam ısı kazancı ile oda sıcaklığına yakın ısıtma,
- 1 saat içerisinde $+150^{\circ}\text{C}$ ($+300^{\circ}\text{F}$) sıcaklığa kadar doğrusal artış,
- 1 saat süre ile $+150^{\circ}\text{C}$ ($+300^{\circ}\text{F}$) sıcaklıkta bekletme,
- Açık haznede parçaların tekrar oda sıcaklığına kadar soğumasının sağlanması.



Şekil 4.1. Soğuk ve kriyojenik işlem döngüleri

4.2.2. Malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı ve elektrot şekil deformasyonu

Elektrot aşınma hızı aynı zamanda bağıl aşınma olarak da adlandırılmaktadır ve elektrot üzerinden kaldırılan/aşınan malzeme hacminin iş parçası üzerinden kaldırılan malzemenin hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır [59]. Malzeme kaldırma hızları ve bağıl elektrot aşınma hızları 1210 gr kapasiteli ve 0.001 gr okunabilirlikli hassas ölçekli bir Sartorius E-1200S model terazi kullanılarak, işleme öncesi ve işleme sonrası iş parçalarının ve elektrotların ağırlık farklarının karşılaştırılmasıyla ölçülmüştür. Bu ölçümler Eş. 4.1 ve Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Elektrot deformasyonlarının incelenmesi amacıyla bazı Tarama Elektron Mikroskop (SEM) resimleri çekilmiştir.

$$\text{Malzeme Kaldırma Hızı} = \frac{\text{İş Parçasından Kaldırılan Malzeme Hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{İşleme Zamanı (saniye)}} \quad (4.1)$$

$$\text{Bağıl Aşınma} = \frac{\text{Elektrottan Kaldırılan Malzeme Hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{İş Parçasından Kaldırılan Malzeme Hacmi (mm}^3\text{)}} \times 100 \quad (4.2)$$

4.2.3. Ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) testleri

Ortalama yüzey pürüzlülüğü, R_a (yüzey seviyesinden ortalama mutlak sapma), değerleri maksimum 100 μm dikey aralıklı bir AMBIOS XP-2 Stylus Profiler kullanılarak ölçülmüştür. Stylus hızı, stylus uç radyüsü, stylus kuvveti, veri göstergesi ve ölçüm uzunluğu sırasıyla 0.05 mm/s, 2.5 μm , 10 mg, 12500 ve 10mm'dir. Tüm ölçümler delik içi boyunca delik üst yüzeyinden 1 mm içeride başlanarak gerçekleştirilmiştir. Gerekli kalibrasyon, ölçümlerden önce yapılmıştır. Ölçüm yapılacak tüm parçalar ölçümlerden önce bir ultrasonik temizleyici (3210 Branson) kullanılarak aseton içerisinde 20 dakika süre ile temizlenmiştir.

4.2.4. Mikroyapı ve ortalama beyaz katman kalınlığı incelemeleri

Mikroyapı ve beyaz katman kalınlığı incelemeleri için ilk aşama olarak, mikroyapısı ve beyaz katman kalınlığı incelenecek tüm malzemelerin yüzeyleri, mekanik olarak 240, 320, 400 ve 600 tanecik boyutlu ıslak durumdaki zımpara kâğıtları kullanılarak parlatılmıştır. İkinci aşamada, aynı yüzeyler 3 μm , 1 μm ve 0.05 μm alüminyum oksit aşındırıcılar kullanılarak tekrar ikinci bir parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bakır numuneler, bir Buehler Minimet 1000 Grinder parlatıcı cihaz kullanılarak ayrıca parlatılmıştır. Bu işlem için, 15 dakika parlatma süresi, 25 dev/dak parlatma hızı ve 3.6 kg parlatma kuvveti tercih edilmiştir. Bakır numunelerin son parlatma işlemleri elmas macun kullanılarak tamamlanmıştır. Mekanik parlatma işlemlerinden sonra, numunelerin incelenecek yüzeyleri kimyasal aşındırma işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlem, 20 ml. amonyum hidroksit (NH_4OH), 8-20 ml. %3 ölçekli hidrojen peroksit (H_2O_2) ve 0-20 ml. damıtılmış su (H_2O) bileşimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kimyasal bileşim, bakır ve berilyum-bakır alaşımları için tavsiye edilmektedir [60]. Kimyasal aşındırma işlemi yaklaşık olarak 1~5 saniye süre ile parça yüzeylerine uygulanmıştır ve daha sonra bu yüzeyler su ile temizlenmiştir. Kimyasal aşındırma işleminden sonra, numuneler bir Leica DM 2500 M optik mikroskop kullanılarak 200x ve 500x büyütme değerlerinde görüntülenmiştir. Aynı mikroyapılar üzerinde fazların ortalama tane boyutlarını hesaplamak için $D = L / N$ eşitliği kullanılmıştır [61]. Bu eşitlikte D ortalama tane boyutunu (μm), L toplam çizgi uzunluğunu (mm) ve N ise çizgiler üzerindeki tane sayısını ifade etmektedir. Bu ölçümlerde her bir işlem şartı için beş adet mikroyapı fotoğrafı kullanılmıştır ve her bir mikroyapı fotoğrafı üzerinde eşit aralıklı beş adet çizgi çizilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu ölçümlerin ortalamaları olarak belirlenmiştir. Ancak bakır malzemelerin tane sınırları, berilyum-bakır alaşımı gibi belirgin olmadığından bu ölçümler sadece berilyum-bakır alaşımları için gerçekleştirilmiştir. Ortalama beyaz katman kalınlığı ölçümleri için görüntü alınan resimler, bir yazılıma (Photoshop) aktarılmıştır ve bu ölçüm değerleri piksel-mikron dönüşümü yapılarak elde edilmiştir. Bu ölçümler, numunelerin delik üst yüzeyinden 10 mm derinliğe kadar 2 mm aralıklı ve her bir aralıkta toplam 15 ölçüm değeri olarak

gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir delik üzerinden hata payını azaltmak için toplamda 75 ölçüm değeri elde edilmiştir ve bu değerlerin ortalamaları kullanılmıştır.

4.2.5. Mikrosertlik testleri

Bakır ve berilyum-bakır alaşımlarının mikrosertlik testleri, Nebraska Üniversitesi Malzeme Bilimi laboratuvarlarında bir Wilson Tukon-Knoop Indenter (Series 200) mikrosertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde 500 gram yük ve 10 saniye bekleme süresi kullanılmıştır. Bakır elektrot numuneler, ölçüm cihazına kolay bağlanabilmeleri amacıyla metalografik polimer disk içerisine monte edilmişlerdir. Her bir numune üzerinden toplam 15 ölçüm değeri alınmıştır ve bu değerlerin ortalamaları, standart sapmaları ile birlikte sonuç olarak sunulmuştur.

4.2.6. Elektriksel direnç/iletkenlik testleri

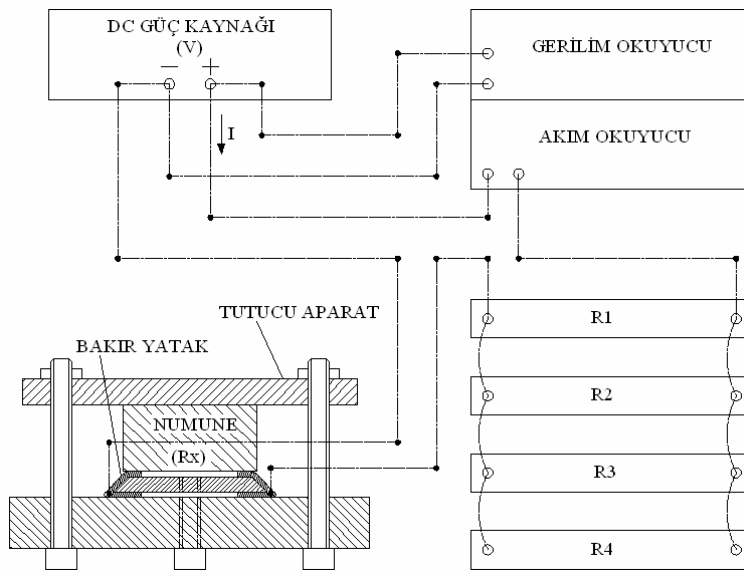
Elektriksel öz direnç/iletkenlik testleri Nebraska-Lincoln’de NCEE laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2, elektriksel direnç test sistemini göstermektedir. Bu sistem, gerilim akışı için bir adet DC ayarlı güç kaynağı (BK Precision 1692), gerilim ve akım ölçümleri için iki adet multimetre (Fluke 45 Dual Display), dört adet rezistans/ayarlı direnç (Milwaukee 11/00, 8 ohm, 12M59-8, Pat. 3581266, $\pm 10\%$) ve direnç ölçümü yapılacak numunenin bağlanması için bir tutucu aparattan meydana gelmektedir. Tutucu aparat, alt ve üst yatak olmak üzere iki adet parçadan meydana gelmektedir ve bu parçalar ölçümün doğruluğunu artırmak için teflon malzemeden imal edilmişlerdir. R1, R2, R3 ve R4 rezistansları birbirlerine paralel olarak bağlanmışlardır. Bu sistem, doğru akımlı devreler için temel Ohm kanunu esaslı çalışmaktadır. Sistemin kalibrasyonu, sistemin, ölçümü yapılacak parçanın sisteme dâhil edilmeden çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Elektriksel direnç ve iletkenlik hesaplamaları Eş. 4.3, Eş. 4.4 ve Eş. 4.5 yardımıyla yapılmıştır. Bu eşitliklerde, “Ry” ölçümü yapılacak numuneyi içermeyen sistemin direncini, “V” gerilim değerini (volt), “I” güç kaynağı tarafından sağlanan akım değerini (amper), “Rx” numunenin direncini, “ σ ” elektriksel iletkenliği (mhos) ve “ ρ ” ise elektriksel direnci (Ωm) ifade etmektedir. Gerilim ve akım değerleri kalibre edilmiş multimetreler kullanılarak

ölçülmüştür. Bu metot, ölçümü yapılacak numunenin direncinin hesaplanabileceği bir aralık dâhilinde akım ve gerilim değerlerini artırmak amacı ile kullanılmaktadır.

$$R_y = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = V/I \quad (4.3)$$

$$R_x = (V - I \times R_y)/I \quad (4.4)$$

$$\sigma = 1/\rho \quad (4.5)$$

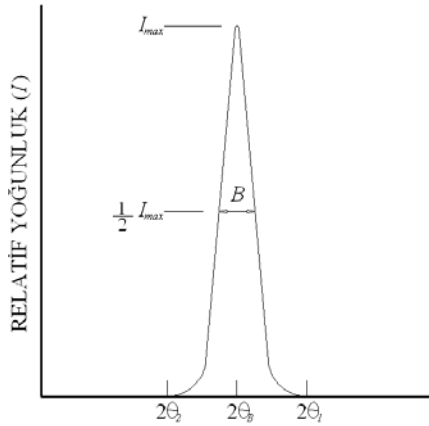


Şekil 4.2. Elektriksel direnç test sistemi

4.2.7. X-ray testleri

X-ray testleri, bir Rigaku MultiFlex difraktometre üzerinde Cu Ka radyasyonu kullanılarak Theta-Theta (2θ) geometrisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler ayrıca daha sonra D8 Discover difraktometre üzerinde tekrar edilmiştir. Ölçüm parametreleri olarak 20° başlangıç açısı, 80° bitiş açısı, 1 derece/saniye tarama hızı, 0.04° adım büyüklüğü, 40 kV gerilim ve 44 mAmps akım değerleri kullanılmıştır. Analizler 0°, 5°, 10° ve 15° eğim açıları (ψ) gerçekleştirilmiştir. X-ray difraksiyon metodu, bir metal veya bir kristal yapısı içerisindeki bir grup atomların paralel düzlemleri arasındaki mesafe ile difraksiyon açısı arasında bağlantı kuran

Bragg denklemini (Eş. 4.6) kullanmaktadır [62]. Bu denklemde, λ dalga boyu, d düzlemler arası boşluk ve θ_B en yüksek relatif yoğunluk değerindeki difraksiyon açısını ifade etmektedir. Şekil 4.3, örnek bir difraksiyon eğrisi üzerinde B genişliğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Bir difraksiyon eğrisi üzerinde B genişliği

B genişliği genellikle maksimum yoğunluğun yarısına eşit bir yoğunlukta radyan cinsinden ölçülmektedir ve bu ölçüm genişliği maksimum yoğunluğun yarısında tam genişlik (FWHM) olarak adlandırılmaktadır. Ancak, B genişliğinin doğrusal bir genişlik olmadığı, 2θ olarak açısal bir genişlik olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. B genişliğinin ölçümü kabaca, difraksiyon çizgisinin üçgen şeklinde olup yoğunluğun sıfır olduğu iki açı arasındaki farkın yarısı olacaktır (Eş. 4.7). Malzemede kalıntı gerilmeler mevcut olduğunda, atomların düzlemleri her iki malzemenin gerginlik durumundaki gibi birbirinden ayrı veya basınç durumundaki gibi birbirine yakın olabilmektedir. Sonuç olarak bu gerilmeler, Eş. 4.8 yardımı ile hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte E elastikiyet modülünü, ν poisson oranını, θ difraksiyon açısını, $\theta^\perp$ normal ölçümde ki difraksiyon açısını, θ_ψ eğimli açı ölçümü için difraksiyon açısını ve ψ eğim açısını ifade etmektedir [63].

$$\lambda = 2d \sin \theta_B \quad (4.6)$$

$$B = \frac{1}{2}[2\theta_1 - 2\theta_2] = \theta_1 - \theta_2 \quad (4.7)$$

$$\sigma = \left[\frac{E}{1+\nu} \right] \left[\frac{\cot \theta}{\sin^2 \psi} \right] \left[\frac{2\theta_{\perp} - 2\theta_{\psi}}{2} \right] \quad (4.8)$$

4.2.8. Isıl genleşme testleri

Isıl genleşme testleri bir NETZSCH DIL 402 CD dilatometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için 25mm boyunda numuneler hazırlanmıştır. Parçalar 25 N bağlama kuvveti ile sabitlenmişlerdir. Başlangıç sıcaklığı 35 °C, bitiş sıcaklığı 500 °C, ısıtma hızı 10 K/dak ve veri alma hızı 40 nokta/dak olarak belirlenmiştir. Bu testler aynı malzeme üzerinde dört defa tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.

4.2.9. İstatiksel analizler

Elde edilen verilerin istatiksel analizleri SPSS 11.0 yazılımı kullanılarak, her bir faktörün ve bu faktörlerin etkileşimlerinin etkilerinin karşılaştırılması amacıyla varyans analizi (ANOVA) testleri, her bir faktörün seviyelerinin etkilerinin karşılaştırılması için de Tukey HSD testleri gerçekleştirilmiştir. Varyans analizleri için Tip III kareler toplamı (varsayılı) seçilmiştir. Böylece, herbir faktörün katkısı diğer tüm faktörlerin etkileri çıkarıldıktan sonra ölçülmektedir. Veri ortalamalarının ana etkileri de ayrıca ele alınmıştır.

Soğuk ve kriyojenik işlemlerin elektrot ve iş parçası üzerine etkilerinin karşılaştırılması için performans indeksleri hesaplanmıştır. Performans indeks incelemesinin tanımlanması soğuk ve kriyojenik işlemli elektrotlar ve iş parçaları ile işlemsiz malzemeler için deney şartlarına bağlı olarak malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman kalınlığı sonuçları arasındaki bağıl önemin eş zamanlı olarak belirlenmesi açısından kullanışlı olacaktır. Önerilen performans indeksi (PI) [3] Eş. 4.9 yardımıyla hesaplanabilmektedir. Karşılaştırma için işleme örnekleri arasında malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ortalama beyaz katman kalınlığı değerlerinin en yüksek ve en düşük değerleri dikkate alınmaktadır. Performans indeksi, belirli bir

işleme şartının, en yüksek malzeme kaldırma hızı, en düşük elektrot aşınma hızı, en düşük yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman kalınlığına sahip ideal bir işleme şartı ile karşılaştırıldığında ne kadar iyi olduğunu yansıtan %0 ve %100 arasında bir sayı olacaktır.

Malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman kalınlığına eşit derecede önem verildiğinde “a”, “b”, “c” ve “d” katsayıları aynı değere (=1) sahip olacak ve her bir sonuç %25 önem seviyesine göre değerlendirilmiş olacaktır. Bu çalışmada ayrıca, her bir sonuca, diğer sonuçlar ile karşılaştırıldığında daha fazla önem verildiği durumlardaki performanslar da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda önem verilen sonucun katsayısı 2.8 değerine sahip olurken daha az önem verilen sonuçların katsayıları aynı değere (=0.4) sahip olacaktır. Dolayısıyla, önem verilen sonuç %70 önem seviyesine sahip olurken diğer sonuçlar %10 önem seviyesine sahip olacaktır.

