



**KOMPOZİT TOZ METAL ELEKTROTLARIN ELEKTRO EROZYON İLE
İŞLEME PERFORMANSININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Orhan GÜLCAN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2016

ORHAN GÜLCAN tarafından hazırlanan “KOMPOZİT TOZ METAL ELEKTROTLARIN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

Makine Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Yusuf USTA

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 14.01.2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Orhan GÜLCAN

14.01.2016

KOMPOZİT TOZ METAL ELEKTROTLARIN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Orhan GÜLCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2016

ÖZET

Kalıp ve zımbaların yüzeylerinin alaşımlanması sayesinde kalıp-zımba setinin ömrü, sertlikleri, aşınma dirençleri ve korozyon dirençleri artırılabilir. Ancak, yüksek ekipman maliyetleri ve karmaşık alaşımlama işlemleri yeni yüzey alaşımlama/değiştirme yöntemlerini araştırmayı zorunlu kılmaktadır. T/M yöntemi ile üretilen elektrotlar, elektro erozyonla işlemede (EEİ) yüzey alaşımlama için kullanılabilir. Elektro erozyonla alaşımlama/kaplama (EEK) adı verilen bu yöntemde, elektrottan kopan malzeme ve dielektrik sıvısında bulunan karbon, işparçası yüzeyinde birikerek sert metal karbür tabakası oluşturur. Bu çalışmada, Cu-Cr, Cu-Mo ve Cu-B₄C toz metal (T/M) elektrot kullanımının elektro erozyonla işleme (EEİ) performans çıktılarından işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işlenmiş yüzeyin ortalama ve azami yüzey pürüzlülükleri (R_a ve R_z), işparçası yüzey katman kalınlıkları, mikrosertlik, korozyon direnci ve aşınma direnci üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı toz karıştırma oranları, sıkıştırma basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında elde edilen T/M elektrotlar SAE 1040 çeliğinin işlenmesinde kullanılmıştır. Analizler, elektrot malzemesinin işparçası yüzeyinde katman halinde alaşımlandığını ve karıştırma oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığının EEİ performans çıktılarını etkilediğini göstermiştir. Elde edilen bu katman sayesinde iş parçası yüzeyinin korozyon ve aşınma direncinin artırılabilirliği, EDS analizleri, korozyon ve aşınma testleri yardımıyla gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 914
Anahtar Kelimeler : EEİ, T/M Elektrot, Cu tozu, Cr tozu, Mo tozu, B₄C tozu, Karıştırma Oranı, Sıkıştırma Basıncı, Sinterleme Sıcaklığı
Sayfa Adedi : 181
Danışman : Prof. Dr. İbrahim USLAN

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING
PERFORMANCE OF COMPOSITE POWDER METAL ELECTRODES

(Ph.D. Thesis)

Orhan GÜLCAN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2016

ABSTRACT

The life, hardness, abrasive wear resistance and corrosion resistance of mold-tool set can be improved by alloying the surfaces of molds and tools. But, due to the high equipment costs and complex alloying processes make it necessary to investigate new surface alloying/modification methods. Electrodes produced by P/M technique can be used for surface alloying in electrical discharge machining (EDM). In this method, called electrical discharge alloying/coating (EDC), material from electrode and carbon in dielectric fluid accumulate on workpiece surface and form a hard metal carbide layer. In this study, the effect of use of Cu-Cr, Cu-Mo and Cu-B₄C powder metal (P/M) electrodes on EDM performance outputs, namely material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), mean and maximum roughness of machined surface (R_a and R_z), workpiece surface recast layer thickness, microhardness, corrosion resistance and abrasion wear resistance were investigated experimentally. The P/M electrodes produced at different mixing ratios, compacting pressures and sintering temperatures were used to machine SAE 1040 steel. The analyses performed have shown that the electrode material is deposited on to the work surface as a layer and the powder mixing ratio, the compaction pressure and sintering temperature affect the EDM performance outputs. With this recast layer, it was shown that, by the help of EDS analysis, corrosion and wear tests, it is possible to improve the corrosion and abrasive wear resistance of workpiece surface.

Science Code : 914
Key Words : EDM, P/M Electrode, Cu Powder, Cr Powder, Mo Powder, B₄C Powder, Mixing Ratio, Compacting Pressure, Sintering Temperature
Page Number : 181
Supervisor : Prof. Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım Prof. Dr. İbrahim USLAN'a, saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Can ÇOĞUN ve Doç. Dr. Yusuf USTA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma birçok kişinin yardımı olmadan başarılamazdı. Tozların sıkıştırılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, sinterleme sırasında yardımlarını esirgemeyen Mehmet SUBAŞI'ya, TUSAŞ'ta EDM tezgâhını kullanmam konusunda yardımcı olan Mustafa YAVUZ'a, deneylerin bütün aşamalarında yardımcı olan arkadaşım Görkem TÜRKÖZ'e, farklı konularda desteklerini esirgemeyen ve bu çalışmanın tamamlanmasında ciddi katkıları olan Senem Özge SEYFİ'ye, Zuhâl GÖKBULUT'a, Cansu TAŞKIRAN'a ve manevi desteklerinden dolayı Atlıhan ATALAY, Aydemir KÜÇÜK, Mustafa KOCAMAN ve Özlem IŞIKDOĞAN'a teşekkür ediyorum.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 113M183 kodlu ve “Kompozit Toz Metal Elektrotların Elektro Erozyon İle İşleme Performansının Deneysel İncelenmesi” adlı proje ile desteklenmiştir.

Bu çalışmayı, daima yanımda olan ve bütün zorluklara rağmen manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim H. Betül Alkan GÜLCAN'a, doktora çalışmalarından dolayı kendilerine yeterli zamanı ayıramadığım kızım Ayşe Zülâl'e ve oğlum Akif Kaan'a ithaf ediyorum. Onlar olmadan bu çalışma olmazdı...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME	27
3.1. Tanım	27
3.2. Tarihçe.....	30
3.3. Elektro Erozyon ile İşlemenin Fiziksel Prensibi	31
3.4. Elektro Erozyon ile İşlemede Temel Parametreler	32
3.4.1. Elektriksel parametreler	33
3.4.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri.....	35
3.4.3. Dielektrik sıvı parametreleri	35
3.4.4. Elektrot ve iş parçası malzemesi fiziksel özellikleri	40
3.5. Elektro Erozyon ile İşleme Sonucu Yüzeyde Oluşan Katmanlar	45
3.6. Elektro Erozyon ile İşlemede Performans Karakteristikleri	48
3.7. Elektro Erozyon ile İşlemenin Avantaj ve Dezavantajları	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMA PLANI	51
4.1. Kullanılan Metal Tozları	51

Sayfa

4.2. Toz Metal Elektrotların Üretimi.....	54
4.2.1. Metal tozlarının karıştırılması.....	54
4.2.2. Metal tozlarının sıkıştırılması	55
4.2.3. Metal tozlarının sinterlenmesi.....	57
4.2.4. Elektrotların yoğunluk ve gözenek miktarı ölçümleri.....	58
4.3. Elektro Erozyon Tezgâhı.....	60
4.4. İşleme Parametreleri.....	60
4.5. İş Parçası	61
4.6. Elektrotların Tezgâha Bağlanması	62
4.7. Ölçümlerin Alınması.....	64
5. DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA	71
5.1. Deneylerin Güvenilirliği	71
5.2. Toz Metal Elektrotların Yüzey Analizleri.....	73
5.2.1. Elektrotların aşınma direnci ölçümleri.....	73
5.2.2. Elektrot yüzeylerinin SEM analizleri.....	76
5.2.3. Elektrot yüzeylerinin EDS analizleri	83
5.3. Cr Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlarla Yapılan İşleme Sonuçları.....	86
5.3.1. Elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları	87
5.3.2. İİH sonuçları.....	88
5.3.3. EAH sonuçları	91
5.3.4. Bağlı aşınma (BA) sonuçları.....	98
5.3.5. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları	101
5.3.6. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)	106
5.3.7. EDS analizleri	109

	Sayfa
5.3.8. Mikrosertlik ölçümleri	110
5.3.9. Korozyon direnci ölçümleri	111
5.3.10. Aşınma direnci ölçümleri	117
5.4. Mo Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlarla Yapılan İşleme Sonuçları	120
5.4.1. Elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları	121
5.4.2. İİH sonuçları	122
5.4.3. EAH sonuçları	125
5.4.4. Bağlı aşınma (BA) sonuçları	129
5.4.5. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları	132
5.4.6. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)	137
5.4.7. EDS analizleri	139
5.4.8. Mikrosertlik ölçümleri	140
5.4.9. Korozyon direnci ölçümleri	141
5.4.10. Aşınma direnci ölçümleri	146
5.5. B ₄ C Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlarla Yapılan İşleme Sonuçları	149
5.5.1. İİH sonuçları	149
5.5.2. EAH sonuçları	151
5.5.3. Bağlı aşınma (BA) sonuçları	152
5.5.4. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları	153
5.5.5. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)	156
5.5.6. EDS analizleri	158
5.5.7. Mikrosertlik ölçümleri	159
5.5.8. Aşınma direnci ölçümleri	160
5.6. Toz Metal Elektrotların Karşılaştırması	161

Sayfa

6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	163
KAYNAKLAR	167
EKLER.....	175
EK-1. Cu tozu ölçüm sonuçları.....	176
EK-2. Cr tozu ölçüm sonuçları	177
EK-3. Mo tozu ölçüm sonuçları.....	178
EK-4. B ₄ C tozu ölçüm sonuçları.....	179
ÖZGEÇMİŞ	180

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney malzemelerine ait mekanik ve elektriksel özellikler	11
Çizelge 2.2. Deneysel sonuçlar	12
Çizelge 2.3. TiC-Cu elektrot kombinasyonları	18
Çizelge 2.4. TiC-Cu-W elektrot kombinasyonları	19
Çizelge 2.5. Elektrot kombinasyonları ve sinterleme sıcaklıkları	21
Çizelge 2.6. Literatür özeti.....	22
Çizelge 2.7. Deneylerde kullanılacak toz metal malzemelerin özellikleri.....	25
Çizelge 3.1. Farklı malzemelere göre kutuplama	34
Çizelge 3.2. Tipik elektrot malzemeleri ve karakteristikleri.....	40
Çizelge 4.1. Böhler K720 kimyasal kompozisyonu.....	55
Çizelge 4.2. Böhler K720 fiziksel özellikleri (20 °C’de).....	55
Çizelge 4.3. AISI 4340 çeliği kimyasal kompozisyonu.....	55
Çizelge 4.4. Elektrot yoğunluk ve gözenek miktarı ölçüm sonuçları	59
Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	61
Çizelge 4.6. İşparçası malzemesinin (SAE 1040) özellikleri	61
Çizelge 5.1. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları.....	71
Çizelge 5.2. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları.....	72
Çizelge 5.3. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları.....	72
Çizelge 5.4. Elektrotların aşınma direnci değerleri	73
Çizelge 5.5. Elektrot yüzeylerinde biriken malzeme miktarı	85
Çizelge 5.6. Cr tozu katkılı elektrotlarla yapılan deney değişkenleri	87
Çizelge 5.7. Cr tozu katkılı elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları.....	87
Çizelge 5.8. İİH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)	89

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.9. EAH değerleri (Cr katkılı elektrotlar).....	92
Çizelge 5.10. BA değerleri (Cr katkılı elektrotlar)	99
Çizelge 5.11. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Cr katkılı elektrotlar)	102
Çizelge 5.12. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (Cr katkılı elektrotlar)	110
Çizelge 5.13. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (Cr katkılı elektrotlar)	111
Çizelge 5.14. Korozyon direnci sonuçları (Cr katkılı elektrotlar)	112
Çizelge 5.15. Aşınma direnci değerleri (Cr katkılı elektrotlar)	118
Çizelge 5.16. Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan deney değişkenleri	121
Çizelge 5.17. Mo tozu katkılı elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları	121
Çizelge 5.18. İİH değerleri (Mo katkılı elektrotlar).....	122
Çizelge 5.19. EAH değerleri (Mo katkılı elektrotlar)	126
Çizelge 5.20. BA değerleri (Mo katkılı elektrotlar).....	130
Çizelge 5.21. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Mo katkılı elektrotlar)	133
Çizelge 5.22. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (Mo katkılı elektrotlar).....	140
Çizelge 5.23. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (Mo katkılı elektrotlar).....	141
Çizelge 5.24. Korozyon direnci sonuçları (Mo katkılı elektrotlar).....	142
Çizelge 5.25. Aşınma direnci değerleri (Mo katkılı elektrotlar).....	147
Çizelge 5.26. B ₄ C tozu katkılı elektrotlarla yapılan deney değişkenleri	149
Çizelge 5.27. İİH değerleri (B ₄ C katkılı elektrotlar).....	150
Çizelge 5.28. EAH değerleri (B ₄ C katkılı elektrotlar)	151
Çizelge 5.29. BA değerleri (B ₄ C katkılı elektrotlar).....	153
Çizelge 5.30. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (B ₄ C katkılı elektrotlar)	154
Çizelge 5.31. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (B ₄ C katkılı elektrotlar)	159
Çizelge 5.32. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (B ₄ C katkılı elektrotlar).....	159

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.33. Aşınma direnci değerleri (B ₄ C katkıli elektrotlar).....	160
Çizelge 5.34. T/M elektrotların karşılaştırılması	162

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrot tipi, İİH, EAO ve kutuplama arasındaki ilişki	6
Şekil 2.2. Elektrot malzemesinin göreceli aşınma ve işleme zamanına etkisi.....	9
Şekil 2.3. Yüzey pürüzlülüğü, elektrot hacim kaybı ve artık malzeme kalınlığı	10
Şekil 2.4. Boşalım akımı ile iş parçası işleme hızının değişimi	13
Şekil 2.5. Boşalım akımı ile elektrot aşınma oranının değişimi	14
Şekil 2.6. Boşalım akımı ile yüzey pürüzlülüğünün değişimi	14
Şekil 2.7. Sinterleme basıncı ile MAO ve EAO'nın değişimi	16
Şekil 2.8. Cu-TiC için EEİ performansı	18
Şekil 2.9. Cu-W-TiC için EEİ performansı	20
Şekil 3.1. Geleneksel bir elektro erozyon düzeneği.....	28
Şekil 3.2. Örnek bir elektro erozyonla işleme sistemi	32
Şekil 3.3. Plazma kanalı	32
Şekil 3.4. Elektrot kutuplama türleri: (a) pozitif kutuplama, (b) negatif kutuplama	34
Şekil 3.5. Elektrottan basarak püskürtme	37
Şekil 3.6. İş parçasından basarak püskürtme	37
Şekil 3.7. İş parçasından emme	37
Şekil 3.8. Elektrottan emerek püskürtme	38
Şekil 3.9. Kenardan püskürtme	38
Şekil 3.10. Titreşimli püskürtme	38
Şekil 3.11. Elektrot malzemelerinin ısı özelliklerine göre aşınma morfolojileri.....	42
Şekil 3.12. Elektro erozyonla işlenmiş parçada oluşan katmanlar.....	47
Şekil 4.1. Sinterleme döngüsü	57
Şekil 5.1. Cr katkılı elektrotlar için elektrot aşınma direnci sonuçları	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Mo katkılı elektrotlar için elektrot aşınma direnci sonuçları.....	74
Şekil 5.3. Farklı P_s 'lerde üretilen Cr katkılı elektrotların aşınma direnci değerleri.....	75
Şekil 5.4. Farklı P_s 'lerde üretilen Mo katkılı elektrotların aşınma direnci değerleri	75
Şekil 5.5. CuCr1 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	76
Şekil 5.6. CuCr2 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	76
Şekil 5.7. CuCr3 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	77
Şekil 5.8. CuCr4 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	77
Şekil 5.9. CuCr5 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	78
Şekil 5.10. CuCr6 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü.....	78
Şekil 5.11. CuCr7 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü.....	79
Şekil 5.12. E-Cu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	79
Şekil 5.13. CuMo1 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	80
Şekil 5.14. CuMo2 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	80
Şekil 5.15. CuMo3 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	81
Şekil 5.16. CuMo4 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	81
Şekil 5.17. CuMo5 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	82
Şekil 5.18. CuMo6 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	82
Şekil 5.19. CuMo7 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü	83
Şekil 5.20. CuCr1 nolu elektrot için yüzey EDS analizi.....	84
Şekil 5.21. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki elektrotlar için İİH sonuçları	90
Şekil 5.22. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri	90
Şekil 5.23. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri	91
Şekil 5.24. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları	93
Şekil 5.25. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri.....	94

Şekil	Sayfa
Şekil 5.26. CuCr7 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü	95
Şekil 5.27. CuCr7 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü	95
Şekil 5.28. CuCr7 elektrot yüzeyinin EDS analizi	96
Şekil 5.29. Farklı T _s ’lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri.....	97
Şekil 5.30. CuCr4 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü	97
Şekil 5.31. CuCr4 elektrot yüzeyinin EDS analizi	98
Şekil 5.32. Elektrolitik Cu ve farklı K _t ’lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları	99
Şekil 5.33. Farklı P _s ’lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri	100
Şekil 5.34. Farklı T _s ’lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri	100
Şekil 5.35. Elektrolitik Cu ve farklı K _t ’lerdeki T/M elektrotların R _a sonuçları.....	102
Şekil 5.36. Elektrolitik Cu ve farklı K _t ’lerdeki T/M elektrotların R _z sonuçları.....	103
Şekil 5.37. Farklı P _s ’lerde üretilen T/M elektrotların R _a değerleri	104
Şekil 5.38. Farklı P _s ’lerde üretilen T/M elektrotların R _z değerleri	104
Şekil 5.39. Farklı T _s ’lerde üretilen T/M elektrotların R _a değerleri	105
Şekil 5.40. Farklı T _s ’lerde üretilen T/M elektrotların R _z değerleri	105
Şekil 5.41. CuCr1 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü.....	107
Şekil 5.42. CuCr7 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü.....	108
Şekil 5.43. Elektrolitik Cu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü ...	108
Şekil 5.44. T/M Cu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü.....	109
Şekil 5.45. CuCr1 nolu elektrot için, iş parçası EDS analizi	110
Şekil 5.46. CuCr2 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	113
Şekil 5.47. CuCr4 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	113
Şekil 5.48. CuCr5 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	114
Şekil 5.49. CuCr7 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	114

Şekil	Sayfa
Şekil 5.50. CuCr1 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	115
Şekil 5.51. CuCr3 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	115
Şekil 5.52. CuCr6 elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü	116
Şekil 5.53. E-Cu elektrot ile işlenmiş işparçası için SEM yüzey görüntüsü.....	116
Şekil 5.54. Korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü.....	117
Şekil 5.55. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki elektrotlar için aşınma direnci	118
Şekil 5.56. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri.....	119
Şekil 5.57. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri	120
Şekil 5.58. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için İİH sonuçları	123
Şekil 5.59. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri	124
Şekil 5.60. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri	124
Şekil 5.61. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları	126
Şekil 5.62. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri.....	127
Şekil 5.63. CuMo7 elektrot yüzeyindeki ergimiş-katılaşmış katmanın görüntüsü.....	128
Şekil 5.64. CuMo7 elektrot yüzeyinde oluşan ergimiş-katılaşmış katmanın analizi.....	128
Şekil 5.65. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri.....	129
Şekil 5.66. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları	131
Şekil 5.67. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri	131
Şekil 5.68. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri	132
Şekil 5.69. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_a değerleri	133
Şekil 5.70. Elektrolitik Cu ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_z değerleri	134
Şekil 5.71. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri	135
Şekil 5.72. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri	135
Şekil 5.73. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri	136

Şekil	Sayfa
Şekil 5.74. Farklı T_s ’lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri	136
Şekil 5.75. CuMo5 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü	138
Şekil 5.76. CuMo6 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü	139
Şekil 5.77. CuMo1 nolu elektrot için, iş parçası EDS analizi.....	140
Şekil 5.78. CuMo1 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	143
Şekil 5.79. CuMo2 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	143
Şekil 5.80. CuMo3 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	144
Şekil 5.81. CuMo4 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	144
Şekil 5.82. CuMo5 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	145
Şekil 5.83. CuMo6 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	145
Şekil 5.84. CuMo7 nolu elektrot için işparçasının SEM yüzey görüntüsü.....	146
Şekil 5.85. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki elektrotlar için aşınma direnci	147
Şekil 5.86. Farklı P_s ’lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri.....	148
Şekil 5.87. Farklı T_s ’lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri	148
Şekil 5.88. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki T/M elektrotlar için İİH sonuçları	151
Şekil 5.89. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları	152
Şekil 5.90. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları	153
Şekil 5.91. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki T/M elektrotlar için R_a değerleri	155
Şekil 5.92. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki T/M elektrotlar için R_z değerleri	155
Şekil 5.93. CuB ₄ C1 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü	157
Şekil 5.94. CuB ₄ C2 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü	157
Şekil 5.95. CuB ₄ C3 nolu elektrot için işparçası yüzey katmanının SEM görüntüsü	158
Şekil 5.96. CuB ₄ C1 nolu elektrot için işparçası EDS analizi	159
Şekil 5.97. Elektrolitik Cu ve farklı K_t ’lerdeki elektrotlar için aşınma direnci	161

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Mastersizer/E lazerle toz tanecik boyutu ölçüm cihazı	51
Resim 4.2. JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu	52
Resim 4.3. Deneylerde kullanılan Cu tozu	52
Resim 4.4. Deneylerde kullanılan Cr tozu	53
Resim 4.5. Deneylerde kullanılan Mo tozu.....	53
Resim 4.6. Deneylerde kullanılan bor karbür (B_4C) tozu	54
Resim 4.7. Metal tozlarının karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı.....	54
Resim 4.8. İlk presleme sonucunda zımbası kırılan kalıp seti	56
Resim 4.9. Toz metal elektrotların basıldığı pres tezgahı.....	56
Resim 4.10. Toz metal elektrotların sinterlendiği fırın.....	57
Resim 4.11. Tez çalışmasında kullanılan EEİ tezgahı (Furkan EDM M100A).....	60
Resim 4.12. İş parçaları.....	62
Resim 4.13. Toz metal elektrot bağlama aparatı.....	62
Resim 4.14. Elektrotların yüzey paralelliğinin kontrolünde kullanılan high gage	63
Resim 4.15. Tezgaha bağlanmış elektrot, iş parçası ve bağlama aparatı	63
Resim 4.16. Elektrik iletkenlik ölçümünde kullanılan cihaz	65
Resim 4.17. Korozyon test cihazına yerleştirilmiş numuneler	67
Resim 4.18. Aşınma test cihazı.....	67
Resim 4.19. Frezede işlenen numuneler	68
Resim 4.20. Aşındırmada kullanılan numuneler.....	68
Resim 4.21. Test cihazına bağlanan numuneler.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
f_p	Vurum frekansı
I	Gerilim [V]
i_e	Boşalım akımı [A]
K_t	Toz karıştırma oranı
P_d	Dielektrik püskürtme basıncı [Pa]
P_e	Boşalım gücü [Watt]
P_s	Sıkıştırma basıncı [MPa]
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü [μm]
R_z	Azami yüzey pürüzlülüğü [μm]
T_s	Sinterleme sıcaklığı [$^{\circ}C$]
t_i	Vurum süresi [μs]
t_o	Vurum ara süresi [μs]
u_i	Açık devre gerilimi [V]
u_e	Boşalım gerilimi [V]
W_e	Vurum enerjisi [Joule]
Kısaltmalar	Açıklama
BA	Bağlı aşınma
EAH	Elektrot aşınma hızı [mm^3/dak]
EEİ	Elektro erozyonla işleme
EEK	Elektro erozyonla alaşımlama/kaplama
İİH	İşparçası işleme hızı [mm^3/dak]
T/M	Toz Metalürjisi

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle kalıp üretiminde sıkça kullanılan elektro erozyonla işleme yönteminde, farklı kutuplamada yüklenmiş elektrot ve kalıp, aralarındaki mesafe 5-10 μm olacak şekilde bir dielektrik sıvısının içerisine yerleştirilir. Yaklaşık 200V değerinde bir voltaj uygulanarak, iki parça arasında bir kıvılcım oluşturulur. Bu kıvılcım dielektrik ortamı bozar ve voltajın 25-30V'a düşmesini sağlar. Vurum süresi boyunca, elektronlar katottan anoda doğru akar. Bu elektronlar dielektrik ortamı iyonlaştırır ve katotla anot arasında bir plazma kanalı oluşmasını sağlar. Plazma kanalındaki şiddetli ısı, iş parçası ve elektrotun ergimesine ve hatta buharlaşmasına sebep olur. Ergimiş malzeme yüksek plazma basıncından dolayı eski yerinde sabit tutulur. Boşalım akımı kesilince dielektrik sıvısı erimiş malzemeyi metal yüzeyinden süpürür ve orada bir çukur oluşur. Bu şekilde devam edildiği müddetçe elektrotun şeklinin ayna görüntüsü iş parçası üzerinde oluşana kadar malzeme aşınması devam eder [1].

Elektro erozyonla işlemede amaçlanan, iş parçasından daha çok malzeme kaldırırken daha az elektrot aşınmasını elde etmektir. Elektro erozyonla işlemede elektrot malzemesi olarak genelde bakır ve grafit kullanılmaktadır. Bunun sebebi, bu iki malzemenin yüksek ergime sıcaklıkları ve mükemmel elektrik ve ısı iletkenlikleridir. Fakat bu iki malzemenin aşınma dirençlerinin az olması aşınma direncinin fazla olduğu farklı malzemelerin araştırılmasını gerektirmiştir [2, 3].

Elektro erozyonla işlemede işleme maliyetinin yaklaşık %50'sini elektrot üretimi oluşturmaktadır. Bu yüzden son yıllarda daha iyi iş parçası işleme hızı, daha az elektrot aşınma hızı ve daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için bakır harici farklı malzeme elektrotları kullanılmaktadır. Şu ana kadar bakır harici grafit, pirinç, krom, tungsten, çelik, titanyum gibi malzemeler elektrot üretiminde kullanılmıştır. Farklı malzemelerin yanında elektrot üretim hızını artırmak için farklı üretim yöntemleri araştırılmaktadır. Toz metalürjisi (T/M) yöntemi bunlardan birisidir. Geleneksel yöntemlerle üretilen karmaşık bir elektrot basit bir kare elektrottan yaklaşık 100 kat daha masraflıdır. Toz metalürjisinde ise sadece bir kalıp ve bir zımba ile onlarca elektrot hızlı bir şekilde üretilebilmektedir. Toz metalürjisi yöntemi ile elektrot üretimi, farklı tozların kombinasyonlarının mümkün olması ve üretilecek elektrotların ısı, elektriksel, mekanik ve mikro yapı özelliklerinin, sıkıştırma

basıncı ve sinterleme sıcaklığı ile kontrol edilmesiyle diğer üretim yöntemlerine göre daha avantajlı hale gelir [4, 5].

Bu tezin amacı, farklı metal tozlarının bakır tozları ile karıştırılmaları ile elde edilen elektrotların, elektro erozyonla işleme performansının araştırılmasıdır. Bu sayede iş parçasından daha iyi malzeme kaldıran ama aynı zamanda daha az aşınan ve daha iyi yüzey pürüzlülüğünün elde edileceği metal toz elektrotların bulunması amaçlanmıştır. Yine elektro erozyonla işleme neticesinde iş parçası yüzeyinde ana malzemedan daha sert bir tabakanın oluşabilirliği ve bu tabakanın ana malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilirliği incelenmiştir.

Bu amaçla, Cu-Cr, Cu-Mo ve Cu-B₄C toz metal (T/M) elektrot kullanımının elektro erozyonla işleme (EEİ) performans çıktılarından işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), işlenmiş yüzeyin ortalama ve azami yüzey pürüzlülükleri (Ra ve Rz) ve işparçası yüzey katman kalınlıklarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı toz karıştırma oranları, sıkıştırma basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında elde edilen T/M elektrotlar SAE 1040 çeliğinin işlenmesinde kullanılmıştır. İş parçası yüzeyinde oluşması muhtemel katman sayesinde iş parçası yüzeyinin korozyon ve aşınma direncinin arttırılabileceği, EDS analizleri, korozyon ve aşınma testleri yardımıyla gösterilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Ndaliman ve arkadaşları, titanyum alaşımı iş parçasının (Ti-6Al-4V) yüzey mikro sertliğini arttırmak için elektro erozyonla işlemede Cu-TaC toz metal elektrot kullanmışlardır. Dielektrik sıvısı olarak üre karıştırılmış suyun kullanıldığı işlemlerde, boşalım akımı ve vurum süresi değiştirilerek bunların mikro sertlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bakır ve tantal karbür tozları %50-%50 oranında karıştırılıp, 27,56 MPa basınçta 12 mm çapında sıkıştırılmıştır. Deneyler sonucunda yüzeydeki mikro sertliği en çok etkileyen parametrelerin üre konsantrasyonu ve boşalım akımı olduğu belirtilmiştir [6].

Das ve Misra, alüminyum iş parçasının TiC-Cu toz metal elektrotlarla elektro erozyonla işlenmesini inceledikleri çalışmalarında, boşalım akımı, vurum süresi, elektrot malzemelerinin karışım oranı ve elektrot basma basıncının etkilerini incelemişlerdir. İşleme sonrasında yüzeyde iş parçasından daha sert bir tabakanın oluştuğunu ve oluşan katmandaki Ti miktarının dış yüzeye doğru arttığını belirtmişlerdir. Karışım oranı olarak TiC'ü %50, %60 ve %70 olarak, basıncı ise 200, 300 ve 400 MPa olarak değiştirmişlerdir. Elektrottaki TiC oranı arttıkça, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve yüzeyde oluşan tabaka kalınlığı artmıştır. Basınç arttığında ise yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve yüzeyde oluşan tabaka kalınlığı azalmıştır [7].

Stambekova ve arkadaşları, 5083 alüminyum alaşımının elektro erozyonla işlenmesini inceledikleri çalışmalarında %75 Si- %25 Fe toz metal elektrot kullanmışlardır. Düşük boşalım akımları (10A ve 30A) ve kısa vurum sürelerinin (100 μ s ve 250 μ s) kullanıldığı deneylerde, iş parçası yüzeyinde ana metalden daha sert bir tabakanın oluştuğu ve bu tabakada iğne şeklinde silisyum parçacıkları, blok şeklinde silisyum parçacıkları ve nano boyutta $Al_{4.5}FeSi$ ve $Al_{13}Fe_4$ parçacıklarının olduğunu belirtmişlerdir [8].

Khan ve arkadaşları, ısıl iletkenlikleri farklı üç tane bakır tungsten elektrot kullanarak SUS 304 paslanmaz çeliğin elektro erozyonla işlenmesinde akımın ve ısıl iletkenliğin etkisini incelemişlerdir. Isıl iletkenliğin en çok iş parçası işleme hızı üzerinde etkili olduğunu ve ters orantılı olarak değiştiklerini belirtmişlerdir. Akım ile iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin orantılı olarak değiştiğini fakat belli bir

maksimum seviyeden sonra elektrot aşınma hızı ve akımın ters orantılı olarak değiştiğini belirtmişlerdir [9].

Patowari ve arkadaşları, tungsten ve bakır tozlarını hacimce %75-%25, %50-%50 ve %25-%75 oranlarında karıştırıp, 120, 180, 240 ve 300 MPa basınçlarda sıkıştırıp, 700 ve 900 °C’de sinterleyerek Ø12x6-8 mm boyutlarında elektrotlar elde etmiş ve bunları elektro erozyonla işlemede denemişlerdir. İşlenen malzeme tel elektro erozyonla işleme tezgâhında kesilip, yüzeyi cilalanıp %2 nital solüsyonunda 20 s asitle dağlanmış. Optik mikrometre yardımı ile 200 µm aralıklarla yüzeydeki tabaka kalınlığı ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. Leco M-400-H1 mikro sertlik cihazıyla yüzey sertliği ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları Taguchi analizinde kullanılmış, teorik ve deneysel verilerin uyum içinde olduğu görülmüştür [10].

Ndaliman ve Khan, bakır ve tantal karbürün %70-%30 ve %45-%55 gibi iki farklı oranda karıştırılmasıyla elde edilen tozları sırasıyla 1500 ve 3000 psi basınçta sıkıştırmış, yine sırasıyla 450 ve 850 °C’de sinterleyerek toz metal elektrot elde etmişlerdir. Preslemeden sonra elde edilen ham parçanın elektriksel ve ısı iletkenliği iyi olduğu için elektro erozyonla işlemeye uygun olduğu, fakat sinterlemeden sonra elektriksel iletkenliğini kaybettiği için elektro erozyonla işlemede kullanılamayacağını belirtmişlerdir [11].

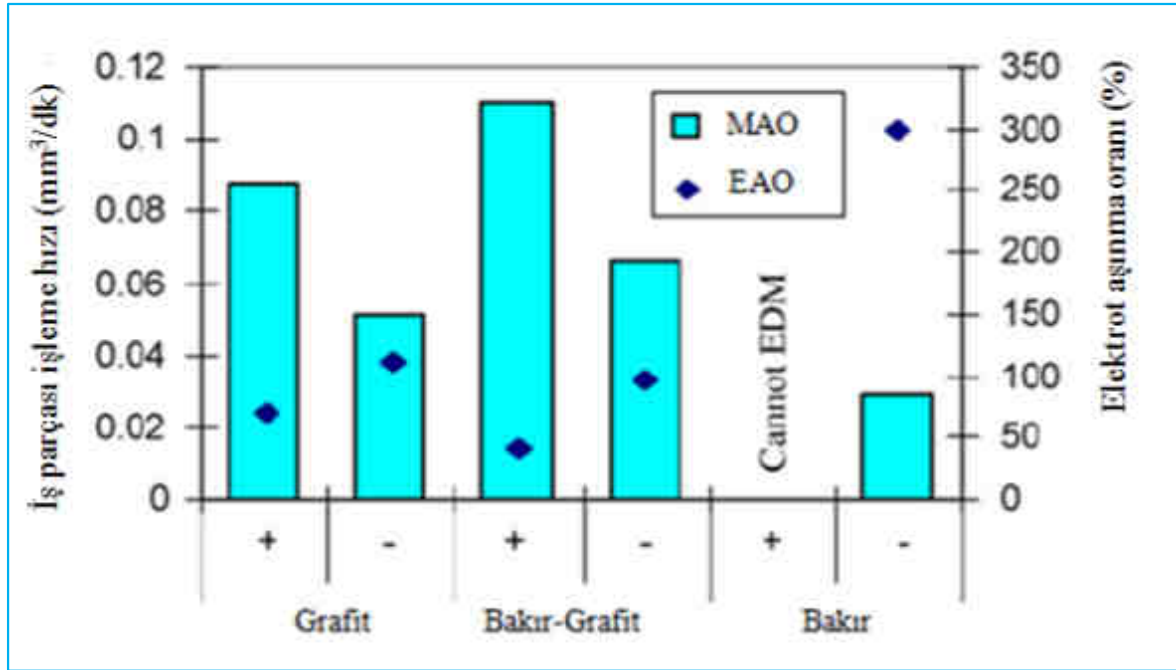
Patowari ve arkadaşları, hacimce %75 tungsten ve %25 bakır tozlarını 120, 180, 240 ve 300 MPa basınçlarda sıkıştırıp, 700 ve 900 C’de sinterleyerek elde ettikleri elektrotları elektro erozyonla işlemede denemişlerdir. 4, 8, 10 ve 12 A akım değerlerinin kullanıldığı deneylerde elektrot negatif yüklenmiştir. İşlenen malzeme tel elektro erozyonla işleme tezgâhında kesilip optik mikrometre yardımı ile 200 µm aralıklarla yüzeydeki tabaka kalınlığı ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. İş parçası işleme hızı ve yüzeydeki tabaka kalınlığının ölçüldüğü sonuçlar, yapay sinir ağı modeliyle karşılaştırılmış, teorik ve deneysel verilerin uyum içinde olduğu görülmüştür [12].

Rahman ve arkadaşları, vurum süresi, vurum ara süresi ve boşalım akımının Ti-6Al-4V’un elektro erozyonla işleme performansına etkilerini inceledikleri araştırmalarında, üçer farklı vurum süresi, vurum ara süresi ve boşalım akımı kullanmışlardır. 20x44 mm silindirik bakır tungsten elektrotların kullanıldığı deneylerde, iş parçası olarak 25x25x20 mm Ti-6Al-4V ve dielektrik sıvısı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Yapılan deney sonucunda

boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça iş parçası işleme hızını arttığı görülmüştür. Vurum ara süresinin ise iş parçası işleme hızı üzerinde etkili olduğu ama bunun lineer olmadığı belirtilmiştir [13].

Kumar ve arkadaşları, hacimce %75 bakır, %25 krom kullanarak elde ettikleri elektrotları elektro erozyonla işlemede denemişlerdir. Akım ve voltajın değişimiyle elektrot aşınma hızı, iş parçası işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğünün değişimini hastelloy çeliği kullanarak incelemişlerdir [14].