Sonuç olarak, ideal bir işleme şartının seçilmesi, aynı anda daha düşük yüzey pürüzlülüğü, daha az elektrot aşınma hızı ve daha ince beyaz katman kalınlığının elde edilmesine karşılık daha yüksek malzeme kaldırma hızının sağlanmasına bağlı olacaktır. İdeal olmayan bir işleme şartı ise bu durumun tersi olacaktır.

$$PI = \frac{a \frac{MRR_i - MRR_{\min}}{MRR_{\max} - MRR_{\min}} + b \frac{EWR_{\max} - EWR_i}{EWR_{\max} - EWR_{\min}} + c \frac{ASR_{\max} - ASR_i}{ASR_{\max} - ASR_{\min}} + d \frac{WLT_{\max} - WLT_i}{WLT_{\max} - WLT_{\min}}}{4} \quad (4.9)$$

$$a + b + c + d = 4 \quad (4.10)$$

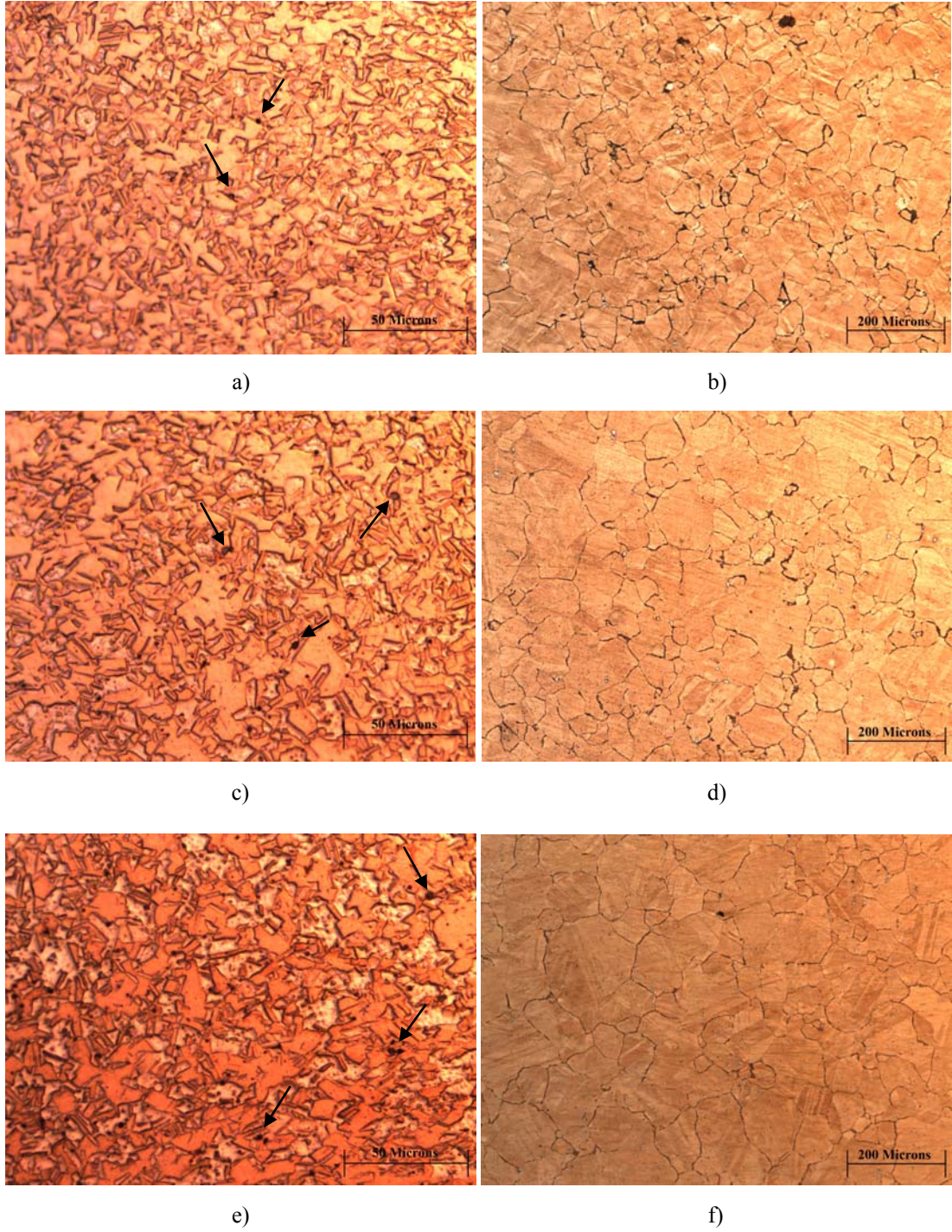
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme özelliklerine ve elektro erozyon işlem performansına etkileri ayrı olarak ele alınmıştır. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme özelliklerine etkileri, mikroyapı, mikrosertlik, elektriksel direnç/iletkenlik, X-ray analizleri ve ısı genleşme miktarları açısından ele alınmıştır. Bu işlemlerin elektro erozyon işlem performansına etkileri ise, malzeme kaldırma hızları, elektrot aşınmaları, yüzey pürüzlülükleri ve beyaz katman kalınlıkları sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

5.1. Soğuk ve Kriyojenik İşlemlerin Malzeme Özelliklerine Etkileri

5.1.1. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme mikroyapılarına etkileri

Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının mikroyapıları, tanecik boyutları açısından incelenmiştir. Bir metaldeki tanecik boyutları veya ortalama tanecik çapları, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Küçük tanecikli yapıya sahip bir malzeme iri taneli başka bir malzemeden daha sert ve daha dayanıklı olabilmektedir. Aynı zamanda, tanecik boyutundaki azalmanın sadece akma dayanımı değil, birçok malzemenin tokluğunu da geliştirdiği belirtilmektedir [64]. Resim 5.1, işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları için mikroyapı resimlerini göstermektedir. Her iki bakır ve berilyum-bakır alaşımı malzemeleri içinde tane yapısı homojen bir görüntü sergilemektedir. Ancak, işlemsiz bakır elektrotlarda, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotlar ile karşılaştırıldığında, taneler daha homojen bir dağılım sergilemektedir. Bakır malzemelerin tane yapısı, düzgün duvarlardan oluşan, poligonal tanelerden meydana gelen ve bazen düzensiz şekilli tanelerden oluşan bir görüntü sergilerken, berilyum-bakır alaşımı malzemeler eş eksenli ve bazen düzensiz şekilli tanelerden meydana gelen bir yapı göstermektedir. Normal oda sıcaklığından soğuk ve kriyojenik işlem sıcaklıklarına doğru düşen ve daha sonra temperleme sıcaklığına bağlı olarak bakır elektrotlardaki tanecik boyutlarının büyüdüğü söylenebilir.



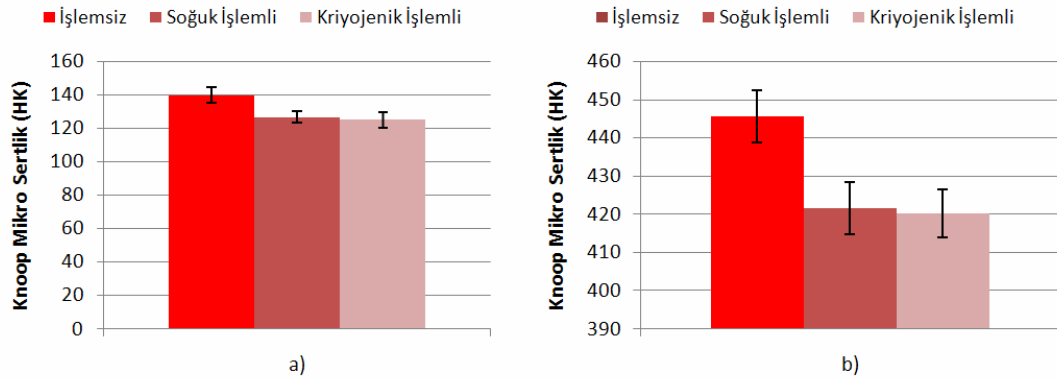
Resim 5.1. Elektrot ve iş parçası malzemelerinin tanecik yapıları, a) işlemsiz bakır, b) işlemsiz berilyum-bakır, c) soğuk işlemlı bakır, d) soğuk işlemlı berilyum-bakır, e) kriyojenik işlemlı bakır, f) kriyojenik işlemlı berilyum-bakır

Benzer şekilde, soğuk işlem sonucunda berilyum-bakır alaşımı malzemelerde tanecik boyutunun ortalama %6 oranında büyüdüğü, kriyojenik işlem sonucunda ise

berilyum-bakır alaşımlarında tanecik boyutlarının ortalama %13 oranında büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, bakır elektrotların mikroyapısında küresel şekilli bakır-oksit (Cu_2O) parçacıklarının (siyah noktalar) var olduğu gözlemlenmiştir. Bakır-oksit oluşumlarının işlemsiz elektrotlarda daha az iken, soğuk ve kriyojenik işlemlerle elektrotlarda, işlemsiz elektrotlar ile karşılaştırıldığında daha yoğun olduğu görülmüştür.

5.1.2. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme mikrosertliklerine etkileri

Şekil 5.1, soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları için mikrosertlik ölçüm sonuçlarının grafiklerini standart sapmaları ile birlikte göstermektedir. Soğuk ve kriyojenik işlemler, bakır elektrotların mikrosertliklerini ortalama değerlerine bağlı olarak sırasıyla %9 ve %11 oranında azaltmıştır. Berilyum-bakır alaşımlarının mikrosertlikleri de soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda sırasıyla %5 ve %6 oranında azalmıştır.



Şekil 5.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları a) bakır (Cu), b) berilyum-bakır (Be-Cu)

Çizelge 5.1, mikrosertlik için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. Varyans analizi, 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına göre her iki soğuk ve kriyojenik işlem şartlarının elektrot ve iş parçalarının mikrosertlik değişimlerine etkisinin önemli olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları için varyans analizi

	Kaynak	Tip III Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	F	P
Bakır Elektrot	İşlem Türü	1962.013	2	981.006	53.987	0.000
	Hata	763.195	42	18.171		
	Toplam	766782.385	45			
	Düzeltilmiş Toplam	2725.208	44			
	R ²	0.720 (Düzenlenmiş R ² =0.707)				
Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçası	İşlem Türü	6106.830	2	3053.415	68.819	0.000
	Hata	1863.494	42	44.369		
	Toplam	8292003.746	45			
	Doğrulanmış Toplam	7970.324	44			
	R ²	0.766 (Düzenlenmiş R ² =0.755)				

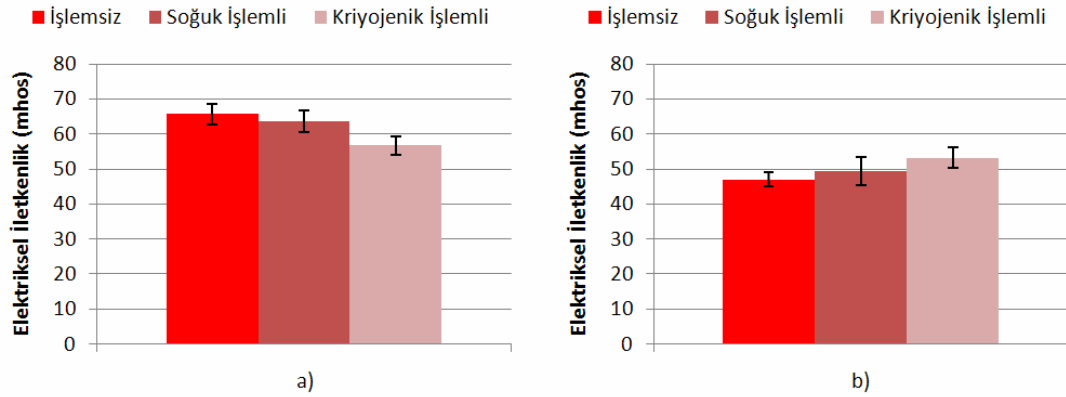
Çizelge 5.2 Tukey testi sonuçlarını göstermektedir. Tukey testi de soğuk ve kriyojenik işlemler elektrot ve iş parçalarının sonuçlarının işlemsiz elektrot ve iş parçalarının sonuçlarından önemli bir şekilde farklı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, soğuk ve kriyojenik işlem sonuçları arasındaki farkın önemli olmadığı da görülmektedir.

Çizelge 5.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme (Bakır Elektrot)		Altküme (Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçası)	
			1	2	1	2
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Kriyojenik	15	124.8435 b		420.1829 b	
	Soğuk	15	126.4733 b		421.4726 b	
	İşlemsiz	15		139.5943 a		445.5145 a
	P		.552	1.000	.857	1.000

5.1.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzemelerin elektriksel direnç/iletkenliklerine etkileri

Şekil 5.2, soğuk ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotlar ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları için elektrik iletkenlik ölçümleri sonuçlarını göstermektedir. Soğuk ve kriyojenik işlemler bakır elektrotların elektriksel iletkenliklerinin veri ortalamalarının etkilerine bağlı olarak sırasıyla %3 ve %14 oranında azalmasına sebep olmuştur. Ancak, berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektriksel iletkenlikleri, bakır elektrotların aksine, soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda sırasıyla %5 ve %13 oranlarında artmıştır.



Şekil 5.2. Elektriksel iletkenlik sonuçları a) bakır (Cu), b) berilyum-bakır (Be-Cu)

Çizelge 5.3, elektriksel iletkenlik ölçüm sonuçları için varyans analizi tablosunu göstermektedir. Varyans analizi, 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına göre her iki soğuk ve kriyojenik işlem şartlarının elektrot ve iş parçalarının elektriksel iletkenlik değişimlerine etkisinin önemli olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.3. Elektriksel iletkenlik ölçüm sonuçları için varyans analizi

	Kaynak	Tip III Kareler Toplamı	SD	Kareler Ortalaması	F	P
Bakır Elektrot	İşlem Türü	1959.910	2	979.955	115.333	0.000
	Hata	1096.077	129	8.497		
	Toplam	516963.970	132			
	Düzeltilmiş Toplam	3055.987	131			
	R2	0.641 (Düzenlenmiş R ² =0.636)				
Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçası	İşlem Türü	605.347	2	302.673	34.121	0.000
	Hata	798.352	90	8.871		
	Toplam	229994.561	93			
	Doğrulanmış Toplam	1403.699	92			
	R2	0.431 (Düzenlenmiş R ² =0.419)				

Çizelge 5.4 Tukey testi sonuçlarını göstermektedir. Tukey testi de her bir işlem durumunun (işlemsiz, soğuk işlemli ve kriyojenik işlemli) elektriksel iletkenlik sonuçlarına bağlı olarak birbirlerinden önemli şekilde farklı olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.4. Elektriksel iletkenlik ölçüm sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme (Bakır Elektrot)			Altküme (Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçası)		
			1	2	3	1	2	3
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Kriyojenik	15	56.6969 c			47.1013 c		
	Soğuk	15		63.5400 b			49.4742 b	
	İşlemsiz	15			65.6555 a			53.258 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

5.1.4. X-ray analizi

X-ray analizlerine bağılı olarak elde edilen 2θ ve maksimum yoğunluğun yarısındaki tam genişlik (FWHM) değerleri Çizelge 5.5’ de gösterilmiştir. FWHM değerlerindeki değişikliklere bağılı olarak soğuk ve kriyojenik işlemler sonucu malzeme kristal yapılarının önemli bir şekilde değiştiği görülmektedir. Aşağıdaki verilere bağılı olarak 10° eğim açısında işlemsiz bakır malzemelerde kalıntı gerilmeler 8.504Gpa iken soğuk işlemlili bakır malzemelerde 3.926Gpa ve kriyojenik işlemlili bakır malzemelerde 1.860Gpa olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, işlemsiz berilyum-bakır alaşımı malzemelerde kalıntı gerilmeler 8.149Gpa iken soğuk işlemlili berilyum-bakır alaşımı malzemelerde -1.127Gpa ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı malzemelerde -2.112Gpa olarak hesaplanmıştır.