Muttamara ve arkadaşları, bakır, grafit ve bakır-grafit karışımı elektrotların elektro erozyonla işleme performansını araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde 3 mm çapında elektrotlar ve 3 mm işleme derinliği kullanmışlardır. Deney sonucunda elde ettikleri iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma oranı, elektrot tipi ve uygulanan kutuplama arasındaki ilişki Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Buna göre pozitif kutuplama kullanıldığı zaman iş parçası işleme hızı artmaktadır. En yüksek iş parçası işleme hızı ve en düşük elektrot aşınma hızı bakır-grafit toz karışımlı elektrotta görülmüştür. Bakır elektrotla en yüksek elektrot aşınma hızı elde edilmiştir. Elektrot aşınma hızı elektrot malzemesinin ergime noktasıyla alakalıdır. Yüksek ergime noktasına sahip elektrotlar düşük ergime noktasına sahip olanlardan daha az aşınırlar. Fakat elektrot aşınma hızı iş parçası işleme hızıyla ters orantılıdır. Çünkü daha düşük iş parçası işleme hızlarında, elektrotun malzemeyi işlemesi için daha fazla zaman geçmesi gerekmektedir [15].



Şekil 2.1. Elektrot tipi, İİH, EAO ve kutuplama arasındaki ilişki [15]

Tomadi ve arkadaşları, 8 mm çapında bakır tungsten elektrotlar kullanarak tungsten karbürün (%15 Co katkılı) elektro erozyonla işlemesine vurum süresi, vurum ara süresi, voltaj ve boşalım akımının etkisini incelemiştir. Buna göre voltaj, yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen faktördür. Daha sonra vurum ara süresi gelir. Boşalım akımı ve vurum süresinin yüzey pürüzlülüğünde çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Tungsten karbür işleminde iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için düşük vurum ara süresi, boşalım akımı ve voltajın kullanılması gerektiği belirtilmiştir. İş parçası işleme hızına en etkili olan faktör ise vurum süresidir. Daha sonra sırasıyla voltaj, boşalım akımı ve vurum ara süresi gelir. Tungsten karbür işleminde daha çok iş parçası işleme hızı istenirse yüksek boşalım akımı ve voltajı kullanılmalıdır. Elektrot aşınma hızı ise en etkili faktör vurum ara süresidir, daha sonra boşalım akımı gelir. Dolayısıyla daha düşük elektrot aşınma hızı elde edilmek istenirse, daha yüksek vurum ara süresi ve daha düşük boşalım akımı kullanılması gerekir [16].

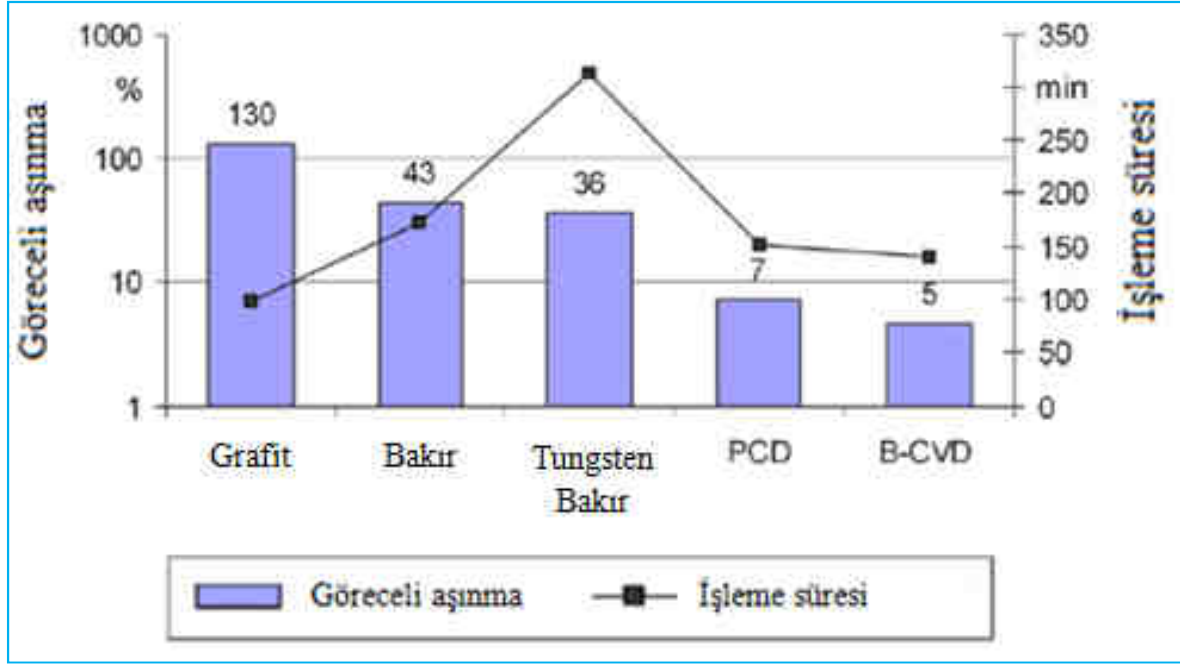
Jahan ve arkadaşları, 60mm×12.5mm×0.1mm tungsten karbür (WC) iş parçasının, 500µm çapında tungsten, bakır tungsten (%40 Cu - %60 W) ve gümüş tungsten (%20 Ag - %80 W) elektrotlarla elektro erozyonla işlenmesinde işleme performansına etki eden parametreleri incelemiştir. Dielektrik sıvısı olarak Total EDM 3'ün kullanıldığı deneylerde, gümüş tungstenin en iyi yüzey kalitesine yol açtığı görülmüştür. Diğer

elektrotlara göre nispeten yüksek iş parçası işleme hızına sahip olan AgW, düşük elektrot aşınmasına da sahiptir. Fakat CuW elektrotun iş parçası işleme hızı en yüksektir ve nispeten düşük elektrot aşınma hızı sahiptir. Boşalım akımı ve voltaj düştükçe daha iyi yüzeyler elde edilmektedir. Fakat iş parçası işleme hızı da azalır. Boşalım akımı ve voltajın haricinde elektrot malzemesinin ergime noktası, buharlaşma noktası, ısıl iletkenliği ve elektriksel iletkenliği elektro erozyonla işleme performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Eğer elektrotun iletkenliği iyi ise, düzgün ve verimli boşalımlara olanak sağlar. Bu durumda vurumun frekansı artar, frekans arttıkça da daha iyi yüzey kalitesi elde edilir. Voltaj arttıkça kıvılcım boşalım enerjisi artar ve bu, malzemenin ergime ve buharlaşmasına olanak sağlar. Bu sayede iş parçasından daha çok malzeme aşınır. İş parçası işleme hızı üzerinde özellikle elektriksel ve ısıl iletkenlik çok etkilidir. Elektriksel iletkenlik arttıkça kıvılcım oluşturma işlemi daha düzgün olur ve bu iş parçası işleme hızını artırır. Isıl iletkenlik arttıkça iş parçasının sıcaklığı ergime sıcaklığının üzerine çok kısa sürede çıkar. Bu da iş parçası işleme hızını artırır. AgW'nun elektriksel ve ısıl özellikleri diğer elektrot malzemelerine göre daha iyi olduğu için yüzey pürüzlülüğünün önemli olduğu işlemlerde tercih edilmektedir [17].

Chen ve arkadaşları, 10x10x20 mm düşük karbon çeliği malzemenin, tanecik büyüklüğü 45 μm 'den küçük olan bakır ve tungsten tozlarının 3:1 oranında 10 saat boyunca karıştırılması, ardından 770 MPa basınçta sıkıştırılması ve son olarak 600 $^{\circ}\text{C}$ 'de 20 dakika sinterlenmesi ile elde edilen $\text{Ø}8\text{x}4$ mm elektrotlarla elektro erozyonla işlenmesini incelemiştir. İşleme sırasında 3,5,10,16 A gibi farklı akım değerleri, 60, 70, 86 ve 100 V gibi farklı voltaj değerleri, 50, 100, 200 ve 400 μs gibi farklı vurum ara süreleri ve 300, 600 ve 900 s gibi farklı işleme süreleri kullanılmıştır. Elektrotun pozitif yüklendiği her bir deneyden sonra iş parçası ve elektrot ultrasonik banyoda 5 dk bırakılıp ardından kurutularak, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey birikme oranı ölçülmüştür. Mikro sertlik ve paslanmaya karşı direnç değerleri için Vickers mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Yüzeydeki kimyasal bileşim ise EPMA (electron probe microanalyzer) ile ölçülmüştür. Deneyler sonucunda 600 s gibi kısa bir sürede yüzeyde 180-210 μm kalınlıkta tabaka elde edilmiştir. Voltaj ve akım değerleri düşük tutulup vurum süresi uzun tutulduğunda daha kalın tabaka elde edilmiş olup, işleme yüzeyinde mikro sertliğin en yüksek, malzeme içine doğru gidildikçe sertliğin azaldığı görülmüştür. Paslanmaya karşı direnç değerinin yüzeydeki tungsten veya tungsten karbür miktarının artmasıyla arttığı görülmüştür [18].

Naveen ve arkadaşları, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen tungsten tozlarını %70 W, %30 Cu oranında karıştırarak 8 mm çapında silindirik elektrotlar elde etmiş ve bunların 55-58 HRC sertliğinde AISI D2 çeliğinin elektro erozyonla işleme performansına etkisini 18 deney yaparak incelemişlerdir. Dielektrik sıvısı olarak gaz yağının kullanıldığı bu deneyler sonucunda yazarlar CuW elektrotlar ile Cu elektrotların performansını karşılaştırmışlardır. Buna göre Cu elektrotların, CuW elektrotlara göre iş parçası işleme hızlarının daha fazla olduğu, diğer taraftan CuW elektrotların Cu elektrotlara göre daha iyi iş parçası yüzey pürüzlülüğüne yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. CuW elektrotların daha az iletken olması ve işleme sırasında yüzeyde malzeme birikimine sebep olması, Cu elektrotlara göre iş parçası işleme hızının daha az olmasının sebebi olarak gösterilmiştir. Yine işleme sırasında CuW elektrotların iş parçası yüzeyinde malzeme biriktirmesiyle yüzey çatlaklarının azalması ve bunun sonucunda daha pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesi, CuW elektrotların Cu elektrotlara göre daha iyi yüzey pürüzlülüğüne yol açmasının sebebi olarak gösterilmiştir [4].

Uhlmann ve Roehner, bakır, grafit, tungsten bakır, polikristal elmas ve bor katkılı elmas elektrotların elektro erozyonla işlemede aşınma oranlarını incelemişlerdir. İş parçası olarak 56NiCrMoV7'nin kullanıldığı deneyde 3 mm işleme derinliği elde edilene kadar işlem devam etmiştir. Tungsten bakır elektrotun yüzeyinde düzgün olmayan bir yapı görülmüştür. Bunun sebebi ise tungsten ve bakırın farklı ergime sıcaklıklarıdır. Bakırın daha yüksek ısı iletkenliğine nazaran tungstenin daha yüksek ergime sıcaklığı vardır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi grafitin göreceli aşınması en yüksektir [19].

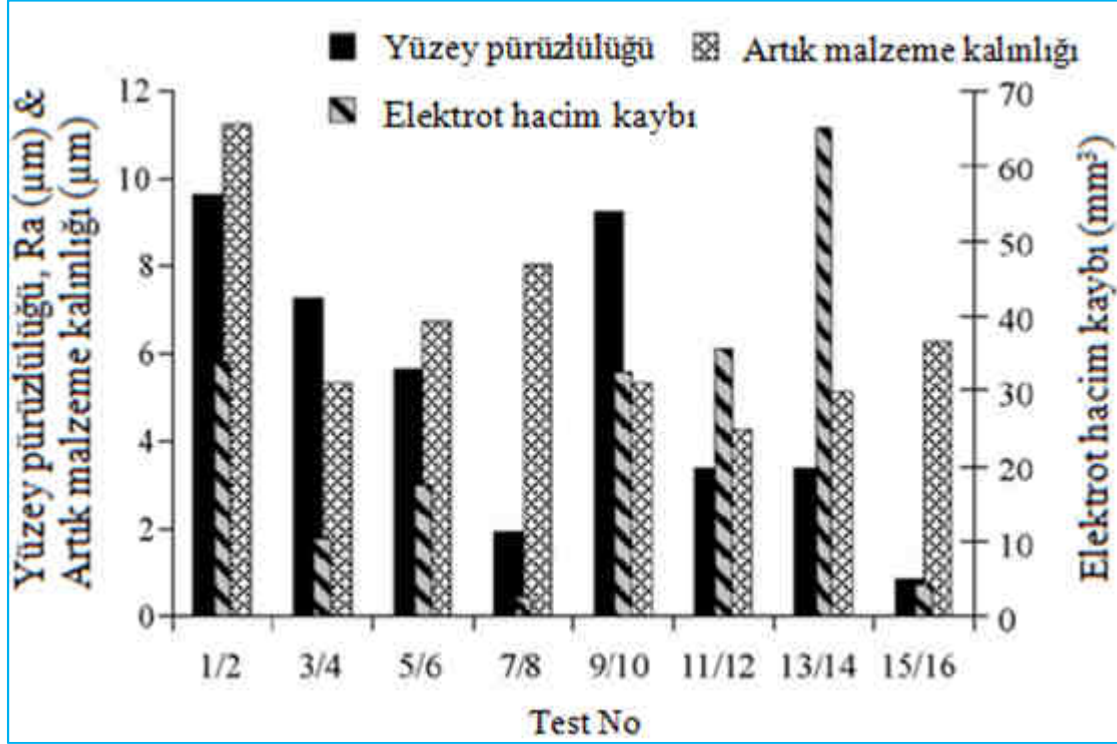


Şekil 2.2. Elektrot malzemesinin göreceli aşınma ve işleme zamanına etkisi [19]

Salman ve Kayacan, Assab79PM iş parçasının elektro erozyonla işlenmesinde işleme parametrelerinin etkisini inceledikleri çalışmalarında bakır, grafit ve bakır tungsten elektrotlar kullanmışlardır. Vurum süresi ve boşalım akımı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna ulaşılmıştır [20].

S. K. Ho ve arkadaşları, toz metalürjisiyle üretilen bakır tozlarının farklı basınçlarda sıkıştırılmaları ile elde edilen elektrotların elektro erozyonla işleme performansı ile katı bakır elektrotun performansını karşılaştırmışlardır. Dielektrik sıvısı olarak su kullanılan deneyde 15, 32 ve 200 MPa basınçlarda sıkıştırılan üç farklı elektrot ile katı bakır elektrot, elektrotun negatif ve pozitif yüklenmeleri durumuna göre incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, elektrot aşınması ve işlem parçası üzerinde oluşan artık malzeme kalınlığının incelenmesi sonucunda yazarlar, pozitif yüklü ve toz metalürjisi yöntemi ile üretilen elektrotlar ile yapılan işlemede daha fazla iş parçası yüzeyi artık malzeme kalınlığı olduğu, toz metalürjisiyle üretilen elektrotların daha fazla yüzey pürüzlülüğüne yol açtığı sonuçlarına ulaşmışlardır. Elektrotun katı bakır ve negatif olduğu deney hariç diğer bütün deneylerde iş parçası yüzey sertliği, iş parçasının kendi sertliğinden daha az çıkmıştır. Yapılan deneyler ve elde edilen bulgular Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Burada 1/2, 3/4, 5/6, 7/8 elektrotun pozitif olduğu deneyleri, 9/10, 11/12, 13/14, 15/16 ise elektrotun negatif

olduğu deneyleri göstermektedir. Deneylerde sırasıyla 15 MPa, 32 MPa ve 200 MPa basınçlarda sıkıştırılan toz elektrotlar ile katı bakır elektrot kullanılmıştır [21].



Şekil 2.3. Yüzey pürüzlülüğü, elektrot hacim kaybı ve artık malzeme kalınlığı [21]

Khanra ve arkadaşları, ZrB_2 tozlarını % 30, 40, 50, 60, 70 ve 80 oranlarında bakır tozları ile kuru bir şekilde karıştırmış, karışımın birbirine tutuşması için polivinil alkol eklemiş ve bu karışımı 250 MPa basınçta sıkıştırarak 6,6 mm çapında ve 5 mm kalınlığında elektrotlar üretmişlerdir. Bu elektrotların sırasıyla 500, 1250 ve 1000 C°'de sinterlenmesiyle elektrotlar son halini almış ve çelik plakanın elektro erozyonla işlenmesinde kullanılmıştır. Dielektrik sıvısı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Daha iyi iş parçası işleme hızı ve daha az elektrot aşınma hızı istendiği için, % 60 ZrB_2 ve % 40 Cu tozu karışımının en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Yine bu karışım ile oluşturulan elektrotların kullanılması ile bakır elektrotlara nazaran daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir [2].

Dhar ve arkadaşları, %10 silisyum karbür katkılı Al-4Cu-6Si alaşımının 30 mm çapında pirinç (%62 bakır, %37 çinko, %1 saf olmayan malzemeler) elektrot ile işleme performansını incelemişlerdir. Gaz yağının dielektrik sıvısı olarak kullanıldığı deneyde elektrot negatif kutuplamada, iş parçası pozitif kutuplamada yüklenmiştir. Buna göre akım arttıkça iş parçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızı artmaktadır, akım süresi arttıkça iş

parçası işleme hızı artmaktadır. Elektrot ile iş parçası arasındaki voltajın çok fazla olmasa da iş parçası işleme hızı ve elektrot aşınma hızı üzerinde etkisi olduğu ifade edilmiştir [22].

Kumar ve arkadaşları, TiCN-20Ni, TiCN-20Ni-10WC, TiCN-20Ni-10NbC ve TiCN-20Ni-10TaC malzemelerini elektrot olarak kullanarak elektro erozyonla işleme performanslarını incelemişlerdir. Burada gösterilen rakamlar yüzde içeriği ifade etmektedir. Buna göre her bir malzemede %20 nikel bulunmaktadır ve bunun amacı diğer tozların birbirine bağlanmasını sağlamaktır. Bu malzemeler oluşturulurken 100 MPa'da soğuk sıkıştırılmış, ardından bir saat boyunca 1510 °C'de basınçsız bir şekilde sinterlenerek 15 mm çapında elektrotlar elde edilmiştir. Elektro erozyon tezgahında kullanmadan önce bütün malzemeler 1,0 µm yüzey pürüzlülüğüne zımparalanmış, aseton banyosunda temizlenmiş ve son olarak kurutulmuştur. Gaz yağının dielektrik sıvısı olarak kullanıldığı deneylerde elektrot anot, iş parçası (yüksek hız çeliği) katot olarak ayarlanmıştır. Çizelge 2.1'de malzemelere ait veriler, Çizelge 2.2'de ise deney sonuçları gösterilmiştir. En yüksek iş parçası işleme hızı TiCN-20Ni'de görülmüştür. Bunun sebebi, bu malzemenin düşük elektriksel direncidir. TiCN-20Ni elektrotu düşük elektrot aşınma hızına sahiptir. Bunun sebebi ise bu malzemenin yüksek kırılma sertliğidir. Genel olarak bakıldığında TiCN-20Ni-10TaC elektrotu, düşük yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınma hızı ve orta iş parçası işleme hızı ile bu dört elektrot içinde en idealidir [23].

Çizelge 2.1. Deney malzemelerine ait mekanik ve elektriksel özellikler [23]

Malzeme Adı	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik, HV ₃₀ (GPa)	Kırılma Sertliği, K _{IC} (MPa m ^{1/2})	Elektriksel Direnç (10 ⁻⁵ Ωm)
TiCN-20Ni	5,33	9,9 ± 0,5	18,3 ± 0,9	43
TiCN-20Ni-10WC	5,87	11,8 ± 0,6	17,3 ± 0,9	158
TiCN-20Ni-10NbC	5,52	10,9 ± 0,5	13,4 ± 0,7	163
TiCN-20Ni-10TaC	5,48	12,5 ± 0,6	16,1 ± 0,8	74

Çizelge 2.2. Deneysel sonuçlar [23]

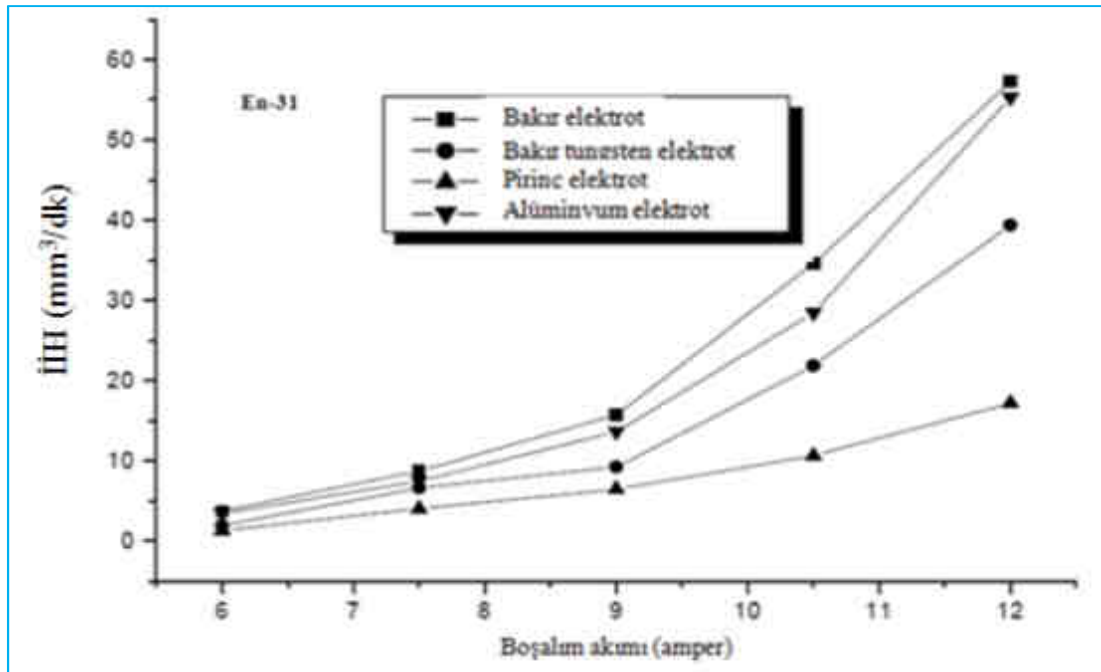
Malzeme Adı	İİH (mm ³ /dk)	EAO (%)	Yüzey pürüzlülüğü, R _a (μm)
TiCN-20Ni	7,65	2,7	5,22
TiCN-20Ni-10WC	5,69	2,8	4,52
TiCN-20Ni-10NbC	6,56	3,0	5,08
TiCN-20Ni-10TaC	6,30	2,6	4,28

Marafona, yaptığı çalışmada 50x50x25 mm yüksek karbon çeliği (BS 4695 D2) iş parçası ve 25x25x75 mm tungsten bakır elektrot kullanmıştır. Deney sonucunda iş parçası üzerinde siyah bir tabaka oluşmuştur. Bu tabakanın siyah renkte olması elektro erozyonla işlemede dielektrik sıvısından yüzeye geçen karbon atomları yüzündendir. Detaylı inceleme sonucunda tabakanın içerisinde sadece karbon atomları değil, aynı zamanda demir, krom, vanadyum ve molibdenin de bulunduğu gösterilmiştir. Yüzeydeki tabakada karbon miktarı arttıkça elektrot aşınma hızının arttığı görülmüştür [24].

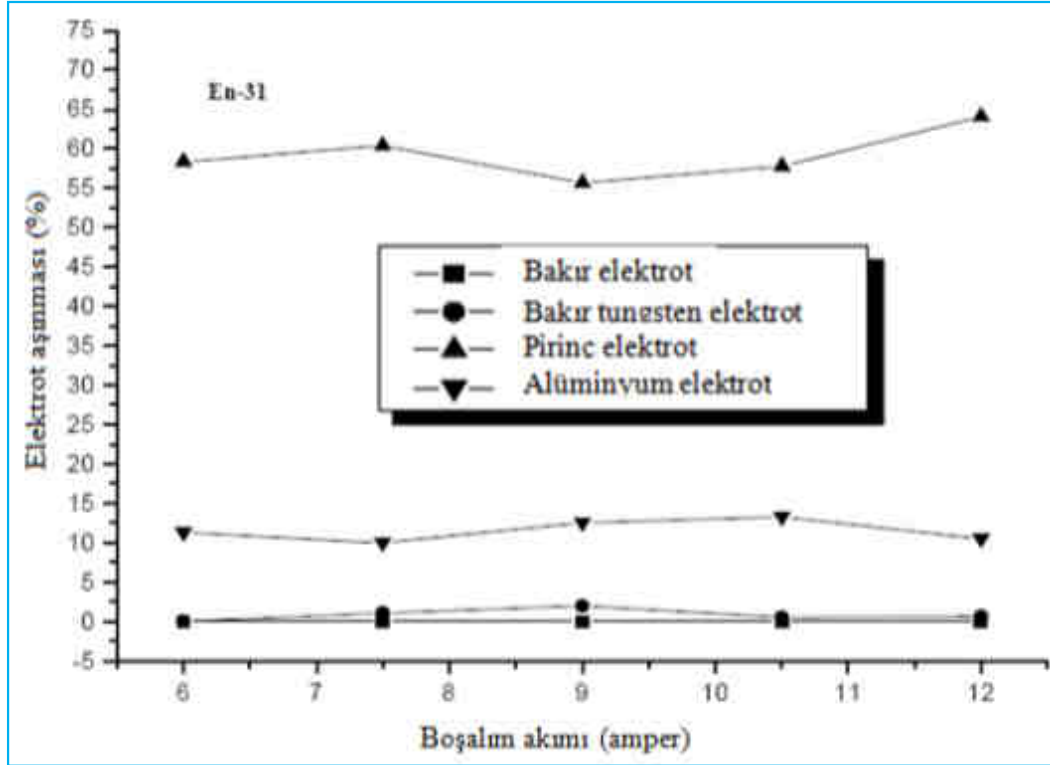
Bai ve Koo, Ni esaslı Haynes 230 iş parçasının Al-Mo toz metal elektrotlarla işlenmesini inceledikleri çalışmalarında %85 Al (15μm çapında) ve %15 Mo (10-15μm çapında) tozlarını silindirik bir karıştırıcıda 10 saat karıştırmış, ardından 50 dakika boyunca 80 MPa basınçta ve 250 °C’de 12 mm çapında toz metal elektrot haline getirmişlerdir. Boşalım akımının 10 A, vurum süresinin 600 μs, duty faktörünün 0.33 olduğu deneyde, elektrot negatif ve pozitif olarak iki farklı şekilde yüklenmiş, dielektrik sıvısı olarak ise gaz yağı ve damıtılmış su kullanılmıştır. Deney sonucunda dielektrik sıvısı olarak gaz yağının kullanılmasının ve elektrot kutuplamasının pozitif olmasının daha iyi performansa yol açtığı ve toz metal elektrot kullanımının iş parçası yüzeyinde tabaka oluşumuna sebep olduğu görülmüştür [25, 26].

Lee ve arkadaşları, AISI 1045 karbon çeliğinin bakır tungsten elektrotlarla işlenmesinde vurum süresi ve boşalım akımının etkisini incelemiştir. Buna göre boşalım akımı arttıkça iş parçası işleme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve işleme genişliği artmaktadır. Vurum süresi çok arttığında ise elektrik plazma kanalının genişlemesi neticesinde iş parçası işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü düşmektedir [27].

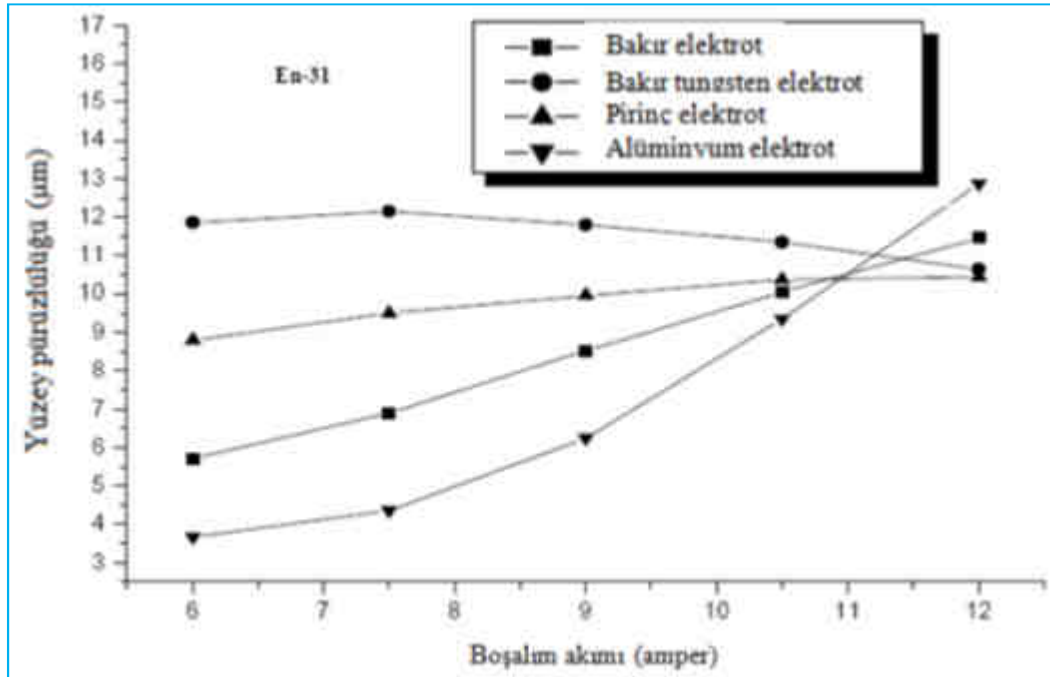
Singh ve arkadaşları, bakır, bakır tungsten, pirinç ve alüminyum elektrotların elektro erozyonla işleme performanslarını incelemişlerdir. Elektrot çapı olarak 16 mm'nin seçildiği deneylerde, dielektrik sıvısı olarak ticari EDM yağı, iş parçası olarak da En-31 takım çeliği kullanılmıştır. Elektrot pozitif, iş parçası negatif polaritede çalıştırılmıştır. Şekil 2.4, 2.5 ve 2.6'da sırasıyla uygulanan akım ile iş parçası işleme hızının, elektrot aşınma hızının ve yüzey pürüzlülüğünün değişimi gösterilmiştir. Buna göre akım arttıkça en fazla iş parçası işleme hızı artışı bakır ve alüminyum elektrotlarda gözlemlenmiştir. Uygulanan akım arttıkça, artan kıvılcım boşalım enerjisi sayesinde malzeme ergimesi ve buharlaşması da artmıştır. Düşük boşalım akımları ve yüksek frekanslarda iş parçası işleme hızı azalmıştır. Elektrot aşınma hızları incelendiğinde bakır ve bakır tungstenin en az aşındığı görülmüştür. Bunun sebebi ergime noktasının yüksek olmasıdır. Elektrot pozitif kutuplamada seçildiği için, elektronlar elektrot yüzeyine çarparak bu yüzeyde yüksek bir enerjiyi serbest bırakmış, dolayısıyla ergime noktası düşük olan elektrotlar daha hızlı aşınmıştır. Yüksek boşalım akımlarında bakır tungsten elektrotların daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu, yüksek boşalım akımlarında bakır ve alüminyum elektrotların kötü bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebi bakır ve alüminyum elektrotların yüksek iş parçası işleme hızlarına sahip olması ve bundan dolayı iş parçası yüzeyinde daha derin ve geniş çukurlara yol açmasıdır [28].



Şekil 2.4. Boşalım akımı ile iş parçası işleme hızının değişimi [28]



Şekil 2.5. Boşalım akımı ile elektrot aşınma oranının değişimi [28]

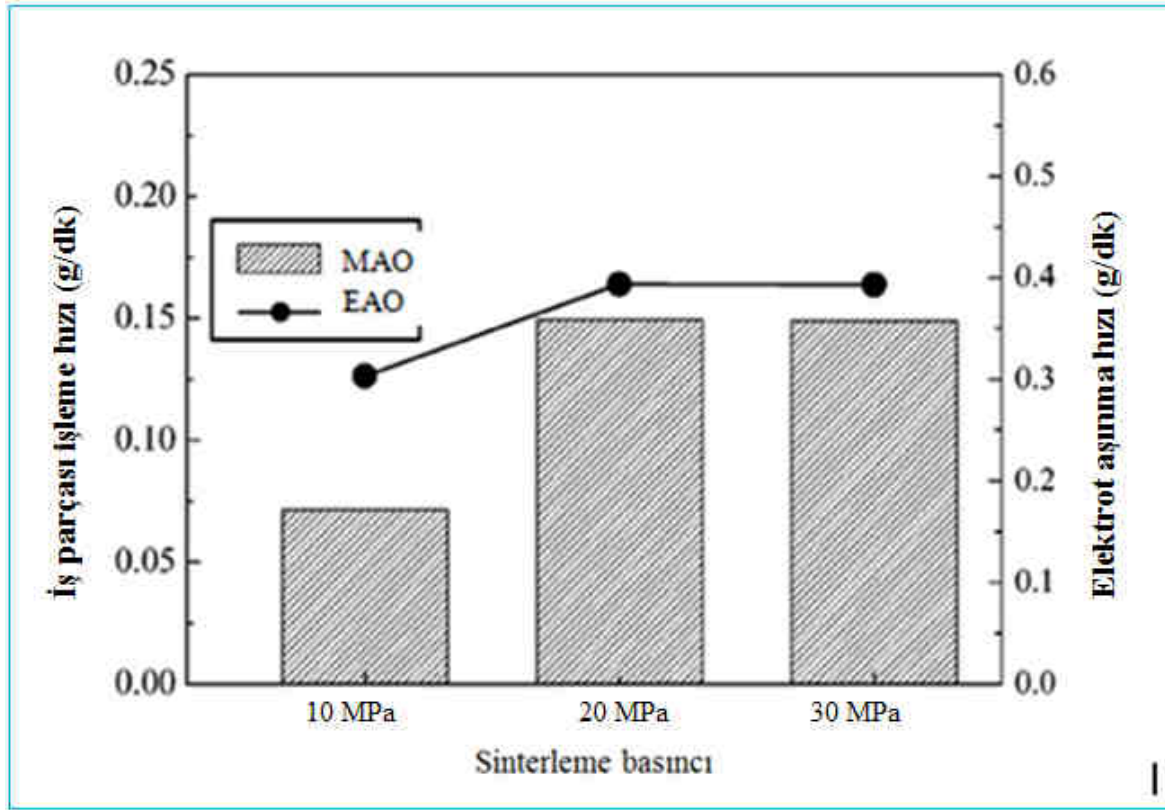


Şekil 2.6. Boşalım akımı ile yüzey pürüzlülüğünün değişimi [28]

Simao ve arkadaşları, tungsten karbür ile kobalt tozlarının karışımı sonucu elde ettikleri elektrotların elektro erozyonla işleme performansını incelemiştirlerdir. 6 mm çapında üretilen

elektrotlarda kobalt oranı %6 olarak seçilmiştir. Dielektrik sıvısı olarak hidrokarbon yağı kullanılmıştır. Deney sonucunda iş parçasının yüzeyinde 30 µm çapında düzgün bir tabakanın oluştuğu ve bu tabaka sayesinde hem iş parçasının yüzey sertliğinin arttığı hem de düşük bir yüzey pürüzlülüğü değeri elde edildiği ifade edilmiştir [29].

Tsai ve arkadaşları, Cr tozları ile Cu tozlarının karışımından elde edilen elektrotların EDM performansını incelemişlerdir. İş parçası olarak AISI 1045 karbon çeliğinin kullanıldığı deneylerde, dielektrik sıvısı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Buna göre saf bakır tozlarının sıkıştırılması ile elde edilen elektrotların, krom bakır toz karışımı ile elde edilen elektrotlara nazaran daha iyi iş parçası işleme hızına yol açtığı görülmüştür. Negatif kutuplamada işlem yapıldığı zaman daha kötü bir yüzey elde edildiği, bunun sebebinin işleme sırasında elektrottan kopup malzeme yüzeyine yapışan bakır ve krom tozları olduğu belirtilmiştir. Katı metal elektrotla yapılan deneyle karşılaştırıldığında, toz metal elektrotların daha iyi iş parçası işleme hızına yol açtığı ve malzeme yüzeyinde oluşan artık malzeme kalınlığının ise daha az olduğu görülmüştür. İşleme sırasında krom tozlarının elektrottan kopup iş parçası yüzeyine yapıştığı ve kromun yüksek oksidasyon direncinden dolayı, toz metal elektrotlarla yapılan elektro erozyon işleminde, iş parçasının oksidasyona daha dirençli hale geldiği görülmüştür. Şekil 2.7’de deneylerde kullanılan farklı sinterleme basınçları ile elde edilen elektrotların iş parçası işleme hızları ve elektrot aşınma hızları karşılaştırılmıştır. Buna göre tozların 10 MPa basınçta sıkıştırılmasıyla elde edilen elektrot daha az iş parçası işleme hızına yol açmaktadır. Bunun sebebi, tozların arasındaki düşük bağlanma kuvvetidir [3].