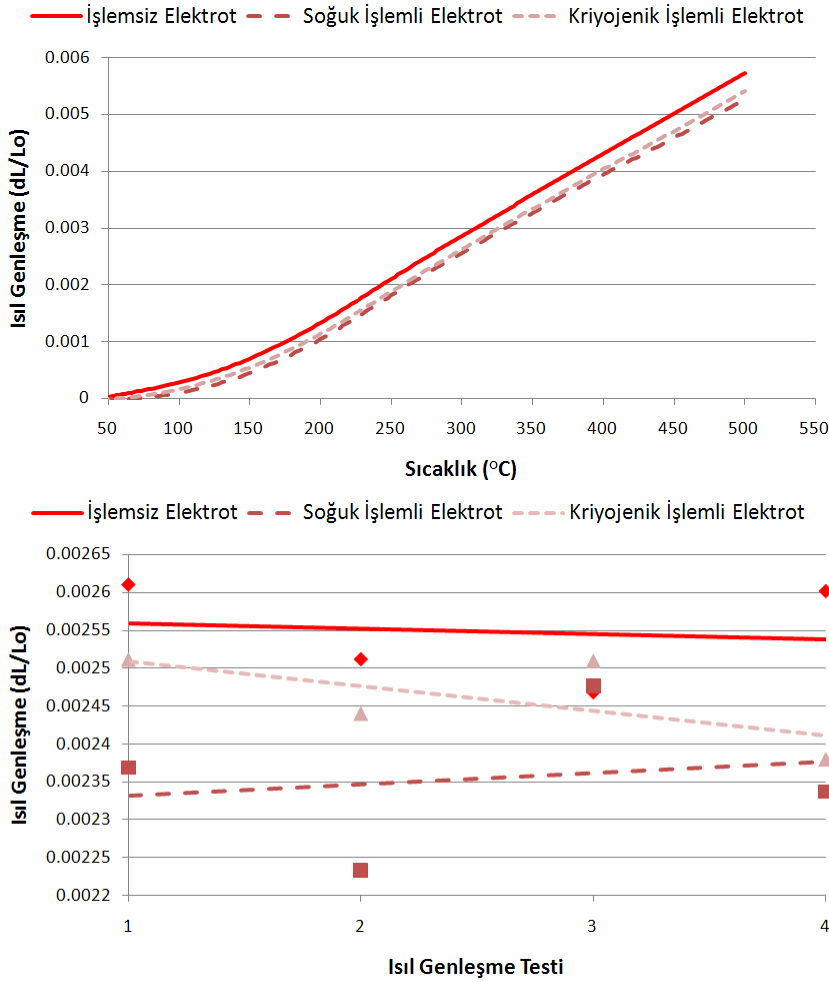
Çizelge 5.5. İşlemsiz, soğuk işlemlili (Sİ) ve kriyojenik işlemlili (Kİ) malzemeler için X-ray analiz sonuçları

Malzeme	Radyasyon: Cu K α $\lambda=0.154056$ Å-nm							
	Eğim Açısı (ψ)							
	0°		5°		10°		15°	
	2θ (°)	FWHM	2θ (°)	FWHM	2θ (°)	FWHM	2θ (°)	FWHM
Cu	43.255	0.8752°x3600 arcsec	43.216	0.9187°x3600 arcsec	43.123	1.0228°x3600 arcsec	42.640	1.2554°x3600 arcsec
Cu (Sİ)	43.225	0.9692°x3600 arcsec	43.183	0.9167°x3600 arcsec	43.164	0.9814°x3600 arcsec	43.081	0.8497°x3600 arcsec
Cu (Kİ)	43.328	0.8510°x3600 arcsec	43.266	0.8937°x3600 arcsec	43.299	0.8695°x3600 arcsec	43.336	0.8757°x3600 arcsec
Be-Cu	43.349	1.0310°x3600 arcsec	43.312	1.0272°x3600 arcsec	43.234	1.0552°x3600 arcsec	43.167	1.1532°x3600 arcsec
Be-Cu (Sİ)	43.439	0.9532°x3600 arcsec	43.561	1.1353°x3600 arcsec	43.455	1.0154°x3600 arcsec	43.684	1.2870°x3600 arcsec
Be-Cu (Kİ)	43.450	0.9311°x3600 arcsec	43.510	0.9944°x3600 arcsec	43.480	1.1240°x3600 arcsec	43.481	1.0201°x3600 arcsec

5.1.5. Soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzeme ısı genleşme miktarına etkisi

Şekil 5.3, bakır elektrot malzemeler için sıcaklığa ve yapılan termal testlerin sayısına bağılı ısı genleşme eğrisi grafiklerini göstermektedir. Soğuk işlem sonucunda bakır elektrotların ısı genleşme miktarlarında %7 oranında ve kriyojenik işlem sonucunda da %5 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Ancak, dördüncü testler sonucunda işlemsiz elektrotun ısı genleşme eğrisindeki değişimin önemsiz olduğu görülürken, soğuk işlemlili elektrotun ısı genleşmesinde meydana gelen doğrusal olan artış ve

kriyojenik işlemlerle elektrotun ısı genleşmesinde meydana gelen doğrusal olan azalmanın önemli olduğu görülmüştür.



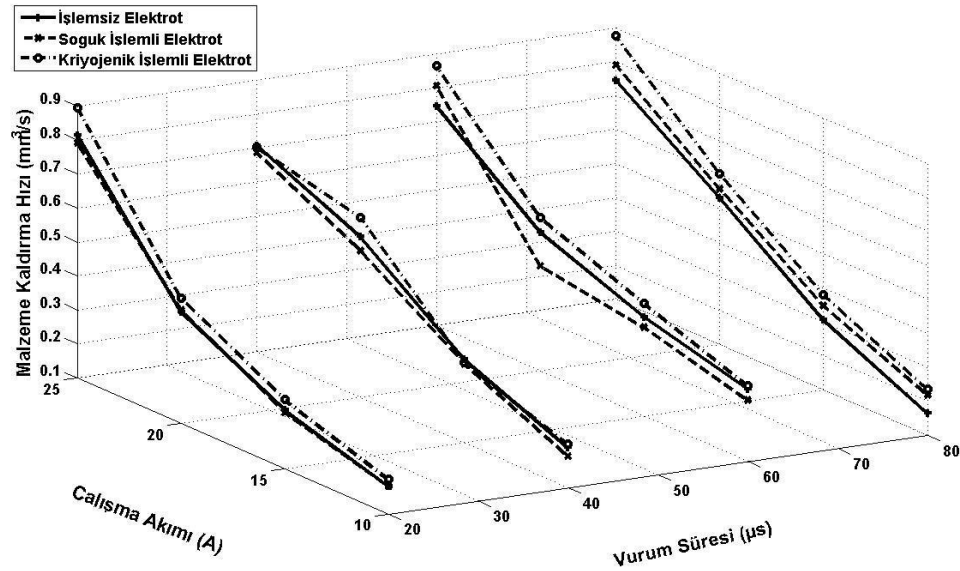
Şekil 5.3. Bakır elektrot malzemeleri için sıcaklığa ve ısı genleşme testlerine bağlı ısı genleşme eğrileri

5.2. Soğuk ve Kriyojenik İşlemlerle Bakır Elektrotların Elektro Erozyon Performansına Etkileri

5.2.1. Soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrotların malzeme kaldırma hızına etkileri

Şekil 5.4, malzeme kaldırma hızı için deneysel sonuçların grafiklerini göstermektedir. Malzeme kaldırma hızında, çalışma akımına bağlı olarak doğrusal bir artış vardır. Veri ortalamaları değerlendirildiğinde, malzeme kaldırma hızında,

çalışma akımının 10A değerden 25A değere artırılmasıyla %243 artış meydana gelmiştir. Vurum süresine bağlı olarak da malzeme kaldırma hızında bir artış meydana gelmiştir. Bu artış 20 μ s ve 60 μ s vurum süreleri arasında doğrusal olarak %14 değerindedir. Ancak, 60 μ s ve 80 μ s vurum süreleri arasında %4 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Soğuk işlemlili bakır elektrotların kullanılmasıyla malzeme kaldırma hızında %1 oranında önemsiz sayılabilecek bir azalma görülmüştür. Ancak, kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile malzeme kaldırma hızında %11 değerinde önemli bir artış vardır.



Şekil 5.4. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızları

Malzeme kaldırma hızı açısından, işlemsiz elektrotlar ile soğuk ve kriyojenik işlemlili elektrotlar arasındaki en belirgin farklılık 80 μ s vurum süresinde görülmüştür. Malzeme kaldırma hızı, 80 μ s vurum süresinde, 10A çalışma akımı ve 25A çalışma akımı arasında, işlemsiz elektrotların kullanılması ile 0.164 mm^3/s 'den 0.743 mm^3/s 'ye çıkarken, soğuk işlemlili elektrotların kullanılması ile 0.219 mm^3/s 'den 0.790 mm^3/s 'ye ve kriyojenik işlemlili elektrotların kullanılması ile de 0.236 mm^3/s 'den 0.874 mm^3/s 'ye çıkmıştır. Çizelge 5.6, malzeme kaldırma hızı için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak çalışma akımı, vurum süresi ve işlem türü faktörlerinin ana etkileri ile çalışma akımı

ve vurum süresi ile vurum süresi ve işlem türü arasındaki iki yönlü etkileşimlerin istatistiki olarak malzeme kaldırma hızı üzerine etkileri önemlidir.

Çizelge 5.6. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akım	3	2.126	0.709	1356.221	0.000
Vurum Süresi	3	0.027	0.009	17.163	0.000
İşlem Türü	2	0.027	0.014	26.121	0.000
Akım*Vurum	9	0.087	0.010	18.462	0.000
Akım*İşlem	6	0.006	0.001	1.867	0.142
Vurum*İşlem	6	0.009	0.002	2.880	0.038
Hata	18	0.009	0.001		
Toplam	48	12.804			
Doğrulanmış Toplam	47	2.291			
R ²				0.996 (Düzenlenmiş R ² =0.989)	

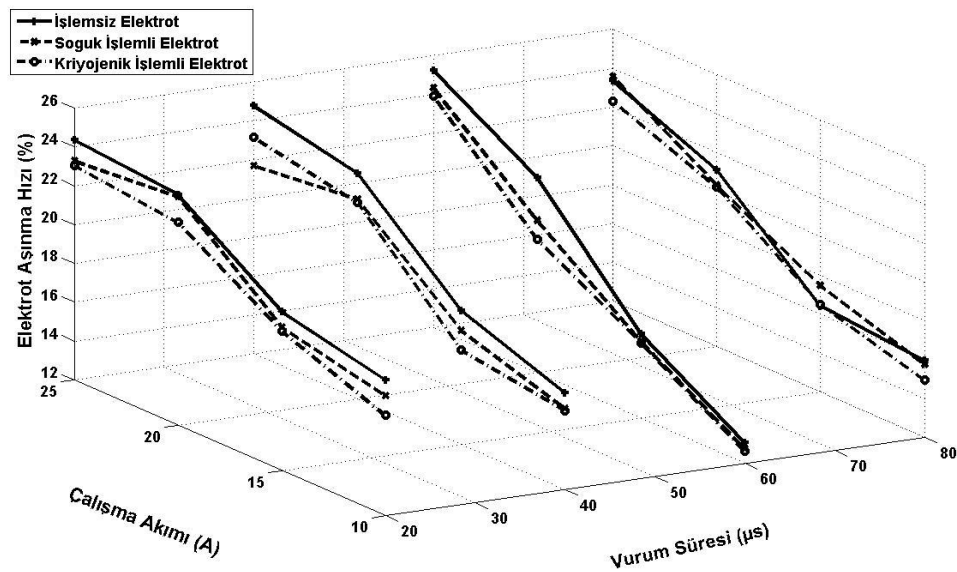
Çizelge 5.7 ise Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Tukey testleri malzeme kaldırma hızı üzerine her bir çalışma akımı değerinin etkisinin önemli olduğunu, vurum sürelerinin birbirleri ile karşılaştırıldığında sadece 20µs ile 60µs ve 80µs vurum sürelerinin etkilerinin önemli olduğunu ve işlemsiz ve soğuk işlemli elektrotlar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında kriyojenik işlemli elektrotların malzeme kaldırma hızı üzerine etkisinin önemli şekilde farklı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.7. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	0.229 d			
	15	12		0.339 c		
	20	12			0.519 b	
	25	12				0.785 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	0.437 c			
	40	12	0.456 bc	0.456 bc		
	80	12		0.480 ab	0.480 ab	
	60	12			0.499 a	
	P		0.183	0.086	0.211	
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Soğuk	16	0.449 b			
	İşlemsiz	16	0.453 b			
	Kriyojenik	16		0.502 a		
	P		0.885	1.000		

5.2.2. Soğuk ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotların elektrot aşınma hızına etkileri

Şekil 5.5, elektrot aşınma hızları için deneysel sonuçlardan elde edilen grafikleri göstermektedir. Elektrot aşınma hızında, çalışma akımına bağlı olarak doğrusal bir artış vardır. Veri ortalamalarına göre, çalışma akımı elektrot aşınma hızını 10A ve 25A arasında %50 değerinde artırmıştır. Vurum süresine bağlı olarak da elektrot aşınma hızında bir azalma eğilimi vardır. Bu eğilim 20µs ve 60µs vurum süreleri arasında doğrusal olarak %13 değerindedir. Ancak, 60µs ve 80µs vurum süreleri arasında %3 oranında bir artış oluşmuştur. Soğuk işlemlerli bakır elektrotların kullanılmasıyla elektrot aşınma hızında %4 oranında ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotların kullanılması ile de %6 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Soğuk işlemlerli elektrotlar ile karşılaştırıldığında kriyojenik işlemlerli elektrotlarda %2 oranında daha az aşınma meydana gelmiştir.



Şekil 5.5. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen elektrot aşınma hızları

Deney şartlarının birçoğunda işlemsiz, soğuk işlemlerli ve kriyojenik işlemlerli elektrotlar arasındaki farklılıklar net bir şekilde görülebilmektedir. Örnek olarak, işlemsiz elektrotların aşınma oranları 20µs vurum süresinde ve 10A çalışma akımı ile 25A çalışma akımları arasında %19.013'den %24.369'a çıkarken, soğuk işlemlerli

elektrotların aşınma oranları %18.194'den %23.292'ye ve kriyojenik işlemlili elektrotların aşınma oranları ise %17.169'dan %23.046'ya çıkmıştır. Çizelge 5.8, elektrot aşınma hızı için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak elektrot aşınma hızı üzerine istatistiki olarak önemli etkisi olan parametreler çalışma akımı, vurum süresi ve işlem türü faktörlerinin ana etkileri ile çalışma akımı ve vurum süresi arasındaki iki yönlü etkileşimdir.

Çizelge 5.8. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akım	3	472.606	157.535	563.678	0.000
Vurum Süresi	3	52.591	17.530	62.725	0.000
İşlem Türü	2	12.688	6.344	22.699	0.000
Akım*Vurum	9	37.565	4.174	14.935	0.000
Akım*İşlem	6	1.644	0.274	0.980	0.467
Vurum*İşlem	6	2.886	0.481	1.721	0.173
Hata	18	5.031	0.279		
Toplam	48	19137.929			
Doğrulanmış Toplam	47	585.012			
R ²				0.991 (Düzenlenmiş R ² =0.978)	

Çizelge 5.9. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) α=0.05	10	12	15.737 d			
	15	12		17.590 c		
	20	12			21.722 b	
	25	12				23.592 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000
Tukey HSD (Vurum) α=0.05	60	12	18.419 c			
	80	12	19.007 c			
	40	12		20.049 b		
	20	12			21.165 a	
	P		0.061	1.000	1.000	
Tukey HSD (İşlem) α=0.05	Kriyojenik	16	19.089 b			
	Soğuk	16	19.556 b			
	İşlemsiz	16		20.335 a		
	P		0.055	1.000		

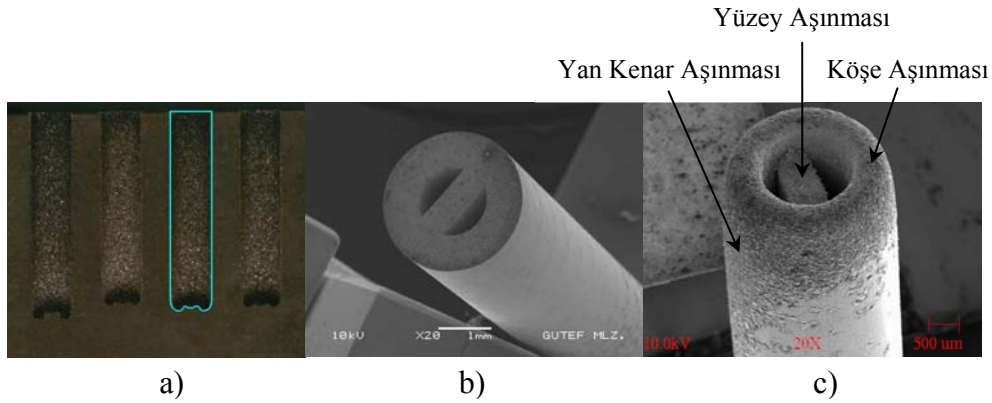
Tukey test sonuçları ise Çizelge 5.9'da gösterilmektedir. Tukey testleri, her bir çalışma akımının elektrot aşınma hızına etkisinin önemli olduğunu, 60 μ s ve 80 μ s vurum sürelerinin etkileri arasında önemli bir farkın olmadığını, ancak 40 μ s ve 20 μ s vurum sürelerinin etkilerinin diğer vurum sürelerinin etkilerinden önemli şekilde farklı olduğunu, soğuk ve kriyojenik işlemlili elektrotlar ile elde edilen sonuçlar

arasında önemli bir farkın olmadığını ancak bu deney sonuçlarının, işlemsiz elektrotların kullanılması ile elde edilen sonuçlardan önemli bir şekilde farklı olduğunu göstermektedir.

5.2.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrotların elektrot şekil deformasyonuna etkileri

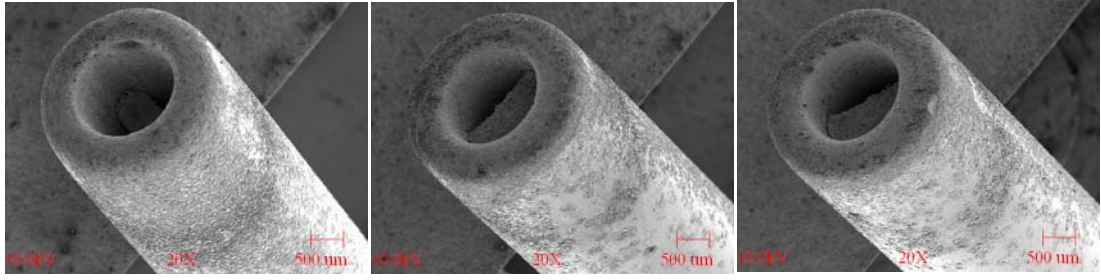
İşleme sonrası elde edilen delikler, elektrotların uç kısımlarındaki şekillerinin, düzensiz aşınmalarından dolayı değiştiğini göstermektedir. Bu değişimler aynı zamanda işlenen deliklerin içerisinde istenilmeyen ve hatalı geometrik şekillerin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu konu ile ilgili çalışmalarda [65, 66], elektrot şeklinin işleme esnasında çok kısa bir sürede deformasyona uğradığı gösterilmiştir. Resim 5.2, aşınmamış bir elektrot ile birlikte 20mm delik delme derinliği sonrası delik sonu ve elektrot uç kısmı çevresinde meydana gelen şekil deformasyonlarını ve aşınma türlerini göstermektedir. Elektrot iç kısmında meydana gelen deformasyonlar, yüzey aşınması ve elektrot köşe kısmında meydana gelen deformasyonlar köşe aşınması ve elektrot dış kısmında meydana gelen deformasyonlarda yan kenar aşınması olarak tanımlanabilmektedir. Birçok çalışmada, yan kenar aşınması çok küçük değerlerde olduğundan dolayı ihmal edilmiştir [67].