Şekil 2.7. Sinterleme basıncı ile MAO ve EAO'nun değişimi [3]

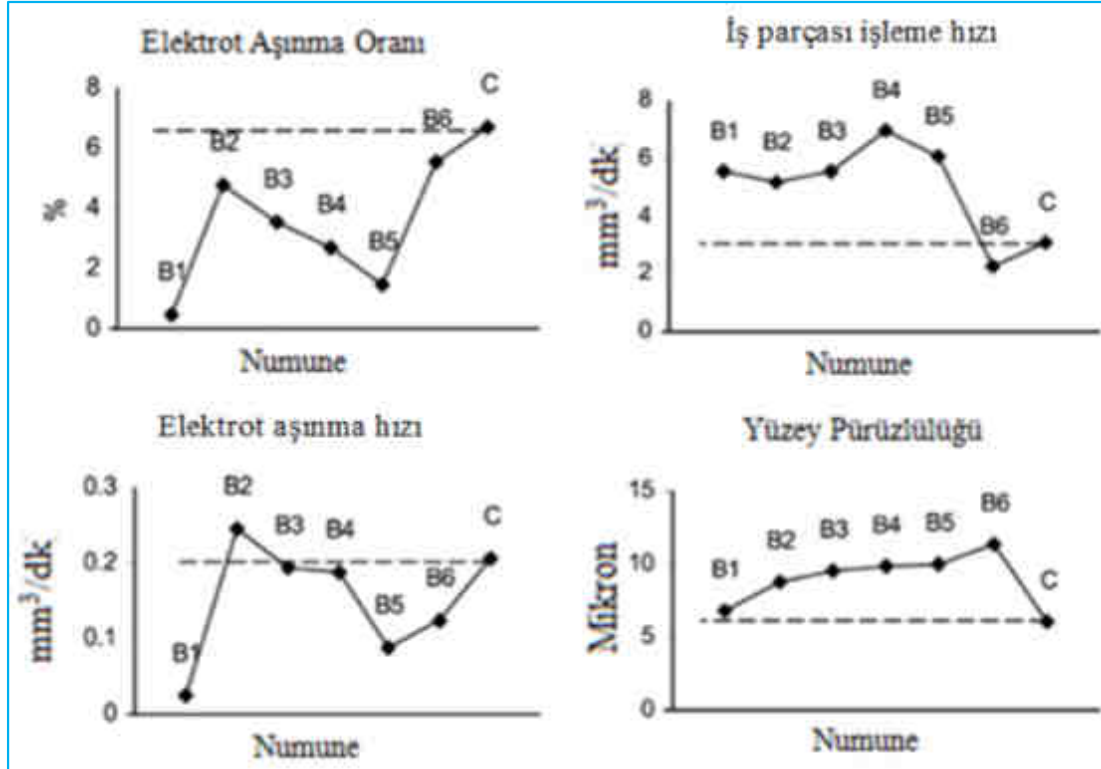
Lee ve Li, elektro erozyonla işlemeye etki eden faktörleri inceledikleri çalışmalarında %75 tungsten ve %25 bakırdan oluşan CuW elektrotlar kullanarak tungsten karbürü işlemişlerdir. Elektrot ölçüleri 15x15 mm ve kullanılan dielektrik sıvısı ise Total EDM 22'dir. Yapılan çalışmalar sonucunda yüksek boşalım akımı ve / veya uzun vurum sürelerinde daha kötü yüzey elde edildiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça yüzeyde işlenen bölge kalınlığı ve mikro çatlakların uzunlukları ve sayıları artmaktadır [30].

Simao ve arkadaşları, AISI D2 iş çeliğinin TiC/WC/Co ve WC/Co toz metal elektrotlarıyla işlenmesini inceledikleri çalışmalarında, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığı arttıkça malzemenin elektriksel, ısı, mekanik ve mikro yapısal özelliklerinin değiştiğini ve bu sayede daha iyi performans elde edildiğini göstermişlerdir. Elektrotun mekanik gerilimi çok önemlidir çünkü yetersiz mekanik gerilime sahip bir elektrot işleme esnasında kırılabilir. Eğer tozların sıkıştırma basıncı düşük olursa kıvılcımlama sırasında birbirlerine sıkı bir şekilde bağlanmayan tozlar, birbirlerinden ayrılır ve elektrot ile kalıp arasındaki boşluğu kirletir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça tozlar arasındaki bağlanma ve dolayısıyla da

aşınma direnci artar. Araştırma sonucuna göre toz metal elektrottan ayrılan Ti ve W tozları iş parçası yüzeyinde bir katman oluşturmaktadır. Eğer elektrot pozitif değil de negatif kutuplamada yüklenirse iş parçası yüzeyinde daha fazla Ti ve W oluştuğu görülmüştür [31].

Lee ve Li, grafit, bakır ve bakır tungsten elektrotların kullanılmasıyla tungsten karbürün elektro erozyonla işlemesine etki eden faktörleri incelemişlerdir. Dielektrik sıvısı olarak Total EDM 22 kullanılmıştır. Buna göre, bütün elektrot malzemeleri için boşalım akımı arttıkça iş parçası işleme hızı artmıştır. En yüksek iş parçası işleme hızı grafit elektrot ile elde edilmiştir, daha sonra bakır tungsten ve bakır gelmektedir. Boşalım akımının düşük değerleri için, grafit elektrotların aşınma oranı boşalım akımı ile düşmüş, bakır elektrotların aşınım oranı ise boşalım akımı ile artmıştır. Yüksek boşalım akımlarında, bakır elektrotlar en yüksek aşınma oranına sahiptir. Boşalım akımının bütün değerleri için bakır tungsten elektrot en düşük aşınma oranına sahiptir. Bütün elektrot malzemeleri için yüzey pürüzlülüğü boşalım akımının artması ile artmaktadır. En iyi yüzey pürüzlülüğü bakır elektrot ile elde edilmiştir, daha sonra sırasıyla bakır tungsten ve grafit gelmektedir. Elektrot anot, iş parçası katot olarak kullanıldığında daha yüksek iş parçası işleme hızı, daha düşük elektrot aşınma hızı ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Yüksek boşalım akımlarında negatif veya pozitif kutuplama aşınma oranı üzerinde etkili değildir. Voltaj arttıkça iş parçası işleme hızı düşmekte, aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğü ve aşınma oranı artmaktadır. Vurum ara süresi arttıkça iş parçası işleme hızı düşmektedir [32].

Li ve arkadaşları, bakır tozları ile TiC tozlarını farklı oranlarda karıştırarak elde ettikleri elektrotların elektro erozyonla işleme performansını işlemişlerdir. Kullanılan altı farklı elektrot ve içerikleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Tozlar bir saat boyunca 30 devir/dakika hızda karıştırılmış, daha sonra 35 MPa basınçta 19 mm çapında kalıplarda sıkıştırılmış ve elde edilen elektrotlar 1300 °C'de bir saat sinterlenmiştir. Nihai elektrotları elde etmek için bu parçalar 11x11 boyutlarında kesilmiş ve 270-310 Brinell sertliğinde kalıp çeliğinin işlenmesinde kullanılmıştır. Elektro erozyonla işleme performansları Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Buna göre %25 TiC katkılı elektrotun en iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Burada elektro erozyonla işleme performansını asıl etkileyen etmen, sinterlenmiş elektrotların içinde bulunan mikro boşluklardır [33].



Şekil 2.8. Cu-TiC için EEİ performansı [33]

Çizelge 2.3. TiC-Cu elektrot kombinasyonları [33]

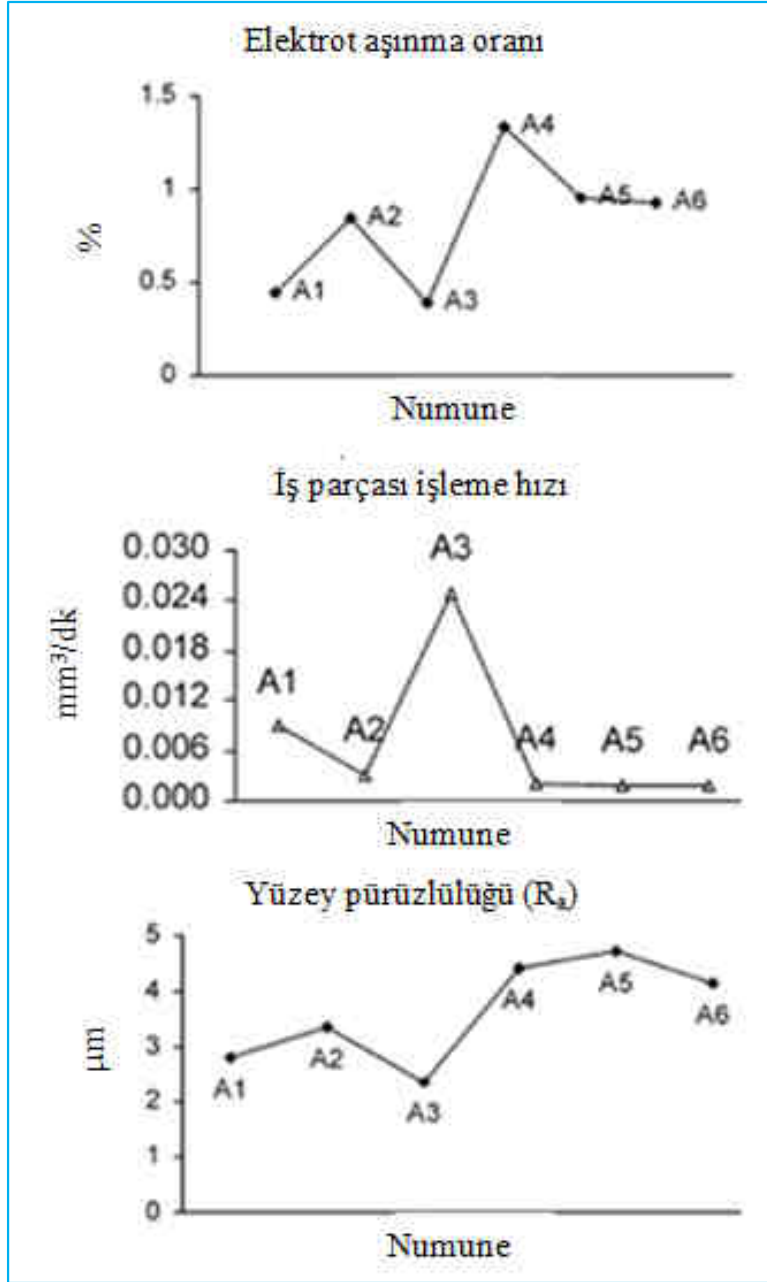
Elektrot Numarası	B1	B2	B3	B4	B5	B6
TiC (%)	5	12	15	25	35	45
Bakır(%)	95	88	85	75	65	55

Li ve arkadaşları, bakır, tungsten ve titanyum karbür tozlarının farklı oranlarda karışımlarından elde edilen elektrotların elektro erozyonla işleme performanslarını incelemişlerdir. Bakır ve tungsten birbiri içinde çözünmediği ve bundan dolayı sinterleme sonrasında elektrot içinde mikro boşluklar oluştuğu için bu boşlukları doldurması için nikel kullanılmıştır. Kullanılan karışım oranları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir. Tozlar V şeklinde karıştırıcıda bir saat boyunca 35 devir/dakika hızda karıştırılmış, daha sonra 10 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde elektrotlar oluşturmak için soğuk sıkıştırılmıştır. Daha sonra bir saat boyunca 1250 °C'de sinterlenmiştir. Elde edilen iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Buna göre TiC eklenen malzemelerin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca %15 TiC

eklenen elektrotların daha yüksek iş parçası işleme hızına, daha düşük elektrot aşınma hızına ve daha düşük yüzey pürüzlülüğüne yol açtığı görülmüştür [34].

Çizelge 2.4. TiC-Cu-W elektrot kombinasyonları [34]

Elektrot numarası	Ni (%)	TiC-Cu-W (%)	Cu (%)	TiC-W (%)	TiC (%)	W (%)
A1	3,5	96,5				
			25	75		
					5	95
A2	3,5	96,5				
			25	75		
					10	90
A3	3,5	96,5				
			25	75		
					15	85
A4	3,5	96,5				
			25	75		
					20	80
A5	3,5	96,5				
			25	75		
					30	70
A6	3,5	96,5				
			25	75		
					40	60
C			25			75



Şekil 2.9. Cu-W-TiC için EEİ performansı [34]

Marafona ve Wykes, D2 kalıp çeliğinin %75-%25 oranında tungsten bakır elektrotlarla, elektro erozyonla işlenmesinde işlem parametrelerinin etkisini inceledikleri çalışmalarında boşalım akımı ve vurum süresi arttıkça iş parçası işleme hızının arttığını, ama aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün de arttığını, vurum süresi arttıkça elektrot aşınma hızının azalacağını, boşalım akımı arttıkça ise elektrot aşınma hızının (özellikle yüksek vurum süresi değerlerinde) artacağını belirtmişlerdir [35].

Zaw ve arkadaşları, ZrB_2 ve $TiSi$ tozları ile Cu tozlarını farklı oranlarda karıştırarak elde ettikleri elektrotların elektro erozyonla işleme performanslarını incelemişlerdir. Tozlar V şeklinde karıştırıcılarda bir saat boyunca 30 devir/dakika hızda karıştırılmış, sonra 350 bar basınçta 25 mm disklerde soğuk sıkıştırılmıştır. Kullanılan elektrotlar, kompozisyonları ve sinterleme sıcaklıkları Çizelge 2.5'te gösterilmiştir. Düşük sinterleme sıcaklığından dolayı ZrB_2 ve Cu arasında düşük bir bağlanma vardır. Bundan dolayı bu karışım ısıl gerilimlere dayanamaz, dolayısıyla kıvılcım aşınması daha meydana gelmeden ısıl gerilimler bağlanma direncini ortadan kaldırır. $TiSi$ ve Cu karışımından elde edilen elektrotlar ise elektrot erozyon ile işlemede kullanılmaya uygun değildir. Bunun sebebi, malzeme yüzeyinde hasara sebep olan yüksek elektrot aşınma hızıdır [36].

Çizelge 2.5. Elektrot kombinasyonları ve sinterleme sıcaklıkları [36]

Elektrot numarası	Kompozisyon	Sinterleme Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
1	$Cu + \%x ZrB_2$ $x = 5, 15, 25, 35$	1070
2	$Cu + \%x ZrB_2$ $x = 5, 10, 15, 20, 25$	1300
3	$Cu + \%x Ti + \%0.36x Si$ $x = 5, 10, 15, 20$	1200

Samuel ve Philip, bu konuda temel sayılan makalelerinde bakır tozlarından farklı sıkıştırma basınçlarında ve sinterleme sıcaklıklarında elde edilen toz metal elektrotların elektro erozyonla işleme performanslarını incelemişlerdir. Buna göre toz metal elektrotlar ile daha çok iş parçası işleme hızı elde edilebilmektedir. Sinterleme sıcaklığı ve sıkıştırma oranı değiştirilerek istenen yüzey kalitesi ve işleme performansı elde edilebilmiştir. Belli işleme koşullarında toz metal elektrotların malzeme kaldırmadan ziyade malzeme biriktirmeye yol açtığı görülmüştür [5].

Çizelge 2.6. Literatür özeti

Kaynak	Kullanılan toz malzemeler	K _t (%)	P _s (MPa)	T _s (°C)
Ndaliman ve arkadaşları	TaC-Cu	50-50	27.56	?
Das ve Misra	TiC-Cu	50-50, 60-40, 70-30	200, 300, 400	?
Stambekova ve arkadaşları	Si-Fe	75-25	?	?
Khan ve arkadaşları	W-Cu	?	?	?
Patowari ve arkadaşları	W-Cu	0-100, 25-75, 50-50, 75-25	120, 180, 240, 300	700, 900
Ndaliman ve Khan	TaC-Cu	30-70, 55-45	10, 20	450, 850
Rahman ve arkadaşları	W-Cu	?	?	?
Kumar ve arkadaşları	Cr-Cu	25-75	?	?
Muttamara ve arkadaşları	Grafit-Cu	?	?	?
Tomadi ve arkadaşları	W-Cu	75-25	?	?
Jahan ve arkadaşları	W, W-Cu, W-Ag	100, 60-40, 80-20	?	?
Chen ve arkadaşları	W-Cu	25-75	770	600
Naveen ve arkadaşları	W-Cu	70-30	?	?
Uhlmann ve Roehner	W-Cu	?	?	?
Salman ve Kayacan	W-Cu	?	?	?
S. K. Ho ve arkadaşları	Cu	100	15, 32, 200	?
Khanra ve arkadaşları	ZrB ₂ -Cu	80-20, 70-30, 60-40, 50-50, 40-60, 30-70	250	1250
Dhar ve arkadaşları	Zn-Cu	62-37	?	?
Kumar ve arkadaşları	Ti-Ni, Ti-WC-Ni, Ti-NbC-Ni, Ti-TaC-Ni	80-20, 70-10-20, 70-10-20, 70-10-20,	100	1510
Marafona	W-Cu	75-25	?	?
Bai ve Koo	Al-Mo	85-15	80	250
Lee ve arkadaşları	W-Cu	75-25	?	?
Singh ve arkadaşları	W-Cu	?	?	?

Çizelge 2.6. (Devam) Literatür özeti

Kaynak	Kullanılan toz malzemeler	K_t (%)	P_s (MPa)	T_s (°C)
Simao ve arkadaşları	WC-Co	94-6	?	?
Tsai ve arkadaşları	Cr-Cu	0-100, 20-80, 43-57	?	200
Lee ve Li	W-Cu	75-25	?	?
Simao ve arkadaşları	TiC-WC-Co, WC-Co	?	?	?
Lee ve Li	W-Cu	75-25	?	?
Li ve arkadaşları	Cu-W-TiC	25-75 (95-5, 90-10, 85-15, 80-20, 70-30, 40-70)	?	1250
Li ve arkadaşları	Cu-W-TiC	25-75 (95-5, 90-10, 85-15, 80-20, 70-30, 40-70)	?	1250
Marafona ve Wykes	W-Cu	75-25	?	?
Zaw ve arkadaşları	Cu (X)- ZrB ₂ , Cu (X)-TiSi	1a: X= 5-15-25-35 1b: X= 5-10-15-20-25 2: X= 5-10-15-20	35	1a: 1070, 1b: 1300, 2: 1200
Samuel ve Philip	Cu	100	62-625	950

Literatürde yapılan çalışmalar Çizelge 2.6’da özetlenmiştir. Çizelge 2.6.’daki literatür özeti incelendiğinde, yüksek ergime sıcaklığı ve sertliğinden dolayı, şu ana kadar kompozit toz metal elektrot olarak daha çok tungsten-bakır kullanıldığı görülecektir. Bu tez kapsamında, üç farklı toz metal malzeme bakır tozu ile karıştırılarak kompozit toz metal elektrotlar elde edilmiştir. Karıştırma oranları (K_t), sıkıştırma basınçları (P_s) ve sinterleme sıcaklıkları (T_s) ayarlanarak iş parçasından daha çok malzeme kaldıran ama az aşınan ve daha az yüzey pürüzlülüğüne yol açan elektrotlar bulunmaya çalışılmıştır.