Elektrotlarda meydana gelen köşe aşınmaları özellikle işleme esnasında elektrot köşesindeki aşırı elektrik alanı yoğunluğu dolayısıyla meydana gelmektedir. İki elektrot arasında gerilim uygulandığında, elektrot alanı, elektrotların sınırlı ölçülerinden dolayı, elektrot kenarlarında çok daha yoğun olmaktadır. Bu yüksek alan yoğunluğu elektrotların köşelerinde aşırı elektrot aşınmalarına sebep olmaktadır. Neticede elektrotların, uygulanan işleme şartlarına ve gerilime bağlı olarak, eşgerilimli bir profil yüzeyine sahip olması beklenmektedir [65]. Elektrotlardaki şekil deformasyonları Tarama Elektron Mikroskop (SEM) yöntemi ile görüntülenmiştir.

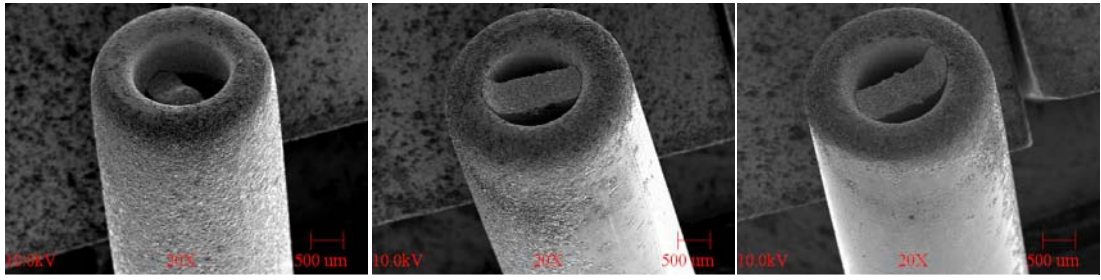


Resim 5.2. Aşınma ve deformasyon türleri a) işlenmiş bir iş parçası ve delik sonundaki şekil bozuklukları, b) aşınmamış bir elektrot, c) aşınmış bir elektrot üzerindeki aşınma ve deformasyon türleri

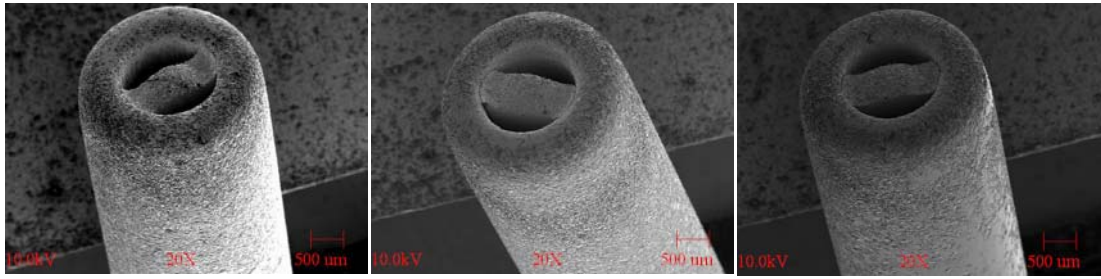
Resim 5.3, Resim 5.4, Resim 5.5 ve Resim 5.6, elektrot aşınma miktarlarında belirgin farklılıklar görülen işlemsiz, soğuk işlemlili ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların bazı 20X büyütme değerinde ki tarama elektron mikroskop (SEM) resimlerini göstermektedir. Şekillerden de açık bir şekilde görülebileceği gibi elektrotların yüzeylerindeki hacimsel aşınmalar elektrotların köşelerindeki aşınmalar kadar dikkate değerdir. Elektrotların yüzey ve köşelerindeki bu şekil deformasyonları, en yüksek elektriksel alan yoğunluğunun işleme esnasında elektrot kenarlarından elektrot uçlarının merkezine doğru yer değiştirmesi ile açıklanmıştır [68]. SEM resimlerinden de görülebileceği gibi elektrotların hacimsel yüzey aşınmalarının çalışma akımının artırılmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, bakır elektrotların 10A çalışma akımına maruz kaldığı Resim 5.3 ve bakır elektrotların 25A akıma maruz kaldığı Resim 5.6 arasındaki değişimden gözlemlenebilmektedir. Resim 5.3 ve Resim 5.4 üzerinde açık bir şekilde görülebileceği gibi deney şartlarının birçoğunda soğuk ve kriyojenik işlemler, işlemsiz elektrotlar ile karşılaştırıldığında, elektrotların hacimsel yüzey aşınmalarında önemli bir şekilde azalmaya sebep olmuştur. Aynı zamanda, soğuk ve kriyojenik işlemlili elektrotlar ile işlemsiz elektrotlar arasındaki bu hacimsel yüzey aşınma farklarının çalışma akımının artmasıyla azaldığı da ayrıca gözlemlenmiştir. SEM incelemeleri ile hacimsel köşe aşınması açısından, işlemsiz elektrotlar ile soğuk işlemlili ve kriyojenik işlemlili elektrotlar arasında dikkate değer bir farklılık görülmemektedir.



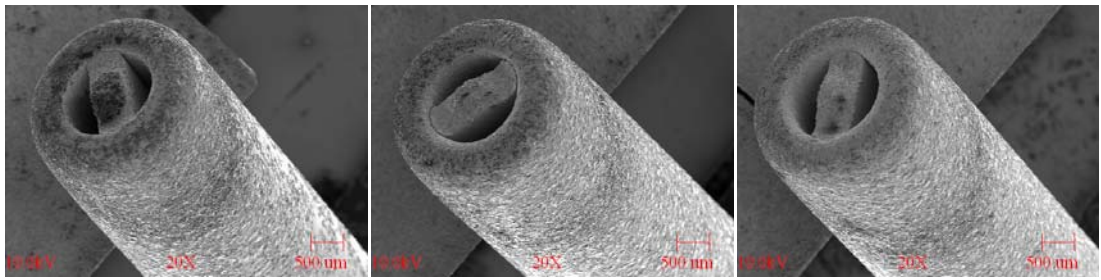
Resim 5.3. SEM görüntüleri (10A akım ve 80 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot



Resim 5.4. SEM görüntüleri (15A akım ve 80 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot



Resim 5.5. SEM görüntüleri (20A akım ve 20 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot



Resim 5.6. SEM görüntüleri (25A akım ve 60 μ s vurum süresi) a) işlemsiz elektrot, b) soğuk işlemlili elektrot, c) kriyojenik işlemlili elektrot

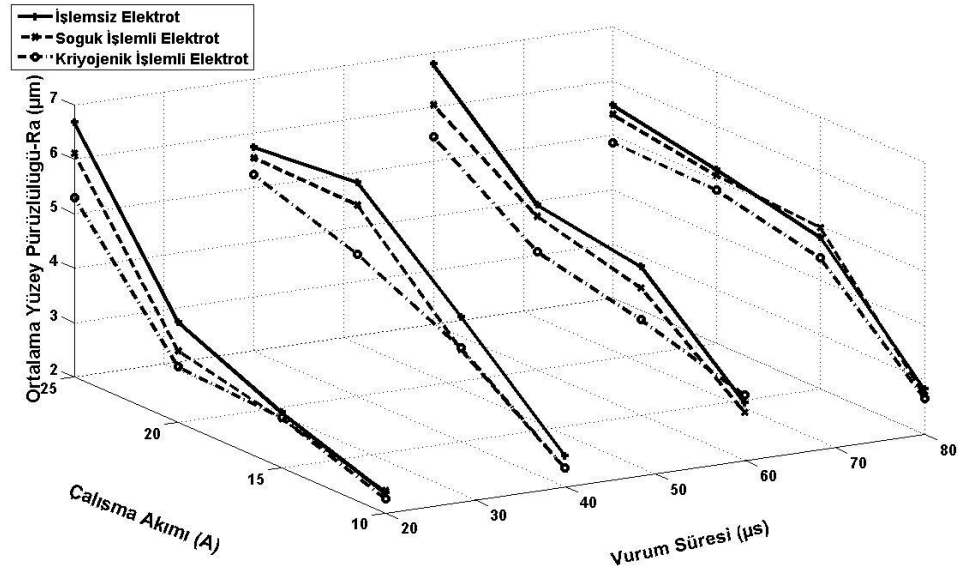
5.2.4. Soğuk ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotların ortalama yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkileri

Şekil 5.6, ortalama yüzey pürüzlülüğü için deneysel sonuçların grafiklerini göstermektedir. Veri ortalamalarına bağlı olarak, ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde, çalışma akımına bağlı olarak doğrusal bir artış gözlenmektedir. Çalışma akımının 10A'den 25A'e yükseltilmesi, ortalama yüzey pürüzlülük değerini %117 oranında artırmıştır.

Vurum süresine bağlı olarak da ortalama yüzey pürüzlülük değerinde bir artma eğilimi vardır. Bu eğilim 20µs ve 60µs vurum süreleri arasında doğrusal olarak %23 değerindedir. Ancak, 60µs ve 80µs vurum süreleri arasında %2 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Soğuk işlemlerli bakır elektrotların kullanılmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde %6 oranında ve kriyojenik işlemlerli bakır elektrotların kullanılması ile de %13 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Soğuk işlemlerli elektrotlar ile kriyojenik işlemlerli elektrotlar arasındaki %8 oranındaki azalma miktarı da önemlidir.

Elektro erozyon ile işlenmiş yüzeyler, karakteristik olarak kesikli erozyonlar sonucu oluşan mikroskobik kraterlerden dolayı mat bir görünüme sahiptirler. Düşük enerjili erozyonlar sıkı kraterlerin oluşmasına sebep olurken, daha yüksek enerjili erozyonlar daha derin kraterlerin oluşmasına sebep olmaktadır [69]. Bu durum, elektro erozyon ile işlemede girdi parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü aralığının geniş olabileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.10, ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. Çalışma akımı, vurum süresi, işlem türü faktörlerinin ana etkileri ile çalışma akımı-vurum süresi ve çalışma akımı-işlem türü arasındaki iki yönlü etkileşimlerin 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine olan etkileri önemlidir.



Şekil 5.6. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Çizelge 5.10. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları için varyans analizi.

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	59.827	19.942	419.240	0.000
Vurum Süresi	3	5.273	1.758	36.951	0.000
İşlem Türü	2	2.931	1.465	30.807	0.000
Akım*Vurum	9	8.922	0.991	20.841	0.000
Akım*İşlem	6	1.003	0.167	3.516	0.018
Vurum*İşlem	6	0.189	0.032	0.663	0.681
Hata	18	0.856	0.048		
Toplam	48	939.989			
Doğrulanmış Toplam	47	79.002			
R ²				0.989 (Düzenlenmiş R ² =0.972)	

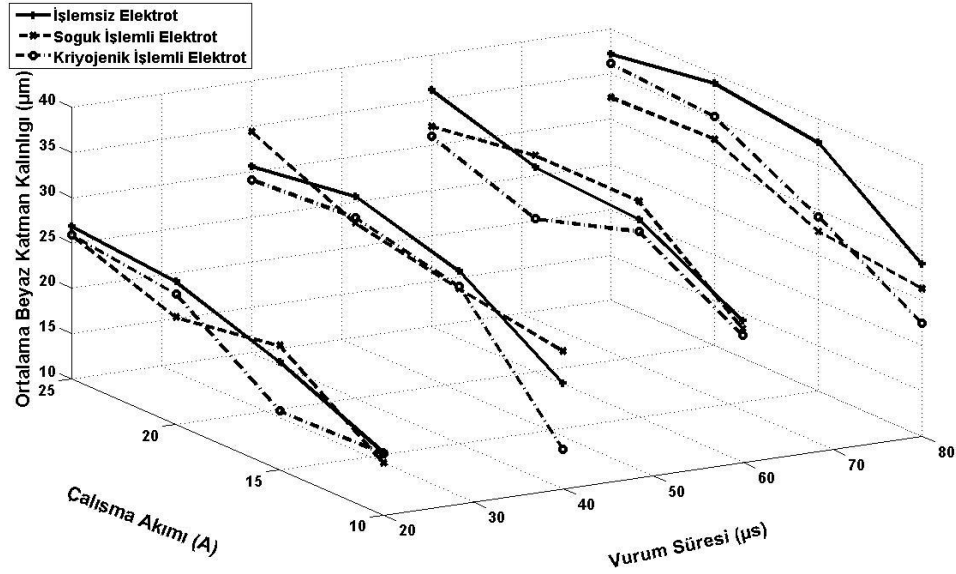
Tukey test sonuçları ise Çizelge 5.11’de gösterilmektedir. Tukey testleri, her bir çalışma akımının yüzey pürüzlülüğüne etkileri arasındaki farkın önemli olduğunu, yine yüzey pürüzlülüğüne etki bakımından 20μs vurum süresinin diğer vurum sürelerinden önemli şekilde farklı olduğunu ve diğer vurum sürelerinin birbirleri arasındaki farkın önemli olmadığını işlemsiz, soğuk işlemlili ve kriyojenik işlemlili elektrotların kullanılması ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının birbirlerinden önemli derecede farklı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.11. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların kullanılması sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	2.640 d			
	15	12		3.961 c		
	20	12			4.615 b	
	25	12				5.725 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	3.680 b			
	40	12		4.293 a		
	80	12		4.443 a		
	60	12		4.526 a		
	P		1.000	0.075		
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Kriyojenik	16	3.923 c			
	Soğuk	16		4.255 b		
	İşlemsiz	16			4.528 a	
	P		1.000	1.000	1.000	

5.2.5. Soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların ortalama beyaz katman kalınlığına etkileri

Elektro erozyon işleme yöntemi aşırı yüksek enerjili termal bir işlem olduğundan dolayı (12.000°C sıcaklığa kadar), beyaz bir katman, işlenmiş yüzeylerde bu yüksek enerjili işlemin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Bu katman genellikle, elektro erozyon ile işleme esnasında ergime ve yeniden katılaşma sürecinden dolayı metalürjik yapılarda ana malzemeden önemli bir şekilde farklılık göstermektedir [1]. Beyaz katmanın çok kalın olduğu durumlarda çatlamaya, stresin artmasına ve sonunda parçanın kısa sürede deformasyonuna sebep olmaktadır. Ayrıca beyaz katman oluşumlarının giderilmesi parlatma, aşındırıcı akışkan ile yüzey işleme (AFM) ve elektrokimyasal işleme (ECM) gibi ek işlemler gerektirmektedir [70]. Dolayısıyla, elektro erozyon işleme sonucunda beyaz katman kalınlığının ince olması istenmektedir. Şekil 5.7, ortalama beyaz katman kalınlığı için deneysel sonuçların grafiklerini göstermektedir. Veri ortalamalarının ana etkilerine göre, ortalama beyaz katman kalınlığı değerlerinde, çalışma akımına bağlı olarak doğrusal bir artış vardır. Çalışma akımı 10A'den 25A'ye yükseldiğinde ortalama beyaz katman kalınlığı %44 oranında artmıştır. Vurum süresine bağlı olarak da ortalama beyaz katman kalınlığında bir artma eğilimi vardır. Bu eğilim 20µs ve 80µs vurum süreleri arasında doğrusal olarak %47 değerindedir.



Şekil 5.7. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotlar ile farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon işleme sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlıkları

Ortalama beyaz katman kalınlığı açısından 80µs vurum süresinin çalışma akımları ile karşılaştırıldığında daha etkili olduğu ancak genel olarak, çalışma akımları ve vurum süreleri arasındaki farkın önemsiz olduğu görülmektedir. Soğuk işlemlili bakır elektrotların kullanılmasıyla ortalama beyaz katman kalınlığında %6 oranında ve kriyojenik işlemlili bakır elektrotların kullanılması ile de %11 oranında önemli sayılabilecek azalmalar meydana gelmiştir. Soğuk işlemlili elektrotlar ile kriyojenik işlemlili elektrotlar arasında ki %6 oranındaki azalma miktarı da önemlidir. Ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi Çizelge 5.12’de gösterilmektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak ortalama beyaz katman kalınlığı üzerine çalışma akımı, vurum süresi ve işlem türlerinin ana etkileri önemlidir. Herhangi iki parametre arasındaki iki yönlü etkileşimlerin sonuçlar üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Çizelge 5.13, Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Tukey testleri ortalama beyaz katman kalınlığı oluşumuna etkisi bakımından 10A çalışma akımının diğer çalışma akımlarından önemli bir şekilde farklı olduğunu, 15A ve 25A akım değerleri arasındaki farkın da önemli olduğunu, 20µs vurum süresinin etkisinin diğer vurum sürelerinin etkisinden önemli bir şekilde farklı olduğunu, 40µs ve 80µs vurum sürelerinin etkileri arasındaki farkın da önemli olduğunu ve sadece işlemsiz ve kriyojenik işlemlili

elektrotların kullanılması ile elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları arasındaki farkın önemli olduğunu göstermektedir.