Bakır (Cu) diğer tüm malzemeler içinde gümüşten sonra elektriği en iyi ileten malzemedir. Isıl iletkenliği de diğer birçok metale göre çok yüksektir. Bundan dolayı kompozit toz metal elektrot üretiminde ana karışım elemanı olarak bakır tozu kullanılmıştır.

Krom (Cr) tozu literatürde 3 ve 14 numaralı referanslarda kullanılmıştır. Bu referanslarda Cr tozu farklı K_t değerlerinde Cu tozu ile karıştırılarak ve farklı basınçlarında sinterlenerek üretilmiş, ancak P_s ve T_s ’nin elektrot performansına etkileri incelenmemiştir. K_t kadar bu iki parametrenin de elektrotların elektriksel, mekanik ve mikro yapı özelliklerinin iyileştirilmelerinde ve dolayısıyla daha yüksek İİH ve daha düşük EAH ve R_a değerlerinin elde edilmesinde etkili olacağı öngörülmektedir. Yine literatürdeki birçok çalışmada R_a

değeri incelenmişken, R_z değeri birkaç çalışma dışında incelenmemiştir. EEİ'de parlak bir yüzey elde etmek için yüzeyde oluşan işleme kraterlerinin (çukurların) genişliği ve derinliği az olmalıdır (küçük R_z değeri). Derin çukurların oluşumu, yüzeyin mat bir görünümde olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla R_z değeri de R_a kadar işleme performansını anlamada ve üstün yüzey kalitesi elde etmede önemli bir performans çıktısıdır [17].

EEİ'de düşük EAH elde edebilmek için elektrot malzemesinin ısı iletkenliği, ergime sıcaklığı, elektrik iletkenliği ve kıvılcım direnci önemli parametrelerdendir. Mo, yüksek kıvılcım direncine ve ergime sıcaklığına sahiptir. Mo tozu literatürde 25 ve 26 numaralı referanslarda Al tozu ile birlikte kullanılmıştır, fakat Cu tozu ile birlikte hiç kullanılmamıştır. Yine Mo-Al T/M elektrot kullanımının işparçası yüzeyinin oksitlenme direncine etkisi literatürde incelenmişken, farklı K_t , P_s ve T_s değerlerinde üretilen Mo katkılı T/M elektrotların EEİ performansına ($\dot{I}H$, EAH, R_a , R_z vs.) etkileri araştırılmamıştır. Bu parametrelerin elektrotların elektriksel, mekanik ve mikro yapı özelliklerinin iyileştirilmelerinde ve dolayısıyla daha yüksek $\dot{I}H$ ve daha düşük EAH ve R_a , R_z değerlerinin elde edilmesinde etkili olacağı öngörülmektedir.

Bor karbür (B_4C) düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen çok sert ve ergime sıcaklığı yüksek bir malzemedir. Kimyasal maddelere karşı da yüksek bir dirence sahip olan bor karbür dünya rezervleri açısından en çok ülkemizde bulunmaktadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı deneylerde bor karbür tozunun kullanılmasına karar verilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan metal tozları ve özellikleri Çizelge 2.7.'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.7. Deneylerde kullanılacak toz metal malzemelerin özellikleri

	Cu	Mo	Cr	B ₄ C
Yoğunluk (g/cm ³)	8,96	10,22	7,19	2,50
Ergime Sıcaklığı (°C)	1083,2	2617	1860	2450
Elektriksel Direnç (ohm-cm)	0,0000017	0,0000057	0,0000130	10
Isıl İletkenlik (W/m.K)	398	138	69,1	30-90
Brinell Sertliği	89	225	125	-
Vickers Sertliği	100	230	131	32
Elastisite Modülü (GPa)	110	330	186	450

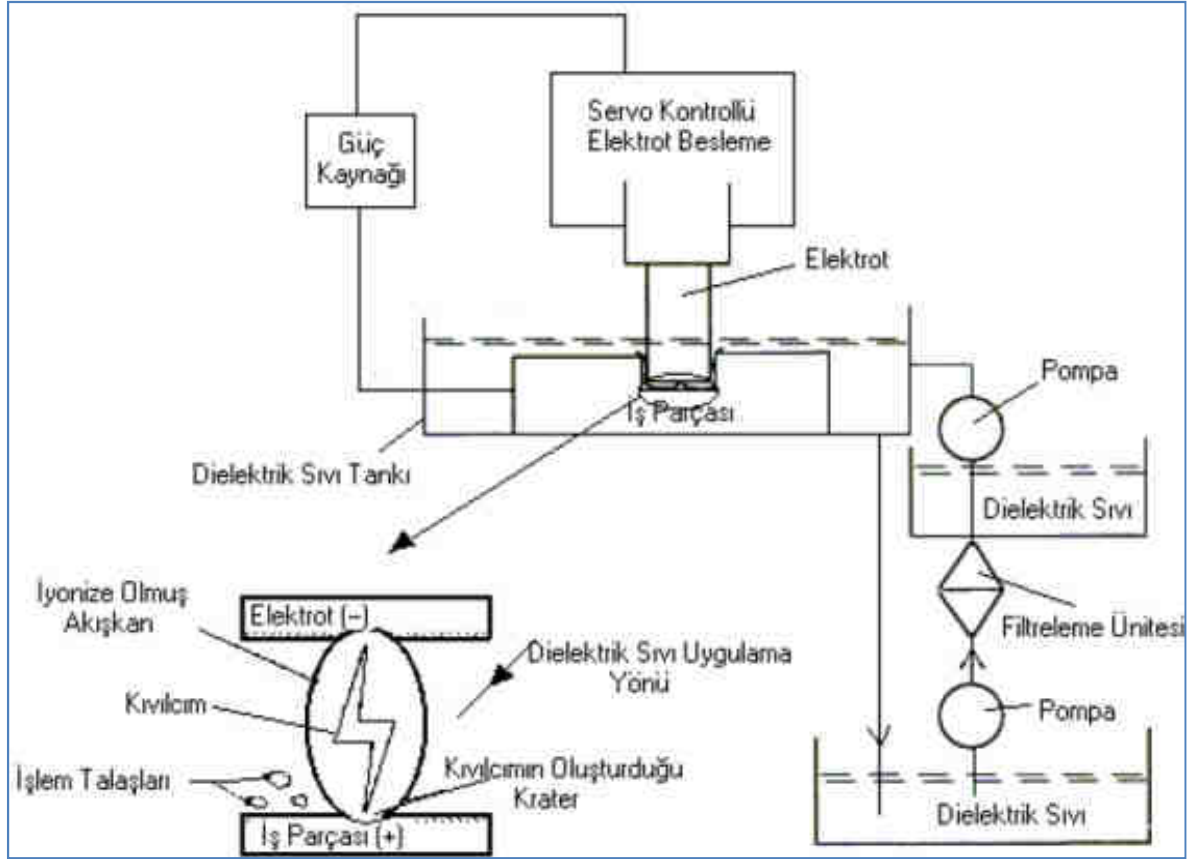
3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

3.1. Tanım

Elektro erozyonla işleme bir elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen kıvılcımla iş parçası üzerinden malzeme aşındırma işlemidir. Elektrot şeklinin ayna görüntüsü malzeme üzerinde oluşur. EEİ bir makine elemanı ve güç ünitesinden oluşur. Makine elemanı elektrotu tutar. Elektrot ile iş parçası arasında devamlı meydana gelen kıvılcımların elektrik enerjisi ısı enerjisiye dönüştürülür ve bu ısı enerjisi iş parçası üzerinden malzeme aşındırılmasını sağlar. Isıl enerji iş parçası ile elektrot arasında bir plazma kanalı oluşturur, bunun sıcaklığı 8000 ile 12000 °C arasında değişir ve 20000 °C'ye kadar çıkabilir. Güç ünitesi kapatılınca, plazma kanalı çöker ve sıcaklıkta ani bir düşme meydana gelir. Bu durumda dielektrik sıvısı iş parçası üzerindeki erimiş malzemeyi mikroskobik kırıntılar şeklinde iş parçasından uzaklaştırır [28].

Elektro erozyonla işleme, alışılmamış imal usulleri arasında sanayide en çok kullanılan yöntemdir denilebilir. Bu teknolojiye amaç elektriksel iletken iki parçayı (elektrot ve iş parçası) aralarında bir çalışma aralığı bırakacak şekilde sabitleyip, dielektrik sıvı adı verilen bir sıvıya daldırıp, servo kontrollü besleme mekanizması sayesinde elektrotun iş parçasına doğru hareket ettirilerek, elektrot şeklinin ayna görüntüsünün iş parçası üzerinde oluşturulmasıdır [37, 38]. Elektriksel boşalım neticesinde açığa çıkan yüksek miktarda ısı, elektrot ve iş parçası yüzeyinin sıcaklığının artmasına sebep olur. Bu yüzeylerin soğutulmasını ve işleme sırasında meydana gelen atıkların çalışma aralığından uzaklaştırılmasını dielektrik sıvı sağlar [39].

Şekil 3.1'den de görülebileceği gibi klasik bir elektro erozyon tezgahı şu kısımlardan oluşur; güç kaynağı, servo kontrollü elektrot besleme düzeneği, vurum jeneratörü, dielektrik sıvı tankı, filtresi ve pompası, iş parçasının oturduğu tabla, iş parçasının tablaya oturtulmasında kullanılan düzene, elektrotun bağlanmasında kullanılan düzene ve kontrol paneli [40, 41].



Şekil 3.1. Geleneksel bir elektro erozyon düzeneği [41]

Elektro erozyonla işlemede, bir dielektrik sıvısı içerisindeki kalıp ve elektrot arasındaki arda ardına verilen kıvılcımlar sayesinde elektrik enerjisi ısı enerjisiye dönüştürülür. Bu ısı enerjisi iş parçasından malzeme kaldırmaya yarayan yüksek sıcaklıkta bir plazma oluşmasında kullanılır. Elektrot ile kalıp arasında direk bir temas olmadığı için işleme sırasında mekanik gerilimler ve titreşim problemi oluşmaz [4].

Elektro erozyonla işlemede elektrot ve iş parçası farklı yüklerde yüklendiğinde aralarında bir elektriksel alan oluşur. Bu elektriksel alandan dolayı pozitif iyonlar ve elektronlar hızlanır ve iletken bir boşalım kanalı oluşturur. Tam bu anda kıvılcım sıçrar ve bu, iyonların ve elektronların çarpışmasına sebep olur ve bu sayede de bir plazma kanalı oluşur. Boşalım kanalının elektriksel direncindeki ani bir düşme akım yoğunluğunun çok yüksek değerlere ulaşmasını sağlar ve bu sayede iyonlaşma artar ve güçlü bir manyetik alan oluşur. İyonlar ve elektronlar çarpıştığı sırada plazma kanalının etrafında bir baloncuk oluşur ve bu baloncuk sürekli büyür. Akım kapatıldığı anda plazma kanalı çöker ve baloncukun iç basıncı ani bir şekilde düşer. Bu aşamada dielektrik sıvısının basıncı baloncukun iç basıncından büyük olduğu için, baloncuk içine doğru patlar. Bu patlama

neticesinde, yüzeyde eriyen metaller dielektrik sıvısı tarafından süpürülür ve aniden soğuyan erimiş metaller küçük baloncuklar halinde soğur [20, 42].

Elektro erozyonla işlemede iş parçasının aşınma oranı her zaman elektrotun aşınma oranından daha büyüktür. Bunun sebebi elektrottan ayrılan elektronların, iş parçasından ayrılan iyonlara göre daha küçük kütleli olması ve bunun neticesinde daha hızlı hareket etmeleridir. Bu sayede iş parçasına çarpan hızlı elektronlar, iş parçası yüzeyinden daha fazla malzeme kaldırılmasına sebep olur [43].

Elektro erozyonla işlemede malzeme aşındırmada asıl faktör iş parçasının ergime ve buharlaşmasıdır. Ergime ve buharlaşma sonucunda iş parçası yüzeyinde küçük çukurlar oluşur. Bu çukurlar yüzeyin yüzey pürüzlülüğünü ölçmede kullanılır ve akım, frekans, polarite ve elektrot malzemesine bağlıdır. Yüksek frekans ve düşük akım kullanılarak iyi yüzey kalitesi elde edildiği deneylerde gözlemlenmiştir. Yüksek akım derin ve geniş çukurlara sebep olmaktadır [28].

Geleneksel yöntemlere göre elektro erozyonla işlemede iş parçası işleme hızı düşüktür ve şu faktörlere bağlıdır: her bir boşalım sırasındaki akım miktarı, boşalım frekansı, elektrot malzemesi, iş parçası malzemesi ve dielektrik sıvısının özelliği. Elektrot aşınma hızı iş parçası işleme hızına göre düşüktür [28].

Elektro erozyonla işleme yöntemiyle her ne kadar çok farklı sertliklerde metal ve metal alaşımlarının işlenmesi, polikristal elmas takımlara şekil verilmesi, mikro boşlukların ve üç boyutlu mikro çatlakların işlenmesi mümkünse de, bu yöntem ile işlemenin bazı kısıtları vardır. Bunlar; yüksek enerji tüketimi, işleme başlamadan önceki hazırlık süresinin uzunluğu ve düşük verimliliğidir. Dolayısıyla son yıllarda elektro erozyonla işlemede verimliliği arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır [44].

Bu amaç için son yıllarda özellikle toz metal elektrotların kullanılması üzerine ciddi araştırmalar yapılmaktadır. Ama aşınma ve paslanma, toz metalürjisiyle üretilen parçalarda en sık karşılaşılan sorunlardır. T/M parçalarda paslanma direnci düşüktür. Bunun en büyük sebebi sıkıştırma basıncı ne kadar fazla olursa olsun, mikro seviyede tozlar arasında bulunan birbirine bağlı mikro boşluklardır. Bu mikro boşluklar yüzünden, yüzeydeki çatlaklarda paslanmalar oluşur. T/M parçalarının paslanma dirençlerini arttırmak için farklı

yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. Bitmiş parçaların üzerini nikelle kaplama bu yöntemlerden birisidir [45].

Verimliliği artırmanın bir diğer yöntemi elektrot aşınmasını azaltmaktır. İyi elektriksel ve ısı iletkenliğe sahip, aynı zamanda ergime noktası yüksek olan malzemeler elektrot aşınmasını azaltmak için her zaman tercih edilmektedir. Bundan dolayı TiB_2 , TiC , TiN , SiC gibi elektrik iletken seramikler ve Si_3N_4-TiN , Si_3N_4-TiCN , ZrO_2-TiN , $Al_2O_3-SiC_w-TiC$ gibi seramik kompozitler elektro erozyonla işlemede kullanılmaktadır [23].

Elektro erozyonla işlemede birçok parametre işlem performansını etkilemektedir. İş parçasının sertliği bunlardan birisidir. Marafona ve Araujo yaptıkları deneylerde sertliğin işlem performansına etkisini göstermişlerdir [46]. Aşınma oranı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Moro ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Buna göre aşınma oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır [47].

3.2. Tarihçe

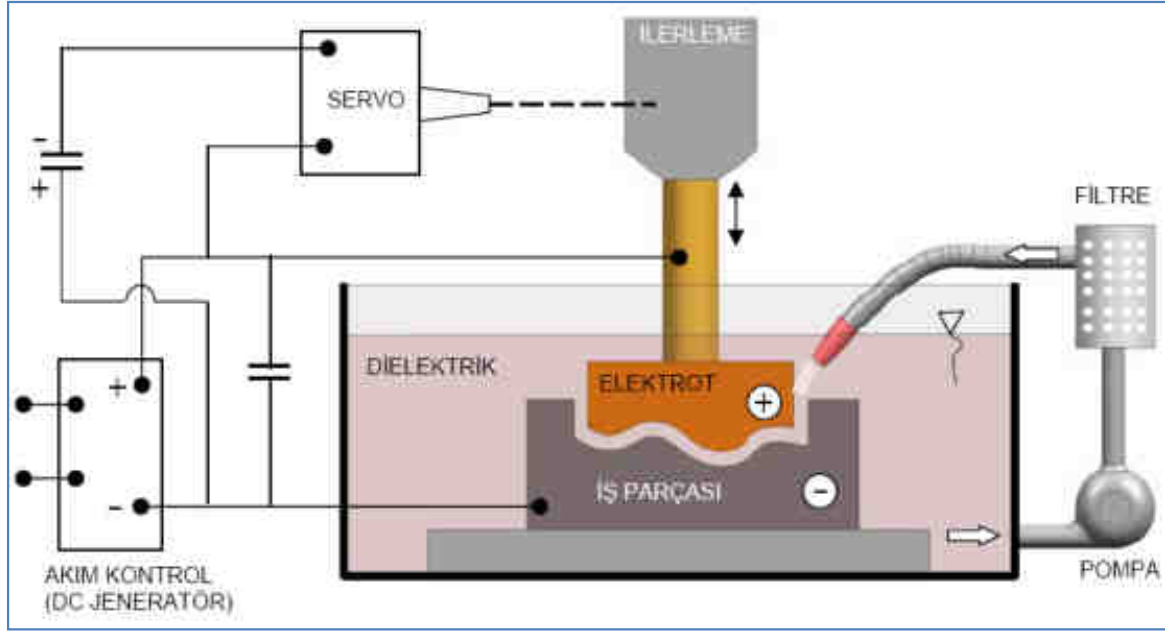
İlk elektro erozyonla işleme çalışmaları İkinci Dünya Savaşı sırasında Technical Institute of Moscow'da B.R. ve N.I. Lazarenko tarafından yapılmıştır [42, 48]. Lazarenko'lar RC güç kaynağı kullandıkları düzeneklerinde, metalin yüzeyindeki buharlaşan malzeme ile zor işlenen metallerin kontrollü işleme yöntemini geliştirmişlerdir [37]. B.R. Lazarenko daha sonra yaptığı çalışmayı 1943 yılında "To invert the effect of wear on electric power contacts" isimli makalesinde açıklamıştır [49]. Fakat elektro erozyonla işleme mantığı 1770'lere götürülebilir. Bu yıllarda İngiliz kimyacı Joseph Priestly elektriksel kıvılcımların aşındırma etkisi olduğunu keşfetmiştir [50]. "1950'lere kadar fazla bilgi sahibi olunamayan bu teknoloji ABD'de bu yıllardan itibaren önem kazanmaya başlamıştır. 1960'ların sonunda elektronik kontrol sistemlerinin gelişmesi ile bu yöntem güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak kabul edilmiş ve EEİ tezgâhları üretilmeye başlanmıştır" [51, 38, 39, 40]. 1968 yılında ise Mukoyama, uygulanan enerji ile iş parçası yüzeyinde oluşan çukurların şekli arasındaki ilişkiyi analiz etmek için bir ısı iletim modeli kullanmıştır [52]. 1980'li yıllarda ise CNC EEİ tezgâhı Amerika'da tasarlanarak tanıtılmıştır [50]. Bu tarihten itibaren yapılan çalışmalar hız kazanmış ve günümüzde özellikle kalıp üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [53, 42].