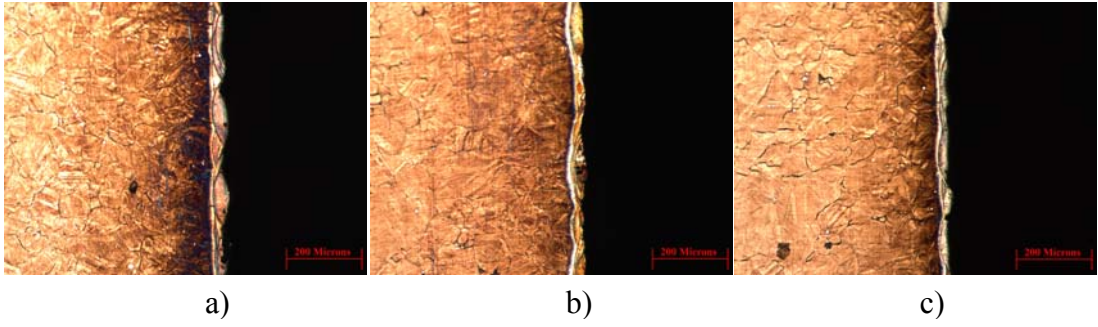
Çizelge 5.12. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrotlar ile elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	653.882	217.961	34.781	0.000
Vurum Süresi	3	718.527	239.509	38.219	0.000
İşlem Türü	2	90.539	45.270	7.224	0.005
Akım*Vurum	9	37.885	4.209	0.672	0.724
Akım*İşlem	6	17.039	2.840	0.453	0.833
Vurum*İşlem	6	57.922	9.654	1.540	0.222
Hata	18	112.800	6.267		
Toplam	48	39120.147			
Doğrulanmış Toplam	47	1688.596			
R ²				0.933 (Düzenlenmiş R ² =0.826)	

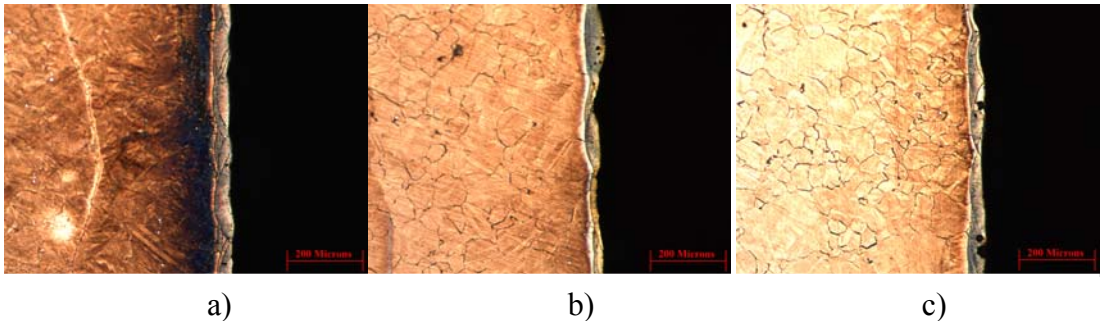
Çizelge 5.13. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrotlar ile elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	21.906			
	15	12		28.008		
	20	12		30.335	30.335	
	25	12			31.453	
	P		1.000	0.141	0.697	
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	21.843			
	40	12		27.514		
	60	12		30.271	30.271	
	80	12			32.074	
	P		1.000	0.064	0.322	
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Kriyojenik	16	26.238 b			
	Soğuk	16	27.936 ab	27.936 ab		
	İşlemsiz	16		29.602 a		
	P		0.162	0.172		

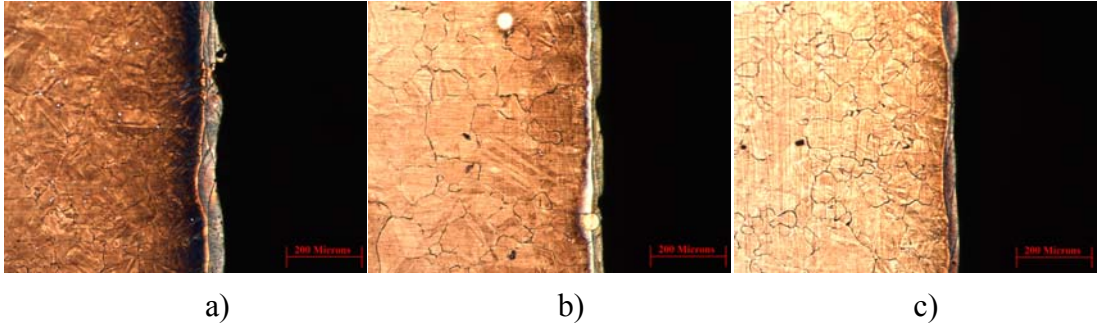
Resim 5.7, Resim 5.8, Resim 5.9 ve Resim 5.10 beyaz katman oluşumu açısından en belirgin farklılıkların görüldüğü 80µs vurum süresinde, işlemsiz, soğuk işlemlerle ve kriyojenik işlemlerle elektrotların kullanılması sonucu elde edilen deliklerin iç yüzeylerinin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. İşlemsiz elektrotların kullanılması sonucu 10A ve 25A çalışma akımları arasında beyaz katman kalınlığı 28.97µm ile 37.19µm arasında oluşurken, soğuk işlemlerle elektrotların kullanılması sonucu 26.32µm ile 32.40µm arasında ve kriyojenik işlemlerle elektrotların kullanılması sonucu da 22.47µm ile 36.12µm arasında meydana gelmiştir.



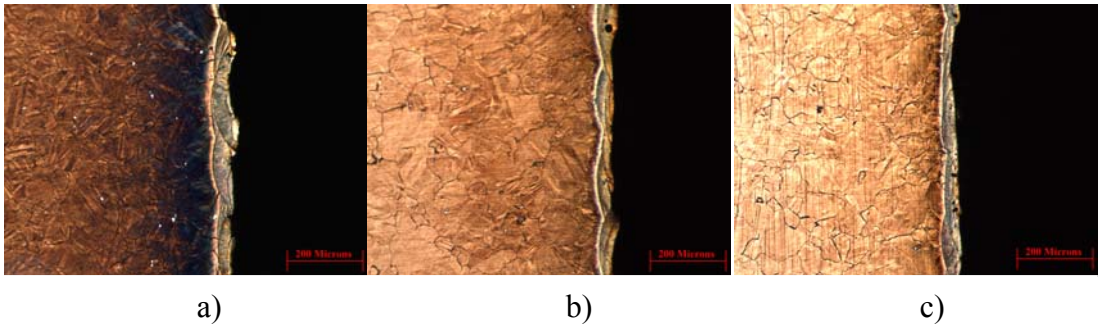
Resim 5.7. 10A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kiyojenik işlemlili elektrot ile



Resim 5.8. 15A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kiyojenik işlemlili elektrot ile



Resim 5.9. 20A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kiyojenik işlemlili elektrot ile



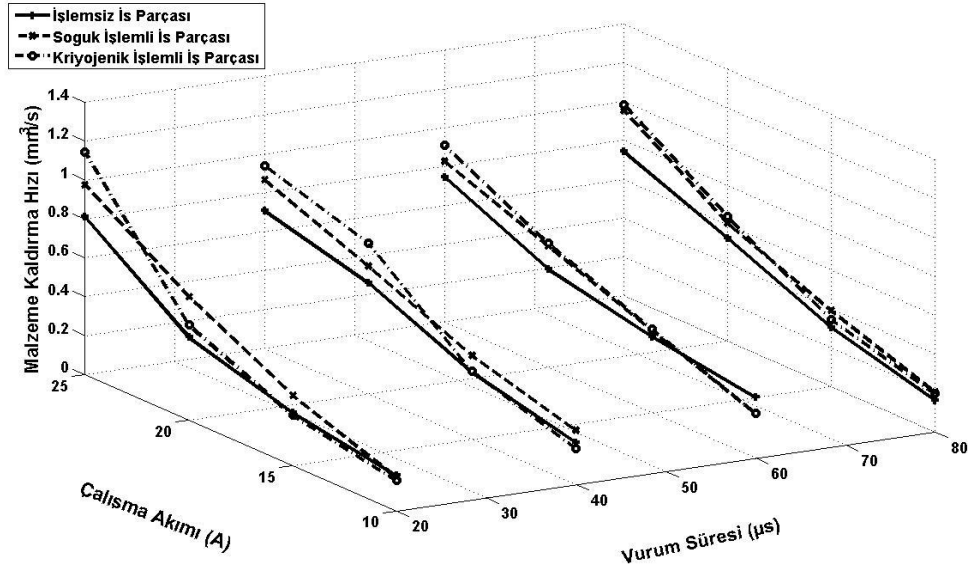
Resim 5.10. 25A akım ve 80 μ s vurum süresi a) işlemsiz elektrot ile, b) soğuk işlemlili elektrot ile, c) kiyojenik işlemlili elektrot ile

5.3. Soğuk ve Kriyojenik İşlemlerli Berilyum-Bakır Alaşımı İş Parçalarının Elektro Erozyon Performansına Etkileri

5.3.1. Soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının malzeme kaldırma hızına etkileri

Şekil 5.8'deki grafikler malzeme kaldırma hızı için deneysel sonuçları göstermektedir. Malzeme kaldırma hızı, 10A ve 25A değerleri arasında %317 oranında artmıştır. Vurum süresine bağlı olarak da malzeme kaldırma hızında, 20 μ s ve 40 μ s vurum süreleri arasında %7 oranında bir artış ve daha sonra ise önemsiz sayılabilecek düşüşler görülmüştür. Soğuk işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılmasıyla malzeme kaldırma hızı %19 ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması ile de malzeme kaldırma hızı %20 değerinde artmıştır. Bu farklılıklar birçok deney şartlarında net bir şekilde görülebilmektedir. Örnek olarak 80 μ s vurum süresinde ve 10A çalışma akımı ile 25A çalışma akımı arasında malzeme kaldırma hızı, işlemsiz iş parçalarının kullanılması ile 0.164mm³/s'den 0.743mm³/s'ye çıkarken, soğuk işlemlerli iş parçalarının kullanılması ile 0.207mm³/s'den 0.952mm³/s'ye ve kriyojenik işlemlerli iş parçalarının kullanılması ile de 0.199mm³/s'den 0.982mm³/s'ye çıkmıştır. Ayrıca, çalışma akımının artmasına bağlı olarak işlemsiz iş parçaları ile elde edilen malzeme kaldırma hızları ile soğuk işlemlerli ve kriyojenik işlemlerli iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızları arasındaki farklılıkların da arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, soğuk işlem ve kriyojenik işleme maruz kalmış berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının daha yüksek çalışma akımı değerlerinde elektro erozyon ile işlenebilirlik performanslarının daha iyi olduğunu göstermektedir. Dikkate değer diğer farklı bir sonuç ise, her üç malzemenin de (işlemsiz, soğuk işlemlerli ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı) işlenmesi sonucu en yüksek malzeme kaldırma hızlarının 20 μ s vurum süresinde elde edilmiş olmasıdır. Bu durum, vurum süresi faktörünün %50 olacak şekilde sabit tutulması ve dolayısıyla açık vurum süresi ile kapalı vurum süreleri arasındaki oranın aynı olmasıyla izah edilebilir. Ayrıca, vurum süresi faktörüne bağlı olarak, 20 μ s açık vurum süresinde

gerçek bir boşalım için gecikme miktarının $80\mu s$ açık vurum süresi ile karşılaştırıldığında daha az olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.8. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızları

Çizelge 5.14, malzeme kaldırma hızı için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak çalışma akımı ve işlem türü faktörlerinin ana etkileri ile çalışma akımı-vurum süresi ve çalışma akımı-işlem türü etkileşimlerin malzeme kaldırma hızı üzerine önemli etkileri vardır. Bu deney şartlarında vurum süresinin malzeme kaldırma hızı açısından önemli olmadığı görülmektedir.

Çizelge 5.14. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	3.100	1.033	531.822	0.000
Vurum Süresi	3	0.010	0.003	1.720	0.199
İşlem Türü	2	0.083	0.042	21.370	0.000
Akım*Vurum	9	0.103	0.011	5.916	0.001
Akım*İşlem	6	0.090	0.015	7.706	0.000
Vurum*İşlem	6	0.008	0.001	0.684	0.665
Hata	18	0.035	0.002		
Toplam	48	16.008			
Doğrulanmış Toplam	47	3.430			
R ²				0.990 (Düzenlenmiş R ² =0.973)	

Çizelge 5.15, Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Tukey testleri, her bir çalışma akımının malzeme kaldırma hızı üzerine etkisinin önemli olduğunu, vurum sürelerinin birbirleri ile karşılaştırıldığında etkilerinin önemli olmadığını ve işlemsiz berilyum-bakır alaşımları ile karşılaştırıldığında soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımlarının işlenmesi sonucu elde edilen beyaz katman kalınlıklarının önemli bir şekilde farklı olduğunu ve soğuk ile kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımlarının işlenmesi sonucu elde edilen beyaz katman kalınlıkları arasındaki farkın önemli olmadığını göstermektedir.

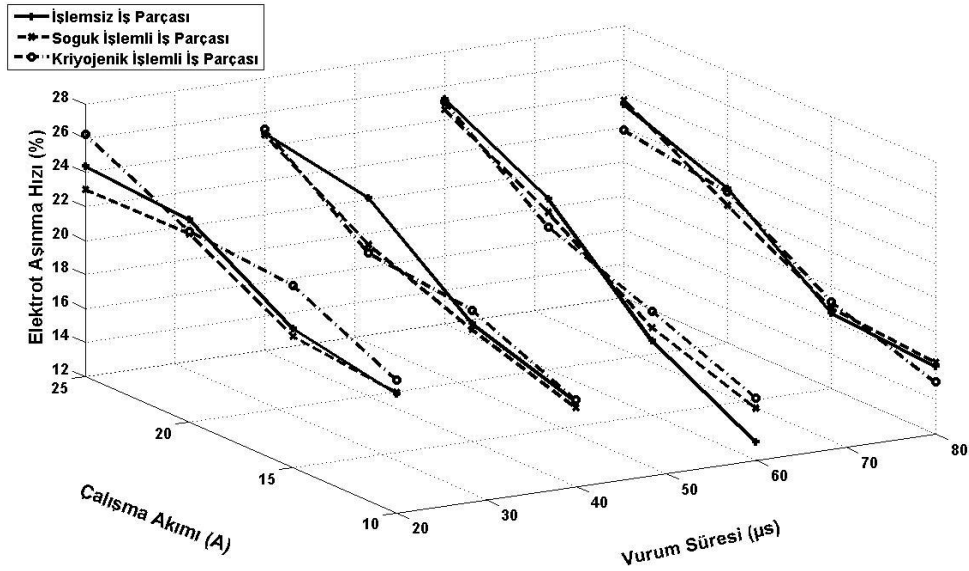
Çizelge 5.15. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen malzeme kaldırma hızı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	0.212 d			
	15	12		0.359 c		
	20	12			0.592 b	
	25	12				0.884 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	0.491 a			
	80	12	0.506 a			
	60	12	0.523 a			
	40	12	0.527 a			
	P		0.220			
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	İşlemsiz	16	0.453 b			
	Soğuk	16		0.540 a		
	Kriyojenik	16		0.542 a		
	P		1.000	0.989		

5.3.2. Soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektrot aşınma hızına etkileri

Şekil 5.9, elektrot aşınma hızları için deneysel sonuçların grafiklerini göstermektedir. Veri ortalamalarının ana etkilerine göre elektrot aşınma hızında 10A ve 25A değerleri arasında %50 oranında bir artış vardır. Vurum süresinin artışına bağlı olarak da elektrot aşınma hızında bir azalma eğilimi vardır. Bu eğilim 20 μ s ve 80 μ s vurum süreleri arasında %14 değerindedir. Çalışma akımına bağlı olarak meydana gelen bu artış miktarı ve vurum süresine bağlı olarak meydana gelen bu azalma miktarı, işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerli elektrotların kullanıldığı deney şartlarındaki artış ve azalma oranları ile paralellik göstermektedir. Soğuk ve

kriyojenik işlemleri berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması sonucu elektrot aşınma hızında ihmal edilebilecek değişimler görülmüştür.



Şekil 5.9. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemleri berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vuruş sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen elektrot aşınma hızları

Çizelge 5.16, elektrot aşınma hızı için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak elektrot aşınma hızı üzerine önemli etkisi olan parametreler çalışma akımı ve vuruş süresi faktörlerinin ana etkileri ile çalışma akımı-vuruş süresi ve çalışma akımı-işlem türü arasındaki iki yönlü etkileşimlerdir. Malzemelerdeki işlem türü değişiminin elektrot aşınma hızı üzerine etkisi önemsizdir.

Çizelge 5.16. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemleri berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	419.553	139.851	283.316	0.000
Vuruş Süresi	3	63.072	21.024	42.591	0.000
İşlem Türü	2	2.027	1.014	2.053	0.157
Akım*Vuruş	9	24.751	2.750	5.571	0.001
Akım*İşlem	6	10.153	1.692	3.428	0.020
Vuruş*İşlem	6	7.308	1.218	2.467	0.064
Hata	18	8.885	0.494		
Toplam	48	20299.564			
Doğrulanmış Toplam	47	535.749			
R ²				0.983 (Düzenlenmiş R ² =0.957)	

Çizelge 5.17, elektrot aşınma hızı için Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Tukey testleri elektrot aşınma hızına etki açısından her bir çalışma akımı değerinin önemli olduğunu, 60 μ s ve 80 μ s vurum süreleri arasında önemli bir farkın olmadığını, ancak 40 μ s ve 20 μ s vurum sürelerinin diğer vurum süreleri ile karşılaştırıldığında önemli şekilde farklı olduğunu, işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi ile oluşan elektrot aşınma hızları arasında önemli bir farkın olmadığını göstermektedir.