3.3. Elektro Erozyon ile İşlemenin Fiziksel Prensibi

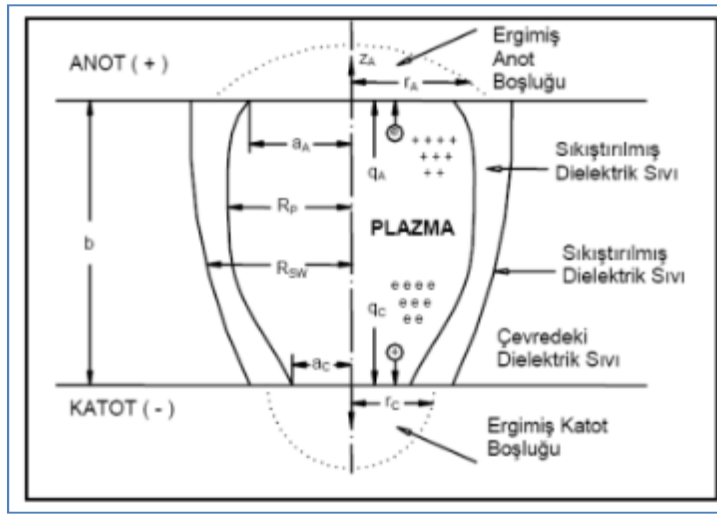
Elektro erozyonla işlemede temelde iki farklı elektrik iletken metal vardır. Bunlardan bir tanesi elektrot, diğeri ise iş parçasıdır. Bu iki iletken metalin arası, elektriksel kıvılcımın devamlılığı için dielektrik sıvısı ile doludur. Elektrot ile iş parçası arasına uygulanan gerilim neticesinde, servo kontrollü bir mekanizma sayesinde elektrot iş parçasına yaklaştırılır [54].

“Elektrot ile iş parçası arasında en yakın olan noktada dielektrik kırılır ve iyonlaşır. Buradan akım geçimi (ark – enerji boşalımı) başlar. Dielektrik basıncı arkı dar bir alana hapseder. Noktasal olarak yüksek bir akım geçimi ($1\text{--}5$ milyon Amper/cm²) ve iyon bombardımanı ile iş parçası ve elektrot üzerinde yüksek miktarda sıcaklık oluşur. Bu sıcaklık, bir kısım metalin buharlaşmasına, bir kısmının ise ergimesine sebep olur. Elektronik anahtarlama ile akım kesilerek ark söndürülür. İyonlaşmış bölgeye hücum eden dielektrik sıvının erimiş metale temasıyla metalin bir kısmı tanecikler halinde koparak dielektrik sıvının içinde yüzmeye başlar. Böylece bir miktar talaş kaldırılmış ve en yakın iki nokta uzaklaşmış olur. Akımın verilip kesilmesiyle sürekli bir ark dizisi oluşturularak her defasında farklı bir nokta kopartılır ve elektrot malzemesinin şekli karşıya geçirilir. Bir süre sonra, mesafenin uzaklaşması yüzünden, ark atlayamaz olur. Bu durumda özel servo mekanizması elektrotu iş parçasına yaklaştırır, istenen derinliğe kadar daldırır ve istenirse geri çeker. Dielektrik sıvı, arkın oluşması ve dar alana hapsedilmesi için gerekli ortamı oluşturduğu gibi, koparılan taneciklerin ortamdan uzaklaştırılması ve açığa çıkan yüksek ısının azaltılmasını sağlar. Elektrotlara gerilim uygulandığı ve birbirlerine yaklaştırıldığında belirli bir mesafede kıvılcım atlaması olur. Elektrotların birbirlerine değmesi durumunda kısa devre gerçekleşir ve erozyon işlemi gerçekleşmez” [55].

Elektro erozyonla işlemede, işlemin başlaması ile beraber elektrottan kopan küçük kütleli elektronların hızlı hareketi sebebi ile elektrot hızla ergir. Fakat bir süre sonra elektrot ile iş parçası arasında oluşan plazma kanalının büyümesi sonucunda ısı transferinde azalma meydana gelir. Bu da ergiyen elektrotun çok kısa bir sürede (mikro-saniye düzeyinde) tekrar katılaşmasına sebep olur. İş parçası yüzeyinden kopan iyonlar ise daha büyük kütleli olduklarından, daha yavaş hareket ederler. Bunun neticesinde iş parçasında elektrota göre daha küçük bir plazma oluşur (Şekil 3.3) [57, 27, 39, 40, 41, 51].



Şekil 3.2. Örnek bir elektro erozyonla işleme sistemi [54]



Şekil 3.3. Plazma kanalı [38]

3.4. Elektro Erozyon ile İşlemede Temel Parametreler

Elektro erozyonla işlemedeki temel parametreleri şu şekilde sınıflandırabiliriz [38, 39, 40, 41, 51];

1. Elektriksel parametreler,
2. Vurum jeneratörü karakteristikleri,
3. Dielektrik sıvı parametreleri,

4. İş parçası malzemesi fiziksel özellikleri,
5. Elektrot malzemesi fiziksel özellikleri,
6. İş parçası ve elektrodun boyutsal ve geometrik özellikleri.

3.4.1. Elektriksel parametreler

Elektro erozyonla işlemede kullanılan elektriksel parametreleri şunlardır [20, 38, 39, 40, 41, 42, 51]:

Vurum Süresi (t_i): Her bir akış döngüsünde akımın uygulandığı zamandır (μs).

Vurum Ara Zamanı (t_0): Her bir kıvılcım arasındaki bekleme zamanıdır (μs).

Kıvılcım Boşluğu: Elektrot ve iş parçası arasında kalan mesafedir.

İş Çevirimi: Vurum süresinin toplam çevrim süresine (vurum süresi + vurum ara süresi) oranıdır.

Gerilim (I): Elektro erozyon makinesi jeneratörünün sağlayabileceği farklı seviyedeki güçleri ifade eder. (I) boşalım akımının şiddetinin ortalama değerini ifade eder.

Vurum frekansı (f_p): Jeneratör tarafından elektrotla iş parçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısıdır.

Açık devre gerilimi (u_i): Akım boşalımı olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim.

Boşalım gerilimi (u_e): Boşalımın devam ettiği sürece ölçülen gerilim.

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

Boşalım gücü (P_e): Bir boşalım süresince uygulanan güç.

$$P_e = u_e(t) \cdot i_e(t) \quad (3.1)$$

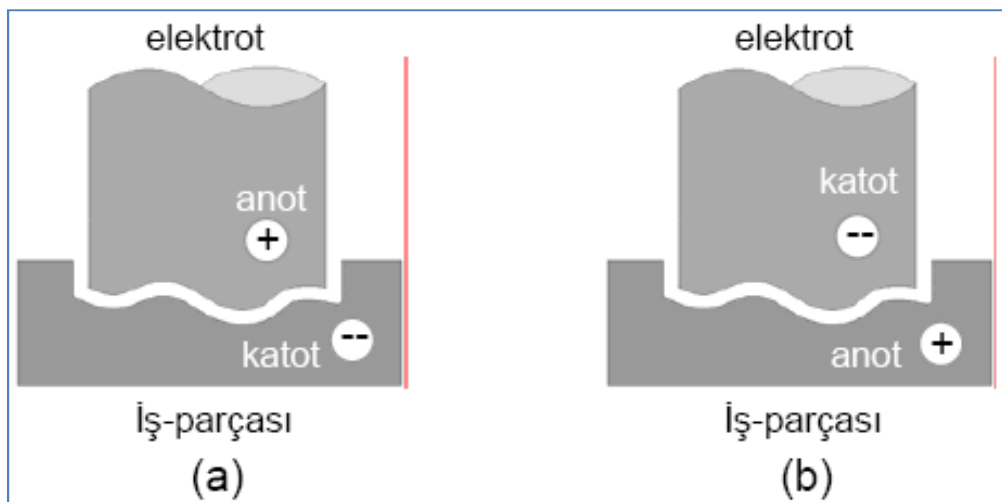
Vurum enerjisi (W_e): Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerji

$$W_e = \int_t u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e \quad (3.2)$$

Kutuplama (Polarite): Elektro erozyonla işlemede hem iş parçası hem de elektrot (+) veya (-) şekilde kutuplanabilir. Burada kutuplama olarak kastedilen elektrotta göre elektriksel kılıncının akış yönünün belirlenmesidir. Çizelge 3.1’den de görülebileceği gibi kutuplama elektrot veya iş parçası malzemesine, uygulama tipine ve kaba veya ince işlemeye göre değişebilmektedir. Şekil 3.4’te belirtildiği gibi elektrot hangi kutupta ise, kutuplama o şekilde adlandırılır [54].

Çizelge 3.1. Farklı malzemelere göre kutuplama [54]

İş Parçası	Kaba İşleme	İnce İşleme
Takım Çeliği	+	+ / -
Paslanmaz Çelik	+	+ / -
Alüminyum	+ / -	+ / -
Titanyum	-	-
Karbür	-	-
Bakır	-	-



Şekil 3.4. Elektrot kutuplama türleri: (a) pozitif kutuplama, (b) negatif kutuplama [54]

Anottaki enerji harcanması, katottakine göre daha fazladır. Yine de dalma erozyon işlemlerinde elektrotun polaritesi genellikle pozitif seçilir. Bunun sebebi, dielektrik

sıvısının ısı olarak ayrışması neticesi anot yüzeyinde biriken karbon tabakasının, anot yüzeyini aşınmaya karşı korumasıdır. Elektrotun pozitif yüklenmesi ile, boşalım süresi uzun olan elektro erozyon işlemlerinde, bu kalın karbon tabakası sayesinde elektrotun aşınması minimize edilebilir [49].

3.4.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri

Elektro erozyonla işlemede, “doğal ateşlemenin ve çoğunlukla salınımlı boşalımların olduğu, boşalım sonunun enerji depolanması tarafından etkilendiği, boşalım süresi ve sıklığının esasen devre elemanlarına bağlı olduğu kadar işleme aralığındaki şartlara da bağlı olduğu” RC tipi jeneratörler, “gerilim kaynağının doğrudan bir direnç üzerinden boşalım aralığına bağlı olduğu, boşalım süresi ve sıklığının öncelikle döner jeneratör tarafından belirlendiği” döner vurum jeneratörleri, “gerilimin anahtarlama elemanları kullanımıyla işleme aralığına bağlı olduğu, boşalım sürelerinin ve sıklıklarının özellikle kontrollü anahtarlama proseslerine bağlı olduğu” izopulse jeneratörleri gibi farklı türlerde jeneratörler kullanılmaktadır [38, 39, 40, 41, 51, 54].

3.4.3. Dielektrik sıvı parametreleri

EEİ ile işlemede kullanılan dielektrik sıvının görevleri aşağıda sıralanmıştır [38, 39, 40, 41, 51];

- ✓ Dielektrik sıvının en önemli görevlerinden biri fiziksel olarak elektrotlar üzerinde toplanan yükü, işleme aralığı şartları ile belirlenen bir süre tutmasıdır. Bu sayede dielektrik sıvı elektrik akımının çok küçük bir dirençle artmasına izin verir.
- ✓ Dielektrik sıvı, elektriksel boşalımın plazma kanalında tutulmasını ve bu sayede elektrot yüzeyindeki güç yoğunluğunun ve işleme hızının artmasını sağlar.
- ✓ Elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen elektriksel boşalım neticesinde yüksek miktarda ısı açığa çıkar. Bu ısı, elektrot ve iş parçası yüzeylerinde zarara sebep olur. Dielektrik sıvı bu yüksek ısının boşalımın bitmesi ile beraber hemen çalışma boşluğundan uzaklaştırılmasını sağlar.
- ✓ Elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen elektriksel boşalım neticesinde çalışma boşluğunda kalan işleme atıkları, kısa devre oluşmasına ve elektrotun daha hızlı

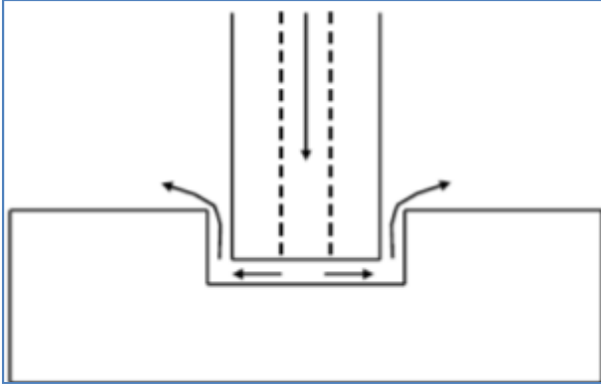
aşınmasına sebep olur. Bu atıkların çalışma boşluğundan hızlı bir şekilde uzaklaştırılması dielektrik sıvının görevidir.

EEİ ile işlemede dielektrik sıvıya ait özellikler işlem üzerinde oldukça etkilidir. İşleme üzerinde etkili olan dielektrik sıvı özellikleri aşağıda sunulmuştur.

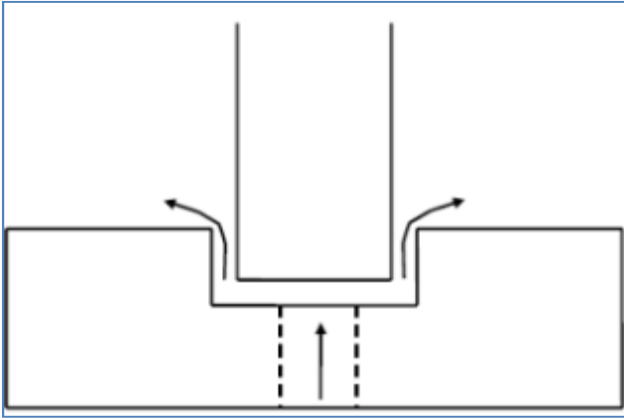
Dielektrik sıvının cinsi: Birçok elektro erozyon işleminde dielektrik sıvısı olarak gaz yağı kullanılır, fakat gaz yağı uzun süreli işlemlerde özelliklerini kaybeder. Hava kirliliğine de sebep olan gaz yağı, yüksek boşalım sıcaklıklarında bileşenlerine ayrılır ve bileşiğinde bulunan karbon atomları elektrot yüzeyine yapışır. Bu ise iş parçası işleme hızını düşürür. Saf su ise gaz yağına göre dört kat daha fazla ısı iletkenliğine sahiptir. Uzun süreli işlemlerde saf su sıcaklığı etkilenmediği için iş parçası işleme hızında her hangi bir düşme meydana gelmez [57].

Elektro erozyonla işlemede hidrokarbon yağları iyonlaşmamış/saf sudan daha verimli olarak kullanılır. Fakat bazı durumlarda suyun daha yüksek iş parçası işleme hızına yol açtığı görülmüştür. İyonlaşmamış su, hidrokarbon yağlarına göre daha iyi yüzey kalitesine yol açar. Hidrokarbon yağlarının dielektrik sıvısı olarak kullanıldığı çelik işlemlerinde karbon miktarının arttığı görülmüştür. Fakat dielektrik sıvısı olarak suyun kullanıldığı işlemlerde karbon miktarı azalmıştır. Yüzeyde oluşan tabakanın mikro sertliği, dielektrik sıvısı olarak hidrokarbon yağlarının kullanıldığı işlemlerde daha yüksektir. Eğer su bazlı dielektrik sıvısı kullanılırsa, daha fazla mikro çatlak oranına sahip, daha kalın sıcaklıktan etkilenmiş iş parçası yüzey alanı oluşur. Dielektrik sıvısı olarak hava ve oksijen gibi gazların kullanıldığı işlemlerde daha yüksek malzeme aşınma iş parçası işleme hızları elde edilebilmiştir [58].

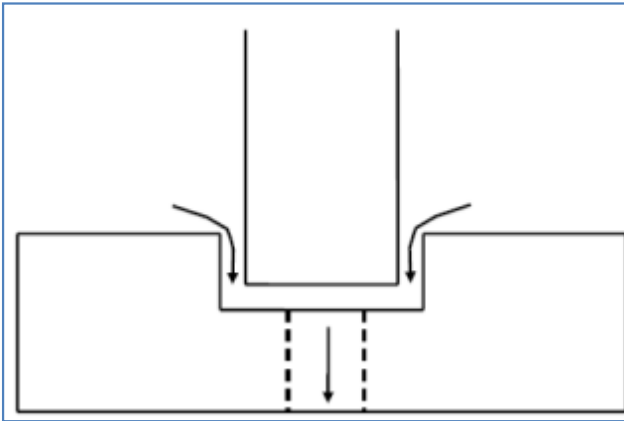
Dielektrik sıvı uygulama yöntemi: Elektro erozyonla işlemede farklı dielektrik sıvı uygulama yöntemleri kullanılmaktadır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz: elektrottan basarak püskürtme (Şekil 3.5), iş parçasından püskürtme (Şekil 3.6), iş parçasından emme (Şekil 3.7), elektrottan emme (Şekil 3.8), kenardan püskürtme (Şekil 3.9) ve titreşimli dielektrik sirkülasyonudur (Şekil 3.10).