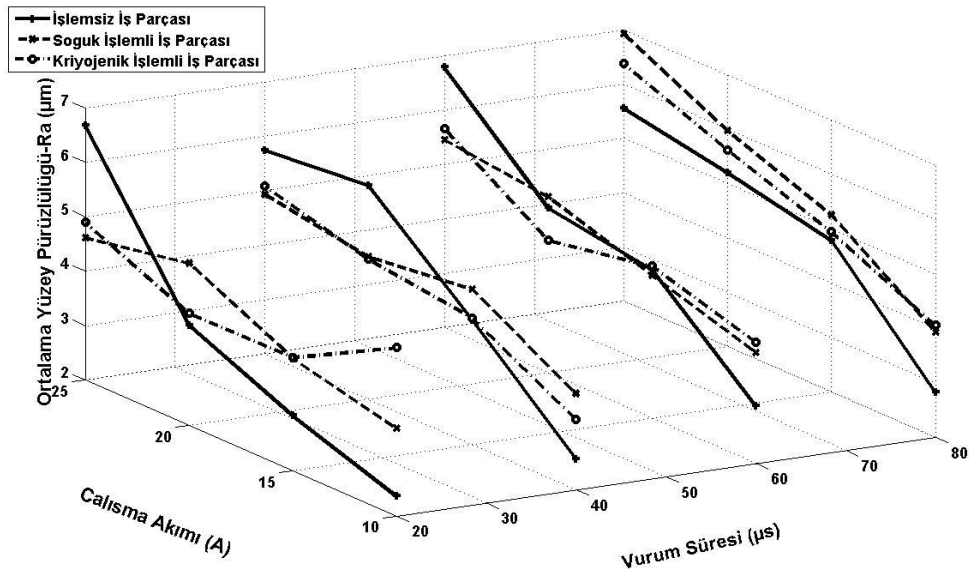
Çizelge 5.17. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen elektrot aşınma hızı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	16.640 d			
	15	12		18.469 c		
	20	12			21.739 b	
	25	12				24.318 a
	P		1.000	1.000	1.000	1.000
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	80	12	19.045 c			
	60	12	19.500 c			
	40	12		20.602 b		
	20	12			22.018 a	
	P		0.410	1.000	1.000	
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Soğuk	16	20.021 a			
	İşlemsiz	16	20.335 a			
	Kriyojenik	16	20.518 a			
	P		0.140			

5.3.3. Soğuk ve kriyojenik işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkileri

Şekil 5.10, ortalama yüzey pürüzlülüğü için deneysel sonuçların grafiklerini göstermektedir. Veri ortalamalarının ana etkilerine göre, ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde, 10A ve 25A arasında %60 oranında bir artış vardır. Ancak bu artış miktarı, soğuk ve kriyojenik işlemlili elektrotların kullanıldığı deney şartları ile karşılaştırıldığında çok daha düşüktür. Dolayısıyla, soğuk ve kriyojenik işlemlili iş parçalarının kullanılması sonucu, çalışma akımının yüzey pürüzlülüğü üzerine olan olumsuz etkisinin azaldığı sonucuna varılabilir. Vurum süresine bağlı olarak da ortalama yüzey pürüzlülük değerinde 20 μ s ve 80 μ s vurum süreleri arasında %20 oranında bir artış vardır. Soğuk işlemlili berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının

kullanılmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinde %6 ve kriyojenik işlemler berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması ile de %4 oranında artışlar meydana gelmiştir. Bu farklılıklar 80 μ s vurum süresinde net bir şekilde görülmekle birlikte bu artışlara, daha yüksek malzeme kaldırma hızlarının sebep olduğu düşünülmektedir. Soğuk işlemler iş parçaları ile kriyojenik işlemler iş parçaları arasındaki değişim de önemsiz sayılabilir.



Şekil 5.10. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemler berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri

20 μ s, 40 μ s ve 60 μ s vurum sürelerinde yüzey pürüzlülüğü oluşumu gelişigüzel bir şekilde meydana gelmiştir ve eğriler arasında kararlı bir dağılım görülmemektedir. Bu durum, elektro erozyon işleminin karakteristiklerinden kaynaklanabilir. Çünkü, elektro erozyon ile işleme esnasında püskürtme işleminin her deney şartında etkili bir şekilde gerçekleşmediği ve böylece malzeme üzerinden ergiyen parçacıkların delik içerisinden etkili bir şekilde uzaklaştırılmadığı ve bu durumun delik içi yüzeyinin ergime ve yeniden katılaşma sonrasında düzensiz bir şekilde oluşmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Çizelge 5.18, ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. Çalışma akımı ve vurum süresi faktörleri ile çalışma akımı ve işlem

türü arasındaki iki yönlü etkileşimin 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine olan etkileri önemlidir.

Çizelge 5.18. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	29.227	9.742	31.861	0.000
Vurum Süresi	3	5.007	1.669	5.458	0.008
İşlem Türü	2	0.664	0.332	1.086	0.359
Akım*Vurum	9	2.929	0.325	1.065	0.432
Akım*İşlem	6	6.441	1.074	3.511	0.018
Vurum*İşlem	6	2.033	0.339	1.108	0.396
Hata	18	5.504	0.306		
Toplam	48	1105.968			
Doğrulanmış Toplam	47	51.805			
R ²				0.894 (Düzenlenmiş R ² =0.723)	

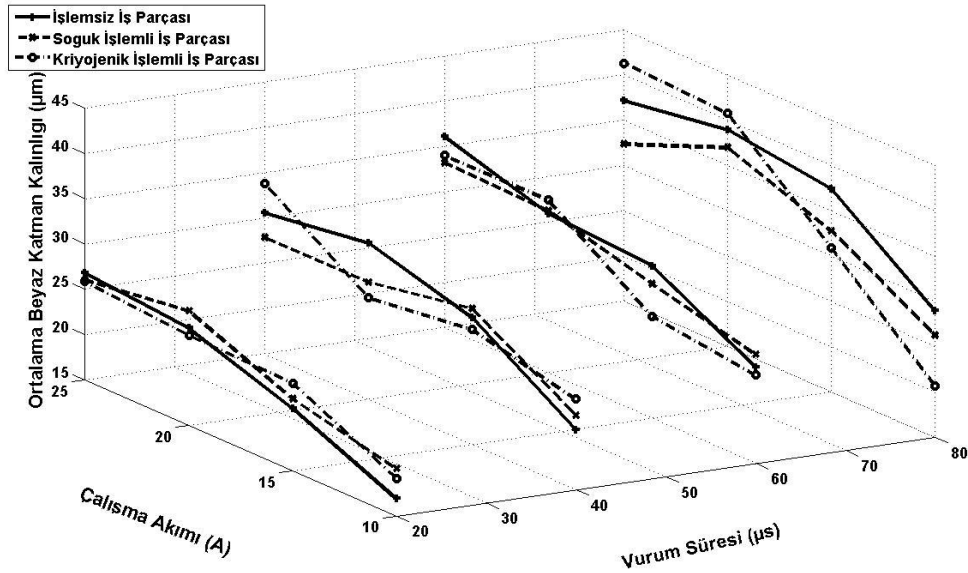
Çizelge 5.19, ortalama yüzey pürüzlülüğü için Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Tukey testleri, ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki açısından, 10A ve 25A çalışma akımı değerleri arasındaki farkın diğer iki akım değerleri arasındaki farka göre önemli olduğunu, sadece 20µs ve 80µs vurum süreleri arasındaki farkın önemli olduğunu, işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli iş parçalarının kullanılması ile elde edilen yüzey pürüzlülükleri arasındaki farklılıkların önemli olmadığını göstermektedir.

Çizelge 5.19. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Testi		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	3.574 c			
	15	12		4.483 b		
	20	12		4.961 b		
	25	12			5.727 a	
	P		1.000	0.186	1.000	
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	4.278 b			
	40	12	4.500 ab	4.500 ab		
	60	12	4.845 ab	4.845 ab		
	80	12		5.123 a		
	P		0.092	0.057		
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	İşlemsiz	16	4.528 a			
	Kriyojenik	16	4.723 a			
	Soğuk	16	4.809 a			
	P		0.343			

5.3.4. Soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının ortalama beyaz katman kalınlığına etkileri

Ortalama beyaz katman kalınlığı için deneysel sonuçların grafikleri Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Veri ortalamalarının ana etkilerine göre, ortalama beyaz katman kalınlıklarında, çalışma akımına bağlı olarak doğrusal bir artış vardır. Çalışma akımı ortalama beyaz katman kalınlığını 10A ve 25A arasında %38 oranında artırmıştır. Ancak bu artış miktarı da, soğuk ve kriyojenik işlemlerli elektrotların kullanıldığı deney şartları ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Sonuç olarak aynı şekilde, soğuk ve kriyojenik işlemlerli iş parçalarının kullanılması sonucu, çalışma akımının beyaz katman oluşumu üzerine olan olumsuz etkisinin azaldığı sonucuna varılabilir. Vurum süresine bağlı olarak da ortalama beyaz katman kalınlığında bir artma eğilimi vardır. Bu eğilim 20µs ve 80µs vurum süreleri arasında doğrusal olarak %43 değerindedir. Ortalama beyaz katman kalınlığı açısından vurum süresinin aynı şekilde çalışma akımından daha önemli olduğu ancak aralarındaki farkın önemsiz olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının farklı çalışma akımı ve farklı vurum sürelerinde elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlıkları

Soğuk işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılmasıyla ortalama beyaz katman kalınlığında önemsiz sayılabilecek azalmalar meydana gelmiştir. Önemli sayılabilecek bu azalma miktarları da 80 μ s vurum süresinde ve düşük çalışma akımı değerlerinde görülmüştür.

Çizelge 5.20. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	596.882	198.961	34.127	0.000
Vurum Süresi	3	670.362	223.454	38.329	0.000
İşlem Türü	2	9.511	4.756	0.816	0.458
Akım*Vurum	9	69.014	7.668	1.315	0.296
Akım*İşlem	6	45.814	7.636	1.310	0.303
Vurum*İşlem	6	28.952	4.825	0.828	0.564
Hata	18	104.939	5.830		
Toplam	48	41838.819			
Doğrulanmış Toplam	47	1525.475			
R ²				0.931 (Düzenlenmiş R ² =0.820)	

Ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları için varyans analizi tablosu Çizelge 5.20’de gösterilmektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak ortalama beyaz katman kalınlığı üzerine sadece çalışma akımı ve vurum süresi faktörlerinin ana etkileri önemlidir. Herhangi iki parametre arasındaki iki yönlü etkileşimlerin sonuçlar üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Ortalama beyaz katman kalınlığı için Tukey test sonuçları ise Çizelge 5.21’de gösterilmiştir. Tukey testleri, ortalama beyaz katman kalınlığı oluşumuna etki açısından 10A ve 15A çalışma akımı değerlerinin diğer çalışma akımı değerlerinden önemli bir şekilde farklı olduğunu, 20A ve 25A akım değerleri arasındaki farkın önemli olmadığını, 20 μ s ve 80 μ s vurum sürelerinin diğer vurum sürelerinden önemli şekilde farklı olduğunu ve 40 μ s ve 60 μ s vurum sürelerinin birbirleri arasındaki farkın önemli olmadığını ve ayrıca işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkın da önemsiz olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.21. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının işlenmesi sonucu elde edilen beyaz katman kalınlığı sonuçları için Tukey testleri

Post-Hoc Test		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	10	12	23.296 c			
	15	12		28.778 b		
	20	12			31.761 a	
	25	12			32.087 a	
	P		1.000	1.000	0.987	
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	20	12	23.570 c			
	40	12		27.929 b		
	60	12		30.692 b		
	80	12			33.730 a	
	P		1.000	0.052	1.000	
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Soğuk	16	28.584 a			
	Kriyojenik	16	28.755 a			
	İşlemsiz	16	29.602 a			
	P		0.472			

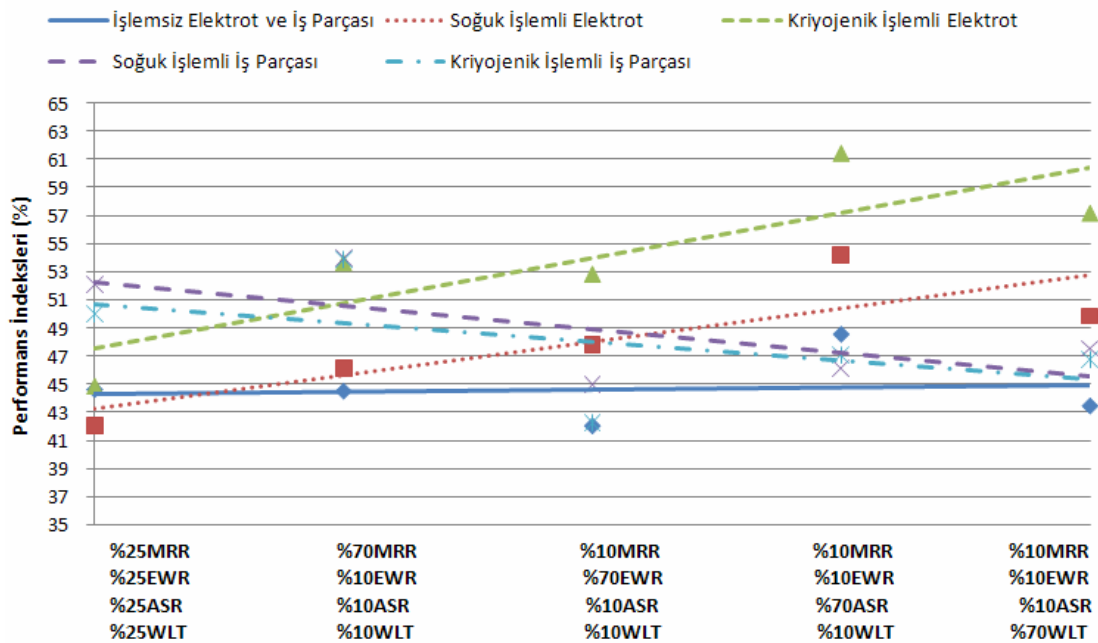
5.4. İşlemsiz, Soğuk İşlemli ve Kriyojenik İşlemli Elektrot ve İş Parçaları ile Gerçekleştirilen Deney Şartları için Performans İndeks İncelemesi

Şekil 5.12, beş farklı elektro erozyon işleme deney şartında (işlemsiz elektrot-işlemsiz iş parçası, soğuk işlemli elektrot-işlemsiz iş parçası, kriyojenik işlemli elektrot-işlemsiz iş parçası, işlemsiz elektrot-soğuk işlemli iş parçası ve işlemsiz elektrot-kriyojenik işlemli iş parçası) malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçlarına eşit ve farklı derecelerde önem verildiğinde performans indeks değişimlerini göstermektedir.

Malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman oluşumu sonuçlarına eşit önem verildiği durumlarda soğuk ve kriyojenik işlemli elektrotlar ile elektro erozyon performansı önemli bir şekilde etkilenmez iken, yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınma hızı ve beyaz katman oluşumları daha fazla dikkate alındığında soğuk ve kriyojenik işlemli elektrotların performansları artmaktadır. Ancak, tüm sonuçlara eşit önem verildiğinde soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının performansları çok daha iyi iken, yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman oluşumlarına daha fazla önem verildiği durumlarda soğuk ve kriyojenik işlemli berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının performansları azalmaktadır.

Ayrıca, her bir elektro erozyon işleme sonucuna eşit derecede önem verildiğinde çalışma akımının artmasına bağlı olarak elektro erozyon işleme performansında önemli bir azalma vardır. Bu azalma 10A ve 25A akım değerleri arasında %39 oranındadır. Vurum süresine bağlı olarak da elektro erozyon işleme performansında bir azalma vardır. Bu azalma ise 20 μ s ve 80 μ s vurum süreleri arasında %21 değerindedir. Soğuk işlemlili elektrotlar, kriyojenik işlemlili elektrotlar ve işlemsiz elektrotların kullanılması durumunda elektro erozyon işleme performansı farkı, tüm sonuçlara eşit önem verildiğinde önemsizdir. Ancak, aynı durumda soğuk işlemlili ve kriyojenik işlemlili iş parçaları elektro erozyon işleme performansını sırasıyla %17 ve %12 oranlarında artırmıştır.

Çizelge 5.22, tüm elektro erozyon işleme sonuçlarına eşit önem verildiğinde, performans indeksleri için varyans analizini göstermektedir. 0.05 önem seviyesi ve %95 güven aralığına bağlı olarak çalışma akımı, vurum süresi ve işlem türlerinin elektro erozyon performansı üzerine etkileri önemlidir. Herhangi iki parametre arasındaki iki yönlü etkileşimlerin sonuçlar üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.12. Farklı önem derecelerine karşılık performans indeksleri

Çizelge 5.22. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin performans indeksleri için varyans analizi

Kaynak	SD	Tip III Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çalışma Akımı	3	7070.424	2356.808	70.993	0.000
Vurum Süresi	3	1269.700	423.233	12.749	0.000
İşlem Türü	4	1113.817	278.454	8.388	0.000
Akım*Vurum	9	627.969	69.774	2.102	0.055
Akım*İşlem	12	335.668	27.972	0.843	0.608
Vurum*İşlem	12	360.398	30.033	0.905	0.551
Hata	36	1195.119	33.198		
Toplam	80	186673.417			
Doğrulanmış Toplam	79	11973.094			
R ²				0.900 (Düzenlenmiş R ² =0.781)	

Çizelge 5.23 ise tüm elektro erozyon işleme sonuçlarına eşit önem verildiği durumdaki performans indeksleri için Tukey test sonuçlarını göstermektedir. Elektro erozyon işleme performansına etkisi açısından 10A ve 15A akım değerlerinin sonuçlar üzerine etkisinin önemli bir şekilde farklı olduğunu, 20A ve 25A akım değerleri arasındaki farkın önemli olmadığını, 20µs ve 60µs ile 40µs ve 80µs vurum süreleri arasındaki farkların önemli olduğunu ve işlemsiz elektrot ve iş parçaları ile yapılan deney şartları ile karşılaştırıldığında sadece soğuk işlemlili iş parçalarının kullanılması ile yapılan deneylerde elektro erozyon işleme performansının önemli şekilde farklı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.23. İşlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlili bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçaları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin performans indeksleri için Tukey testleri, E: Elektrot, İP: İş parçası

Post-Hoc Test		N	Altküme			
			1	2	3	4
Tukey HSD (Akım) $\alpha=0.05$	25	20	37.375 c			
	20	20	40.123 c			
	15	20		47.824 b		
	10	20			61.601 a	
	P		0.443	1.000	1.000	
Tukey HSD (Vurum) $\alpha=0.05$	80	20	41.236			
	60	20	45.675	45.675 b		
	40	20		47.689 ab	47.689 ab	
	20	20			52.322 a	
	P		0.088	0.688	0.070	
Tukey HSD (İşlem) $\alpha=0.05$	Soğuk E	16	42.036			
	İşlemsiz E	16	44.602	44.602 b		
	Kriyojenik E	16	44.881	44.881 b		
	Kriyojenik İP	16		50.066 ab	50.066 ab	
	Soğuk İP	16			52.069 a	
	P		0.634	0.077	0.861	

5.5. Tartışma

Genel olarak, soğuk ve kriyojenik işlemlerin, malzeme özelliklerini, mikroyapı mikrosertlik, elektriksel direnç/iletkenlik, X-ray analizleri ve ısı genleşme sonuçlarına bağlı olarak etkilemesi sebebiyle, önemli olduğu görülmektedir. Bakır malzemelerin tane boyutu oluşumunda malzemenin kimyasal bileşiminde bulunan ve katkı/safsızlık oluşturan elementlerin varlığı, tane boyut oranını belirleyen etkenlerden birisidir. Katkı oranı az oldukça bakır taneleri daha iri ve sütunsal oluşurken, katkı oranı arttıkça taneler eş eksenli ve dokusal şekilde meydana gelmektedir. Yüksek katkı oranlarında daha küçük taneli mikroyapı oluşmaktadır.

Saf bakırın üretilmesinde, fosfor ve kükürt gibi katkı/safsızlık oluşturan elementlerin oranlarının, özellikle malzemenin bakır-oksit (Cu_2O) içermemesi için, %0.04-%0.04 oranında olması önerilmektedir. Bu değerlerin üzerinde tane sınırlarına çökelen sülfürler ayrıca malzemenin mekanik özelliklerini de olumsuz olarak etkileyebilmektedirler [71]. Ancak bu çalışmada kullanılan bakır elektrotlarda katkı oluşturan elementin (fosfor) miktarı düşük olduğundan (%0.015-%0.040), tane sınırlarında bir çökelti görülmemiştir ve tane büyümesi katkı maddesine bağlanamaz. Dolayısıyla bu malzemelerdeki tanecik boyutu değişimleri soğuk ve kriyojenik işlemlerle ilgili olacaktır.

Soğuk ve kriyojenik işlemler ile malzemelerin soğutulması sonucu yeniden kristalleşmenin meydana geldiği ve dolayısıyla tane yapılarının küçüldüğü ancak, temperleme işlemi sonrası tane yapılarının irileştiği düşünülmektedir. Bu şekildeki tane büyümesi, tane sınırı alanının azalması ile oluşan yüzey enerjisindeki azalmalar ile izah edilmiştir [72]. Tane boyutu ve malzemenin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi veren Hall-Petch eşitliğine bağlı olarak soğuk ve kriyojenik işlemler sonucu, bakır malzemelerde tane boyutunun büyümesi ile akma dayanımlarının azaldığı sonucuna varılabilir.

Elektrotlara elektriksel alan uygulandığında, serbest elektronlar hızlanmakta ve kafes atomlarıyla çarpışarak hareket etmektedirler. Bu durum, serbest elektronların kinetik

enerjilerinin azalmasına veya kaybolmasına sebep olur. İdeal bir kristal yapıda elektronlar herhangi bir dirençle karşılaşmadan hareket ederler. Ancak, gerçek kristallerde elektronlar fononlar, dislokasyonlar, boşluklar, yabancı katkı atomları ve herhangi başka kafes kusuruyla çarpışırlar [64, 73]. Bakır-oksit oluşumu, saf bir bakırda kristalleşme sonucu mikroyapıda bir kusur olabileceğinden ve böylece elektriksel direnci artırabileceğinden istenilmeyen bir durumdur. Bu çalışmada, soğuk ve kriyojenik işlemlerden sonra gerçekleştirilen temperleme işlemine bağlı olarak bakır malzemelerin mikroyapılarında bakır-oksit oluşumları gözlemlenmiştir. İşlemsiz elektrotlar ile karşılaştırıldığında soğuk ve kriyojenik işlemlerli elektrotlarda bakır-oksit parçacıklarının yoğun şekilde oluşmasının elektriksel iletkenliğin azalmasına sebebiyet verdiği ancak, soğuk ve kriyojenik işlem sonucunda berilyum-bakır alaşımlarındaki tanecik büyümesinin, tane sınırlarını azalttığı ve böylece elektriksel iletkenliği olumlu yönde etkilediği ve elektro erozyon performansının da bu sonuçlara bağlı olarak değişim gösterdiği düşünülmektedir.

Soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda bakır elektrotların elektriksel iletkenliklerinde meydana gelen azalmalar elektro erozyon performansı açısından istenilmeyen sonuçlardır. Ancak, soğuk ve kriyojenik işlem sonucunda bakır elektrotların elektriksel iletkenliklerinde meydana gelen bu azalmalar, elektro erozyon performansını olumsuz yönde etkilememiştir. Soğuk ve kriyojenik işlemler, bakır elektrotların aksine berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektriksel iletkenliklerinin artmasına sebebiyet vermiştir. Bu sonuçlar benzer çalışmalardaki [50-52] sonuçlar ile uyumluluk göstermektedir. Malzemelerin elektriksel iletkenliklerinde meydana gelen azalmalar ve artışlar, Wiedemann-Franz-Lorenz kanununa bağlı olarak malzemelerin termal iletkenliklerinin de azalmasına veya artmasına sebebiyet verecektir [52].

X-ray analiz sonuçları, maksimum yoğunluğun yarısında tam genişlik (FWHM) değerlerine ve hesaplanan kalıntı gerilme sonuçlarına bağlı olarak malzemelerin kristal yapılarının soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda değiştiğini göstermektedir. Isıl genleşme, ortalama atomlar arası mesafe/ayrışmadaki artış miktarı ile izah edilmektedir. Atomlar arası bağlanma enerjisi büyüdükçe ısıl genleşme katsayısı

daha düşük meydana gelmektedir [64]. Isıl genleşme testleri, soğuk ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların sıcaklık artışına bağlı olarak ısı genleşme miktarlarının azaldığını ve dolayısıyla sıcaklığa karşı dayanımlarının arttığını göstermiştir. Böylece, soğuk ve kriyojenik işlem sonucu bakır elektrotların aşınma oranlarında meydana gelen azalmalar, ısı genleşmelerde meydana gelen iyileşmeler ile açıklanabilir. Bu bilgilere ek olarak, aralıklı olarak termal testlere maruz bırakılan işlemsiz bakır elektrotların ısı genleşme miktarlarında önemli bir değişim görülmez iken, soğuk işlemli bakır elektrotların ısı genleşme miktarları artmış ve kriyojenik işlemli bakır elektrotların ısı genleşme miktarları ise azalmıştır. Bu sonuç, kriyojenik işlem sonucunda bakır elektrotların, aralıklı olarak yüksek ısıya maruz kalacağı bir elektro erozyon işleminde daha iyi aşınma direncine sahip olacağını ortaya koymaktadır.

Soğuk ve kriyojenik işlemli elektrotların aşınma oranlarında meydana gelen hacimsel azalmalar ile birlikte elektrot uç kısmında meydana gelen akım yoğunluğunun arttığı ve böylece malzeme kaldırma hızının etkilendiği düşünülmektedir. Yine aynı şekilde, elektro erozyon ile işleme esnasında soğuk ve kriyojenik işlemlere maruz kalmış elektrotların özellikle ön yüzeylerinde oluşan aşınmalardaki hacimsel azalmalar ile birlikte elektrotların dış yüzeylerinde meydana gelen akımsal yoğunluğun azaldığı bunun da elektrot dış yüzeyi ve delik içi yüzeyi arasında meydana gelen elektriksel kıvılcımların/boşalımların azalmasına sebep olduğu ve böylece yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman oluşumlarının etkilendiği farz edilmektedir.

Soğuk ve kriyojenik işlemlerden sonra bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarında gözlemlenen mikrosertlikteki azalmalar, benzer çalışmalardaki [38, 52] sonuçlar ile uyumluluk göstermektedir. Mikrosertlikteki azalmalar soğuk ve kriyojenik işlemlerden sonra gerçekleştirilen temperleme ve sonuç olarak tane büyümesi ile açıklanabilir. İş parçalarının sertliklerinde meydana gelen azalmaların malzeme kaldırma hızını etkilediği düşünülmektedir. Çünkü bir malzemenin ergime noktası malzemenin sertliğinin azalması ile düşebilmektedir ve malzemenin ergime noktasının düşmesi, elektriksel kıvılcımlar ile malzemenin kaldırılmasını kolaylaştıracaktır.

Benzer birçok çalışmada da gösterildiği gibi çalışma akımı elektro erozyon performansını etkileyen en önemli parametredir. Çünkü işleme süreci esnasında çalışma akımı artırıldığında malzemeye iletilen enerji miktarı çok daha fazladır veya başka bir ifadeyle, çalışma akımının artmasıyla birlikte elektrik boşalımına bağlı daha yüksek güç sağlanmaktadır ve böylece malzeme üzerinden çok daha fazla enerji kaldırılmaktadır. Ancak bu sonuç, aynı zamanda işleme yüzeylerinde daha derin kraterlerin oluşmasına ve daha kaba bir yüzeyin elde edilmesine sebep olmaktadır [3].

Benzer bir çalışmada da [74] gösterildiği gibi, elektrik vurum süresinin çalışma akımı ile karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi önemli olmakla birlikte daha azdır. Düşük seviyeli vurum süreleri yüzeylerdeki tepe noktalarını veya yüzeyin elektrotta yakın kısımlarını etkileyebilmektedirler. Ancak yüzeylerin dip kısmındaki bölgeler etkilenmemektedir. Vurum süresi artırıldığında yüzeyin büyük bir bölümü elektriksel erozyonlar sonucu etkilenmekte ve bundan dolayı yüzey dokusunda ki değişimler önemli olmaktadır [69]. Bu çalışmadaki sonuçlar, vurum süresinin artmasına bağlı olarak beyaz katman kalınlıklarının da arttığını göstermiştir. Bu durum, yüksek vurum sürelerinde dielektrik akışının ergiyen malzemeleri uzaklaştırmakta yetersiz kalması ve daha fazla ısının iş parçasına nüfuz etmesi ile açıklanabilir. Aynı şekilde yüksek vurum sürelerinde, dielektrik sıvısının soğutma etkisi, işlenmiş yüzeyde metalin daha uygun bir şekilde yeniden katılaşmasına sebep olmaktadır [6]. Bazı çalışmaların aksine [6, 75], bu çalışmada malzeme kaldırma hızının, vurum süresinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Bu farklılık elektrot ve iş parçası malzeme çiftlerinin farklılığından kaynaklanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Malzeme özelliklerindeki değişimleri belirlemek amacıyla mikroyapı, mikrosertlik, elektriksel iletkenlik, X-ray analizleri ve ısı genleşme testleri yapılmıştır. Böylece, elektro erozyon işleme performansı, elektrot ve iş parçası malzemesi özelliklerindeki değişime bağlı olarak değerlendirilmiştir. Elektro erozyon işleme performansı açısından, malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, elektrot deformasyonu, yüzey pürüzlülüğü, ortalama beyaz katman kalınlığı sonuçları arasındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda bakır malzemelerde tanecik yapısı küçülürken, berilyum-bakır alaşımı malzemelerde tanecik yapısı büyümüştür.
- Soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda bakır elektrot malzemelerde gözlemlenen bakır-oksit (Cu_2O) miktarının daha yoğun olduğu görülmüştür.
- Soğuk ve kriyojenik işlemler bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçası malzemelerinin mikrosertliklerinin azalmasına sebebiyet vermiştir.
- Soğuk ve kriyojenik işlemler sonucunda bakır elektrot malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri azalırken, berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektriksel iletkenlikleri artmıştır.
- Soğuk ve kriyojenik işlemler bakır ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kristal yapılarının değişmesine sebep olmuştur.
- Soğuk ve kriyojenik işlemler ile bakır malzemelerin ısı genleşme miktarlarında azalma tespit edilmiştir.
- Soğuk işlemlerle bakır elektrotların malzeme kaldırma hızına etkisinin önemsiz olduğu görülürken, kriyojenik işlemlerle elektrotlar malzeme kaldırma hızını artırmıştır. Aynı zamanda, soğuk ve kriyojenik işlemlerle berilyum-bakır alaşımı

iş parçalarının kullanılması ile de malzeme kaldırma hızı önemli şekilde artmıştır.

- Soğuk ve kriyojenik işleme maruz bırakılmış bakır elektrotların aşınma hızlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, soğuk ve kriyojenik işlemlerle berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması ile işlemsiz elektrotların aşınma hızlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir.
- Soğuk ve kriyojenik işlemlerle elektrotlar ile karşılaştırıldığında, işlemsiz elektrotlarda daha fazla deformasyon olduğu görülmüştür.
- Soğuk ve kriyojenik işlemlerle elektrotların kullanılması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, soğuk ve kriyojenik işlemlerle berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.
- Soğuk ve kriyojenik işlemlerle elektrotların kullanılması ile ortalama beyaz katman kalınlığının azaldığı gözlemlenmiştir. Soğuk ve kriyojenik işlemlerle berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının kullanılması ile ortalama beyaz katman kalınlığı oluşumunda dikkate değer bir değişim gözlemlenmemiştir.
- Bakır elektrotların performansı göz önüne alındığında kriyojenik işlemin soğuk işlemden daha etkili olduğu görülürken, berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının performansı göz önüne alındığında soğuk ve kriyojenik işlemler arasında dikkate değer bir farklılık görülmemiştir.
- Performans indekslerine bağlı olarak, elektro erozyon işleminde malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve beyaz katman kalınlığı oluşumu sonuçlarına daha fazla önem verildiğinde soğuk ve kriyojenik işlemlerin bakır elektrotlar için önemli olduğu görülmektedir. Ancak tüm sonuçlara eşit önem verildiğinde soğuk ve kriyojenik işlemlerin bakır elektrotlar için önemsiz olduğu söylenebilir. Berilyum-bakır alaşımları açısından özellikle malzeme kaldırma hızına daha çok önem verildiğinde soğuk ve kriyojenik işlemlerin elektro erozyon performansını önemli şekilde arttığı görülmüştür.
- Genel olarak, soğuk ve kriyojenik işlemler arasında, gerek malzeme özelliklerine etkisi açısından gerekse elektro erozyon performansını etkilemesi açısından dikkate değer farklılıklar çok azdır. Dolayısıyla, soğuk ve kriyojenik

işlemlerin döngü süreleri göz önüne alındığında, maliyetler açısından soğuk işlemin tercih edilmesi daha faydalı olacaktır.

6.2. Öneriler

Yukarıdaki sonuçlara bakılarak aşağıdaki çalışmaların yapılması bu konunun daha iyi değerlendirilmesi ve gelecekte yapılacak çalışmalar açısından faydalı olacaktır.

- Soğuk ve kriyojenik işleme maruz kalmış farklı elektrot ve iş parçası çiftlerinin elektro erozyon işleme performansına etkilerinin incelenmesi yararlı olacaktır.
- Yapılacak bu çalışmalarda soğuk ve kriyojenik işlemlerin döngü süreleri, sıcaklık dereceleri ve temperleme aşamalarının değiştirilmesiyle daha farklı sonuçlar elde edilebilecektir. Kriyojenik işlem, ıslatma/emdirme sıcaklığı -273°C 'ye kadar düşürülerek denenebilir.
- Bu çalışmada, işlemsiz, soğuk ve kriyojenik işlemlerle elektrotlar ve iş parçaları ile yapılan elektro erozyon işleme deneylerinde belirgin olan farklılıkların birçoğu 80µs vurum süresinde görülmüştür. Dolayısıyla, gelecekte yapılacak ve soğuk veya kriyojenik işlemlerin deneneceği elektro erozyon işleme deneylerinde vurum süresi olarak daha geniş aralıkların kullanılması yararlı olacaktır. Ayrıca bu çalışmalarda, vurum süresi faktörünün sabit olmayıp değişken bir parametre olarak kullanılması daha farklı sonuçların elde edilmesine sebep olabilir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarda soğuk ve kriyojenik işlemlerin malzemelerin farklı mekaniksel özelliklerine etkisinin incelenmesi, elektriksel ve termal testlerin geliştirilerek tekrar edilmesi gerekmektedir.
- Kriyojenik soğutma direk olarak elektro erozyon ile işleme esnasında elektrot üzerine farklı yöntemler ile uygulanabilir.

KAYNAKLAR

1. Rajurkar, K. P., "Nontraditional Manufacturing Processes", Handbook of Design Manufacturing and Automation Chapter 13, **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, 211-241 (1994).
2. Vijay C., "Performance Characteristics of Electro Discharge Drilling Process", Master of Science Thesis, Industrial and Management Systems Engineering, **University of Nebraska-Lincoln**, 1-30 (2003).
3. Rajurkar, K. P., Royo, G. F., "Improvement in EDM performance by R. F. control and orbital motion", **Research and Technological Developments in Nontraditional Machining, The Winter Annual Meeting of The American Society of Mechanical Engineers**, Chicago, Illinois, November 27-December 2, 51-62 (1988).
4. Kunieda, M., Miyoshi, Y., Takaya, T., "High speed 3D milling by dry EDM", **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, 52 (1): 147-150 (2003).
5. Kunieda, M., Takaya, T., Nakano, S., "Improvement of dry EDM characteristics using piezoelectric actuator", **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, 53 (1): 183-186 (2004).
6. Lee, H. T., Hsu, F. C., Tai, T. Y., "Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode", **Materials Science and Engineering A**, 364: 346-356 (2004).
7. Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P., "Cryogenic machining of hard-to-cut materials", **Wear**, 239: 168-175 (2000).
8. Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., Rahman, M., "Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 46: 2051-2056 (2006).
9. Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., Rahman, M., "Performance of cryogenically treated tungsten carbide tool in milling operations", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 32: 638-643 (2007).
10. Da Silva, F. J., Franco S. D., Machado, A. R., Ezugwu E. O., Souza Jr., A. M., "Performance of cryogenically treated HSS tools", **Wear**, 261: 674-685 (2006).
11. Yildiz Y., Nalbant M., "A review of cryogenic cooling in machining processes", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 48: 947-964 (2008).
12. Miller, P. C., "Cryogenics: deep cold solves", **Tooling & Production**, 45 (11): 82-86 (1980).

13. Waits, L., "A guide to electrode materials selection", *Nontraditional Machining Symposium-Society of Manufacturing Engineers (SME)*, November 5-7, Orlando, Florida, (1991).
14. Prasad, S. G., "A Comprehensive Study of Wire Electrical Discharge Machining of Beryllium-Copper Alloys", Master of Science Thesis, Interdepartmental Area of Manufacturing Systems Engineering, *University of Nebraska-Lincoln*, 1-30 (1995).
15. Barron, Randall F., "Cryogenic Heat Transfer", *Taylor & Francis*, Philadelphia, USA, (1999).
16. Jha, A. R., "Cryogenic Technology and Applications", *Elsevier Academic Press*, Burlington, MA 01803, USA, 15-20 (2006).
17. Timmerhaus Klaus, D., Reed Richard, P., "Cryogenic Engineering, Fifty Years of Progress", *Springer*, New York, USA, 20-25 (2007).
18. Sitting, M., Kidd, S., "Cryogenics, Research and Applications", *D. Van Nostrand Company, Inc.*, Princeton, New Jersey, New York, 4-6, 62-73, 203-209 (1963).
19. Braton, N. R., "Cryogenic Recycling and Processing", *CRC Press, Inc.*, Boca Raton, Florida, 14-23 (1980).
20. Lady, E. R., "Cryogenic engineering, a two-week intensive course for engineers and scientists", *The University of Michigan Engineering Summer Conferences*, Ann Arbor, Michigan, May 24 – June 4, (1965).
21. Barron, R. F., "Cryogenic Systems 2nd ed.", *Oxford University Press, New York Clarendon Press*, Oxford, 13-38 (1985).
22. Vance, R. W., Duke, W. M., "Applied Cryogenic Engineering", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 23-49 (1962).
23. Haselden, G. G., "Cryogenic Fundamentals", *Academic Press Inc.*, Berkeley Square House, Berkeley Square, London, W1X 6BA, 23-27 (1971).
24. Eldridge, E. A., Deem, H. W., "Report on physical properties of metals and alloys from cryogenic to elevated temperatures", American Society For Testing Materials, *American Society of Mechanical Engineers*, 1916 Race Street, Philadelphia, 24-28 (1960).
25. Jiao X. D., Li, L. F., Liu, H. J., Yang, K., "Mechanical properties of low density alloys at cryogenic temperatures", *Transactions of the International*

Cryogenic Materials Conference (ICMC), Keystone, Colorado, 29 August – 2 September, 69-76 (2005).

26. Coursen, J. W., Kaufman, J. G., Sicha, W. E., “Notch toughness of some aluminum alloy castings at cryogenic temperatures”, ***Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference***, Boulder, Colorado, June 13-15, 473-483 (1966).
27. Walsh, R. P., Summers, L. T., Sims, J. R., “The fatigue and tensile properties of dispersion strengthened copper at low temperatures (77 to 295K)”, ***Proceedings of the Eleventh International Cryogenic Materials Conference (ICMC)***, July 17-21, In Columbus, Ohio, 493-498 (1995).
28. Nakahara, S., Nishida, S., Hisada, S., Fujita, T., “Thermal contraction coefficient measurement technique of several materials at low temperatures using electronic speckle pattern interferometry”, ***Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Materials Conference (ICMC)***, July 28 – August 1, In Portland, Oregon, 359-366 (1997).
29. Allen Richard, J., “Cryogenics”, ***J. B. Lippincott Company***, Philadelphia and New York, 11-12, 112-114 (1964).
30. Brandao, L., Walsh, R. P., Han, K., Embury, J. D., Van Sciver, S., “New cryogenic processing for the development of high strength copper wire for magnet applications”, ***Proceedings of the International Cryogenic Materials Conference (ICMC)***, July 12-15, In Montreal, Quebec, Canada, 89-96 (1999).
31. Hust, J. G., Giarratano, P. J., “Thermal and electrical measurements on selected materials for low-temperature applications”, ***Proceedings of the First International Cryogenic Materials Conference***, Ontario-Canada, July 22-25, 128-135 (1975).
32. Vaccari, J. A., “Deep freeze improves products”, ***American Machinist & Automated Manufacturing***, 130 (3): 90-92 (1986).
33. Sweeney, T. P., “Deep cryogenics: the great cold debate”, ***Cryogenics***, 18 (2): 28-32 (1986).
34. Carlson, E. A., “Cold treating and cryogenic treatment of steel”, ASM Handbook, Volume 4, ***ASM International***, 203-206 (1991).
35. Bowes, R. G., “The theory and practice of sub-zero treatment of metals”, ***Heat Treatment of Metals***, 1 (1): 29-32 (1974).
36. Levine, J., “Cryoprocessing equipment”, ***Heat Treating Progress***, 2 (1): 42-52 (2001).

37. Boyles, C. M., "Bee cool", *Cutting Tool Engineering*, 54 (4): 50-54 (2002).
38. Chillar, R., Agrawal S. C., "Cryogenic treatment of metal parts", *Transactions of the International Cryogenic Materials Conference (ICMC)*, Keystone, Colorado, 29 August – 2 September, 77-82 (2005).
39. Reitz, W., Pendray, J., "Cryoprocessing of Materials: A review of current status", *Materials and Manufacturing Processes*, 16 (6): 829-840 (2001).
40. Moore, K., Collins, D. N., "Cryogenic treatment of three heat-treated tool steels", *Key Engineering Materials*, 86-87: 47-54 (1993).
41. Collins, D. N., Dormer, J., "Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel", *Heat Treatment of Metals*, 24 (3): 71-74 (1997).
42. Collins, D. N., "Deep cryogenic treatment of tool steels: a review", *Heat Treatment of Metals*, 23: 40-42 (1996).
43. Collins, D. N., "Cryogenic treatment of tool steels", *Advanced Materials & Processes*, 154 (6): 23-29 (1998).
44. Yun D., Xiaoping, L., Hongshen, X., "Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechnasim", *Heat Treatment of Metals*, 25 (3): 55-59 (1998).
45. Mohan, L. D., Renganarayanan, S., Kalanidhi, A., "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels", *Cryogenics*, 41: 149-155 (2001).
46. Lulay, K. E., Khan, K., Chaaya, D., "The effect of cryogenic treatments on 7075 aluminum alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11 (5): 479-480 (2002).
47. Nordquist, W. N., "Low temperature treatment of metals", *Tooling and Production*, 72-100 (1953).
48. Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini G., Stiasny, K. H., "Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels", *Journal of Materials Processing Technology*, 118: 350-355 (2001).
49. Barron, R. F., "Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance", *Cryogenics*, 22: 409-413 (1982).
50. Trucks, H. E., "How cryogenics is used for the treatment of metals", *Manufacturing Engineering*, 91 (6): 54-55 (1983).

51. Tarr, W. R., Rhee S. K., "Thermal conductivity enhancement of Cu-0.85 Cr alloy by cryogenic treatment", *Proceedings of the Seventh Symposium on Thermophysical Properties*, May 10-12, 135-140 (1977).
52. Isaak, C. J., Reitz, W., "The effects of cryogenic treatment on the thermal conductivity of GRCop-84", *Materials and Manufacturing Processes*, 23: 82-91 (2008).
53. Gavrilas, I., Vişan, A., Marinescu, N., Opran, C., Turdeanu, E., "EDM with electrodes cooled at cryogenic temperatures", *The Bucharest Polytechnic Institute*, Romania, (1983).
54. Abdulkareem, S., Khan, A. A., Konneh, M., "Reducing electrode wear ratio using cryogenic cooling during electrical discharge machining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 (11-12): 1146-1151 (2009).
55. Mukkapati, G., Kuppan, P., Kumar, T. N., "Performance evaluation of cryogenic treated electrodes on electrical discharge machining", *CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, 355-361 (2006).
56. Singh, R., Singh, B., "Comparison of machining characteristics of titanium: effect of cryogenic treatment in electric discharge machining", *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, January 4-6, S.V. National Institute of Technology, Surat, Gujarat, India, 661-665 (2010).
57. Fredriksson, G., Hogmark, S., "Influence of dielectric temperature in electrical discharge machining of hot work tool steel", *Surface Engineering*, 11 (4): 324-330 (1995).
58. "C122 Copper", <http://www.onlinemetals.com/alloycat.cfm?alloy=122#>, (2009).
59. Sundaram, M. M., Rajurkar, K. P., "Micro electro discharge machining by uniform tool shape method – study of relative wear", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME (NAMRI/SME)*, 35: 137-144 (2007).
60. Harkness, J. C., Guha, A., "Metallography and Microstructures" ASM Handbook 9th ed., Volume 9, *American Society for Metals*, 392-414 (1985).
61. Vander Voort, G. F., "Metallography: Principles and Practice", *McGraw-Hill*, New York, 410-508 (1984).
62. Cullity, B. D., Stock, S. R., "Elements of X-Ray Diffraction", 3rd ed., *Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ 07458, 167-183 (2007).

63. Field, M., Kahles, J. F., Lammett, J. T., "A review of measuring methods for surface integrity", *Annals of the CIRP*, 21 (2): 219-238 (1972).
64. Callister, W. D., "Materials Science and Engineering An Introduction", 6th ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, 128-134 477-487 (2003).
65. Sundaram, M. M., Rajurkar, K. P., "Towards freeform machining by micro electro discharge machining process", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME (NAMRI/SME)*, 36: 381-388 (2008).
66. Bigot, S., Ivanov, A., Popov, K., "A study of the micro EDM electrode wear", *Proceedings of the 1st International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Karlsruhe, Germany, June/July, 355-358 (2005).
67. Ozgedik, A., Cogun, C., "An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27:488-500 (2006).
68. Pham, D. T., Ivanov, A., Bigot, S., Popov, K., Dimov, S., "An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33: 103-109 (2007).
69. Kahng, C. H., Rajurkar, K. P., "Surface characteristics behavior due to rough and fine cutting by EDM", *Annals of the CIRP*, 25 (1): 77-82 (1977).
70. Guitrau, E. B., "The EDM Handbook", *Hanser Gardner Publications*, Cincinnati, 25-27 (1997).
71. Hrivnak, I., "Theory of Weldability of Metals and Alloys", *Elsevier Science Publishing Company, Inc.*, New York, 313-320 (1992).
72. Moffat, W. G., Pearsall, G. W., Wulff, J., "The Structure and Properties of Materials Volume I, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 136-139 (1964).
73. Hayden, H. W., Moffat, W. G., Wulff, J., "The Structure and Properties of Materials, in Mechanical Behavior, Vol. 3", New York, John Wiley & Sons, Inc., 70-86 (1964).
74. Konig, W., Jorres, L., "Electro-discharge polishing as a surface finishing process", *ISEM9*, 14-17 (1989).
75. Marafona, J., Wykes, C., "A new method of optimizing material removal rate using EDM with copper-tungsten electrodes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (2): 153-164 (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Soyadı, adı : YILDIZ, Yakup
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.05. 1979 Adana
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 202 86 86
 Faks : 0 (312) 212 00 59
 e-mail : yakupyildiz@gazi.edu.tr

Eğitim:

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	2004
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi	2001
Lise	Adana Merkez Teknik Lisesi	1997

İş Deneyimi:

Yıl	Yer	Görev
2001-2002	OSTİM	CAD/CAM Oprt.
2002-2003	Dumlupınar Üniversitesi	Arş. Gör.
2008-2009	Nebraska Üniversitesi	Araştırmacı
2003-2010	Gazi Üniversitesi	Arş. Gör.

Yabancı Dil:

İngilizce

Yayınlar:

SCI, SCI-EXP., SSCI, AHCI Tarafından Taranan Bilimsel Dergilerde Yapılan Yayınlar

1. Yıldız, Y., Gunay, M., Seker U., “The effect of cutting fluid on surface roughness in boring of low carbon steel-technical communication”, *Machining Science and Technology*, 11: 553-560 (2007).
2. Yıldız Y., Nalbant M., “A review of cryogenic cooling in machining processes”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 947-964 (2008).
3. Yıldız, Y., Duzgun, M., “Stress analysis of ventilated brake discs using the finite element method”, *International Journal of Automotive Technology*, 11(1): 133-138 (2010).

Diğer İndeksler Tarafından Taranan Dergilerde Yapılan Yayınlar

1. Nalbant, M., Günay, M., Yıldız, Y., “Modelling of the effect of different infeed angles and cutting area on the cutting forces in the external threading”, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 32 (3): 153-161 (2008).

Uluslararası Sempozyumlarda Yayımlanan Makaleler

1. Yıldız, Y., Korkut, İ., Şeker, U., “Automatic CNC code generation for rotational parts and investigation of machining time, *Proceedings of IESM8217;05 Conference*, Marrakech, Morocco, (2005).
2. Günay, M, Yıldız, Y., “Kesici takım üzerine gelen kesme kuvvetlerinin bilgisayar destekli mühendislik ile analizi”, *1. Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, MTET 2005*, Eylül/September 05-07, İstanbul/TÜRKİYE, (2005).
3. Düzgün, M., Yıldız, Y., “Fren disklerinde oluşan ısının demiryolu araçlarının güvenliğine etkilerinin incelenmesi”, *2. Uluslararası Demiryolu Sempozyumu, Demiryolu Fuarı IRSTurkey 2008*, Haydarpaşa, İstanbul, Türkiye, (2008).
4. Düzgün, M., Yıldız, Y., “Soğutma kanallı fren disklerinin frenleme kuvvetlerine ve ısı değişimine etkileri”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*

- (*IATS09*), Karabük, Türkiye, (2009).
5. Sundaram, M. M., Yildiz, Y., Rajurkar, K. P., “Experimental study of the effect of cryogenic treatment on the performance of electro discharge machining”, *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2009)*, October 4-7, West Lafayette, Indiana, USA, (2009).
 6. Manickaraj, S. S., Yildiz, Y., Karunamoorthy, L., Rajurkar, K. P., “Fabrication of high aspect ratio holes on steel using electrical discharge machine”, *Sixth International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering (COPEN 6)*, PSG College of Technology and Amrita School of Engineering, Amrita University, Coimbatore, (2009).
 7. Nalbant, M., Yıldız, Y., “Effect of cryogenic cooling on cutting forces in milling processes”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2010)*, S.V. National Institute of Technology, Surat-395 007, Gujarat, India, January 4-6, (2010).

Katıldığı Projeler

1. Delik Tornalama Operasyonlarında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerine ve İşlenebilirliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu, Proje No: 07/2005-27, 2007, Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
2. Kriyojenik Soğutmanın Frezeleme İşlemlerinde Kesme Kuvvetleri, Takim Ömrü ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi, Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu, Proje No: 106M473, 2009, Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Muammer NALBANT
3. Kaynak Teknolojisindeki Gelişmeler, LDV Hareketlilik, Ağustos 14-Eylül 4 2005, TR/04/A/F/EX1/028, Stockholm, Sweden

EKLER

EK-1 Berilyum-Bakır Alaşımı için Faz Diyagramı [“Alloy Phase Diagrams” ASM Handbook, Volume 3, *American Society for Metals*, 392-414 (1985)].