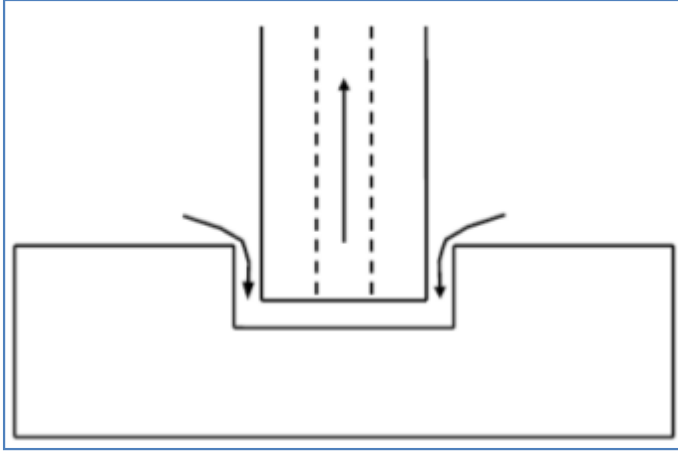
Şekil 3.5. Elektrottan basarak püskürtme [55]



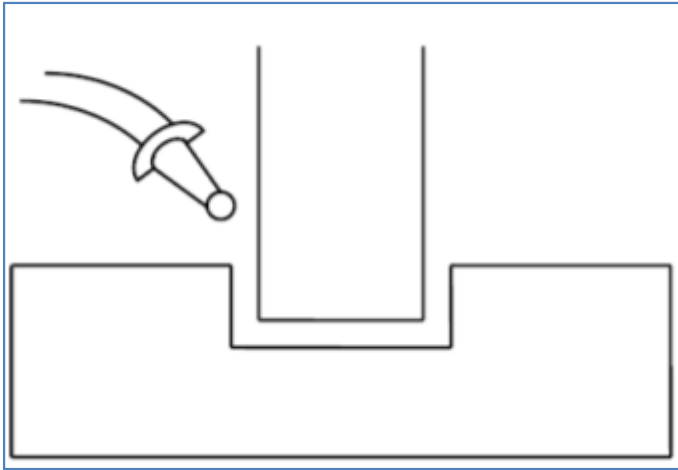
Şekil 3.6. İş parçasından basarak püskürtme [55]



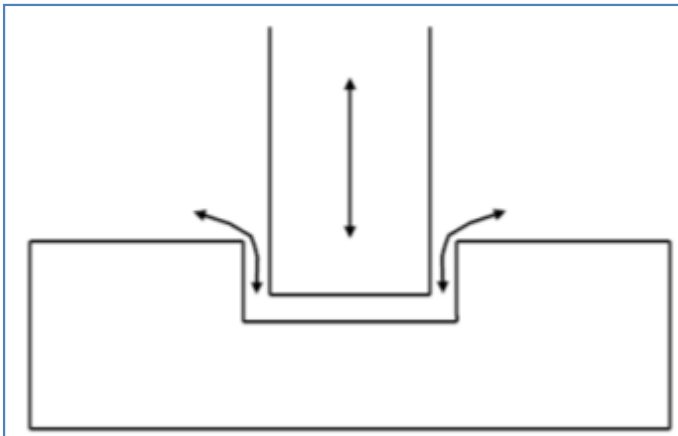
Şekil 3.7. İş parçasından emme [55]



Şekil 3.8. Elektrottan emerek püskürtme [55]



Şekil 3.9. Kenardan püskürtme [55]



Şekil 3.10. Titreşimli püskürtme [55]

Dielektrik sıvı basıncı: Bazı durumlarda dielektrik sıvı basınçsız bir şekilde kenarda püskürtme yöntemi ile uygulanır. Fakat bu durumda her bir boşalım sonucunda çalışma

aralığında biriken işleme atıkları yeteri kadar uzaklaştırılamayıp, iç kenarlarda birikir. Bu da boşalmanın verimsiz geçmesine sebep olur. Özellikle işleme derinliğinin yüksek olduğu uygulamalarda dielektrik sıvısı mutlaka basınçlı bir şekilde uygulanmalıdır. Çünkü aksi halde, dielektrik sıvı, çalışma aralığına yeteri kadar nüfuz edemez ve çalışma aralığında aşırı miktarda atık birikmesi meydana gelir. Bunun sonucunda da kısa devre meydana gelir ve işleme başarısız veya verimsiz olmuş olur. Dielektrik sıvı basıncının artması ile birlikte elektrot aşınma hızı ve iş parçası işleme hızı artar, yüzey pürüzlülüğü değeri ise önce artar sonra değişmez. Basıncın uygulandığı durumlarda, elektrottan ergiyen kısımlar, basıncın etkisiyle tekrar katılaşmaya fırsat bulamadan ortamdan uzaklaştırılır. Bunun neticesinde işleme sonrasında daha keskin köşeli ve kenarlı elektrotlar meydana gelir [38, 39, 40, 41, 51].

Dielektrik sıvı akış hızı: Dielektrik sıvının akış hızı arttıkça kabarcıklar meydana gelir. Bu sebeple bir sonraki boşalmanın aynı noktalarda meydana gelme olasılığı artar. Yine dielektrik sıvının akış hızının artması ile iş parçası yüzeyinden ergiyen metaller daha çabuk uzaklaştırılacağı için, beyaz tabaka (white layer) kalınlığı azalır [38, 39, 40, 41, 51].

Dielektrik sıvı viskozitesi: Dielektrik sıvının viskozitesi arttıkça, daha hızlı ve etkin bir dolaşım sağlayamadığı için, işleme atıklarının ortamdan uzaklaştırılması zorlaşır. Buna karşın, viskozite düştükçe dielektrik sıvıların kırılmaya karşı olan dirençleri düşer [38, 39, 40, 41, 51].

Dielektrik sıvı sıcaklığı: Dielektrik sıvı işleme sırasında ısınır. Isınan dielektrik sıvının viskozitesi ve dolayısıyla kırılmaya karşı olan dirençleri düşer. Bu ise düzensiz boşalmalara neden olur. Bunun önlenmesi için dielektrik sıvının soğutulması gerekmektedir [38, 39, 40, 41, 51].

“Fazla ısınma, dielektrik sıvının bozunmasına ve bozunma sonrası gaz ve karbonların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Gazlar boşalım kanalında istenmeyen genişlemeye sebep olarak, İİH değerinin azalmasına neden olurlar. Karbon tanecikleri ise elektrot ile iş parçası üzerinde birikerek ark tipi zararlı durumların oluşmasına sebep olur” [54].

3.4.4. Elektrot ve iş parçası malzemesi fiziksel özellikleri

Elektro erozyonla işlemede elektrik iletkenliği olan bütün malzemeler elektrot olarak kullanılabilir. Elektrotun sahip olması gereken en önemli özelliği yüksek ısıl kapasite ve yüksek ergime sıcaklığı değerleridir. Ergime sıcaklığı arttıkça elektrot aşınması azalır. Elektrot erozyon ile işlemede en çok bakır elektrot kullanılır. Bunun en önemli sebebi kolay işlenebilirliği, yüksek iş parçası işleme hızı ve düşük elektrot aşınma hızıdır. Çizelge 3.2’de çeşitli elektrot malzemeleri ve ilgili özellikleri gösterilmiştir [54].

Çizelge 3.2. Tipik elektrot malzemeleri ve karakteristikleri [54]

Malzeme	EAH	İİH	Üretimi
Bakır	Düşük	Yüksek (kaba işlemede)	Kolay
Pirinç	Yüksek	Yüksek (bitirme)	Kolay
Tungsten	En düşük	Düşük	Zor
Tungsten bakır	Düşük	Düşük	Zor
Dökme demir	Düşük	Düşük	Kolay
Çelik	Yüksek	Düşük	Kolay
Çinko alaşımlar	Yüksek	Yüksek (kaba işlemede)	Kolay
Bakır grafit	Düşük	Yüksek	Zor

Geleneksel olarak bakır, grafit, tungsten, pirinç ve molibdenin kullanıldığı elektro erozyonla işlemede son yıllarda titanyum, silisyum, iletken seramikler, iletken elmas, çinko alaşımları vs. kullanılmaktadır [59, 60, 61, 62, 33].

Kalıp çelikleri ve tungsten karbür iş parçalarının işlenmesinde bakır tungsten elektrotlar kullanılmaktadır. Bunun sebebi bakırın yüksek ısıl iletkenliği ve tungstenin iyi kıvılcım aşınma direnci, düşük ısıl genişleme katsayısı ve yüksek ergime noktasıdır. Bakırın düşük ergime noktası elektrot aşınma direncini düşürür. Yüksek tungsten oranlarında ise bakır ve tungsten arasındaki çözünmezlikten dolayı sinterlenmiş elektrotlarda boşluklar meydana gelir.

Tungsten-bakır (W/Cu) elektrotlarda, tungsten ve bakırın birbiri içine katı çözünürlüğü olmaz. Tungsten ve bakırın ergime noktaları farklı olduğu için geleneksel yöntemlerle

W/Cu karışımı elde edilemez, sadece toz metalürjisi yöntemi ile elde edilir. Buna göre saf tungsten tozları bir kalıpta sıkıştırılır, yüksek sıcaklıklarda sinterlenir, sonra üzerine sıvı bakır infiltrasyonu sağlanır. W/Cu toz karışımının ergime noktası, paslanma ve aşınma direnci yüksektir, aynı zamanda akıma ve sıcaklığa karşı iyi yalıtkandır [63].

Son yıllarda elektrot üretiminde farklı metal tozları farklı kombinasyonlarda kullanılmaktadır. Bu sayede iş parçası üzerinde elektro erozyonla işleme sonucunda farklı mekanik özelliklere sahip birkaç katman oluşabilir. Elektrotların üretilmesi sırasında, metal tozlarının sıkıştırma basınçları ve sinterleme sıcaklıkları, elektrotların performansını etkilemektedir [29].

Literatürde toz metalürjisiyle üretilen elektrotlarda Al, Cr, Ti, TiC/Ni, WC/Co, Cr/Ni, Ni/Co, Ni/Mn, Ni/Fe, Ni/Si, Cu/W, Cu/Mn, Cu/Co ve TiC/WC/Co tozları kullanılmıştır. Toz tanecik büyüklükleri 1-175 μm , sinterleme basıncı 100-540 MPa arasında, sıcaklık ise 900-1300 $^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir [21].

Cr/Ni, Cu/Co, Cu/Mn, Cu/Sn, Cu/W, Ni, Ni/Co, Ni/Fe, Ni/Mn, Ni/Si, Ti, Ti/Al, TiC/Ni, TiC/WC/Co gibi toz metal elektrotlar, elektro erozyonla işlemede kullanılırken negatif polaritede yüklenir. Genel olarak toz metal elektrotlar daha yüksek boşalım enerjisi gerektirir, dolayısıyla iş parçasının yüzeyinde daha kalın bir tabakanın oluşmasına yol açar, bu sayede iş parçası mikro kırılmalara karşı daha hassas hale gelir [64].

Tsai ve Masuzawa elektro erozyonla işlemede elektrot malzemelerinin elektrot aşınma hızına etkilerini inceledikleri çalışmalarında iş parçası olarak SUS304, Cu (99,99%), Fe (99,95%) ve elektrot malzemesi olarak ta Ag, Al, Cu, Fe, Mo, Ni, Pt, Ti, Ta, W kullanmışlardır. Deneyler sonucunda tungsten elektrotun aşınmamsın en az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi tungstenin ergime ve kaynama noktasının en yüksek olmasıdır. Alüminyumun ise aşınması en yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise alüminyumun ergime noktasının en düşük olmasıdır. Ayrıca bakır ve gümüş elektrotların aşınması demir ve nikel elektrotların aşınmasından az olmuştur. Bunun sebebi her ne kadar bakır ve gümüşün ergime ve kaynama noktaları demir ve nikelin ergime ve kaynama noktalarından daha az olsa da, bakır ve gümüşün ısı iletkenliğinin çok iyi olmasıdır. Yazarlar genel olarak şu sonuçlara ulaşmışlardır: iş parçası malzemesinden bağımsız olarak, yüksek ergime ve kaynama noktasına ve ısı iletkenliğine sahip elektrotların hacimsel aşınma oranı düşüktür.

Elektrotların köşe aşınması ısı yayılımına bağlıdır. Isı iletkenliği düşük olan elektrotlarda köşe aşınması daha muhtemeldir. Deneylerde kullanılan elektrot malzemelerinin ısı özelliklerine göre aşınma morfolojileri Şekil 3.11’de gösterilmiştir [65].

Özellik	Elektrot Malzemesi	Sonuç	Örnek
Isıl İletkenlik	Düşük, örneğin Ti, Fe, Ni	Köşede ciddi aşınma	  Ti Fe
	Yüksek, örneğin Ag, Cu	Köşede az aşınma	  Ag Cu
Erime Noktası	Düşük, örneğin Al	Bükülme ve erime	  Al Al
	Yüksek, örneğin W, Ta, Mo	Az değişiklik	  W Mo

Şekil 3.11. Elektrot malzemelerinin ısı özelliklerine göre aşınma morfolojileri [65]

Toz metal elektrotlar, vurum akımındaki ve vurum süresindeki değişimlere karşı daha hassastır ve iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı gibi değerler üzerindeki etkileri normal elektrotlara göre farklıdır. Farklı oranlarda, farklı presleme basınçlarında ve farklı sinterleme sıcaklıklarında tozlar kullanılarak elektro erozyon parametreleri istenildiği şekilde değiştirilebilir. Bazen oluşturulan toz metal elektrotlar yoğun olmayabilir. Bunları

yoğunlaştırmak için nikel tozu ilave edilebilir. Bazı durumlarda toz metal elektrotların kullanılması yüzeyden malzeme aşındırmasına değil, yüzeyde malzeme birikmesine yol açabilir. Buna elektro erozyonla kaplama denilmiştir [66].

Haron ve arkadaşları, XW42 takım çeliğinin elektro erozyonla işlenmesine bakır ve grafit elektrotların etkisini incelemişleridir. Dielektrik sıvısı olarak gaz yağının kullanıldığı deneylerde araştırmacılar iki farklı akım ve üç farklı elektrot çapı kullanmışlardır. Bakırın grafitte göre daha fazla iş parçası işleme hızına yol açtığı, aynı zamanda daha az elektrot aşınma hızına sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise bakırın grafitte göre daha yüksek ergime noktasına sahip olduğu gösterilmiştir. Bundan dolayı kaba işlemlerde bakır elektrotun kullanılması, nihai işlemlerde ise grafit elektrotun kullanılması, eğer bu iki malzemenin karışımı kullanılabilirse mükemmel bir sonuç elde edilebileceği belirtilmiştir. Akımın ve elektrot çapının artmasının ise hem iş parçası işleme hızını hem de elektrot aşınma hızını azalttığı sonucuna varmışlardır [67].

Lonardo ve Bruzzone bakır ve grafit elektrotların elektro erozyonla işleme performansını inceledikleri araştırmalarında bakırın grafitte göre daha çok aşınmaya sebep olduğunu göstermişleridir [68].

Yüzey pürüzlülüğü elektrotun aşınmaya karşı olan direnci ile yakından ilgilidir. Bunun için grafit ve tungsten gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrotlarla daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilmektedir [69].

Elektrot malzemesi seçilirken daha yüksek ısı iletkenliğine sahip malzemeler daha çok tercih edilir. Fakat elektrotun içindeki aynı sıcaklık dağılımına bağlı olarak, yüzey sıcaklığı, ergime veya kaynama sıcaklığından yüksek değilse aşındırma gerçekleşmez. Dolayısıyla elektrot malzemesinin aynı zamanda yüksek ergime ve kaynama sıcaklığı da olmalıdır. Örneğin her ne kadar çeliğin kaynama ve ergime sıcaklığı bakırdan fazla ise de, bakır daha çok elektrot malzemesi olarak kullanılır. Bunun sebebi bakırın daha fazla ısı iletkenliğine sahip olmasıdır [49].

“İdeal bir EEİ elektrodu maksimum iş parçası işleme hızını sağlamakla beraber aşınmaya karşı yüksek bir dirence sahip olmalıdır. Elektrot malzemesinin ergime sıcaklığı (T_m), yoğunluğu (ρ), ısı iletkenlik katsayısı (k), özgül ısı (C_s), kohezyon enerjisi (C_e) ve buharlaşma gizli ısı (L_v), aşınma hızını etkileyen en temel ısı-

fiziksel özelliklerdir. İş parçası malzemesinin ergime sıcaklığı (T_m) ve kohezyon enerjisi (C_e) elektrot aşınmasını etkileyen iş parçası malzemesi ısı-fiziksel özellikleridir. Elektrot malzemesinin T_m , ρ , k , C_s , C_e ve L_v değerlerinin büyük olması aşınmaya karşı direnci artırırken iş parçası malzemesinin C_e ve T_m değerlerinin büyük olması yüksek vurum enerjisi gerektireceğinden elektrot aşınmasını artırır. Bundan dolayı yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek yoğunluğa sahip elektrotlar daha yüksek aşınma direnci gösterir” [51].

Elektro erozyonla işlemede kullanılan bazı elektrot malzemelerine ait özellikler aşağıda verilmiştir:

Bakır zirkonyum diborür ($CuZrB_2$): Bakır zirkonyum diborür malzemeleri bakır matrisinin içindeki toz zirkonyum diborür parçacıklarından oluşur. Çok pahalı olan bu malzeme bakır ve grafitte nazaran daha düşük arınma oranına sahiptir. Bakır zirkonyum diborürün aşınma oranı bakır tungsteninkine yakındır fakat daha yüksek işleme oranı sağlar.

Grafit: Grafit en çok kullanılan elektro erozyon elektrotudur. Bunun sebebi grafitin iyi işlenebilirliği, aşınma direnci ve ucuzluğudur. Grafit petrolden elde edilen karbondan oluşur. Grafitin çok yüksek süblimleşme sıcaklığı vardır. Bu sayede yüksek sıcaklıktaki kıvılcımlara karşı iyi direnç sağlar. Grafitin mekanik direnci ise düşüktür. İnce taneli grafit daha iyi aşınma direnci gösterir fakat daha pahalıdır.

Molibden: Molibden yüksek ergime sıcaklığından dolayı ($2610\text{ }^{\circ}\text{C}$) iyi kıvılcım direncine sahiptir. Daha çok küçük toplu elektrotlar için kullanılır.

Tellür bakır: Bu elektrotlarla yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir. İşlenebilirliği saf bakırdan daha iyidir. Fakat saf bakıra göre daha düşük iş parçası işleme hızına ve daha yüksek aşınma hızına sahiptir.

Tungsten karbür: Tungsten karbür elektrotları tungsten ve karbon tozlarının metal bir karıştırıcıda karıştırılması ile elde edilir. Yüksek aşınma direncine ve sertliğe sahiptir.

Pirinç: Pirinç bakır ve çinkonun bir alaşımıdır. Pirinç bakır ve tungstene göre daha kolay işlenebilir. Fakat aşınma direncinin fazla olmasından dolayı günümüzde elektro erozyonla işlemede pek tercih edilmez.

Bakır (Cu): Bakır elektro erozyonla işlemede en çok kullanılan elektrottur. Ayrıca farklı elektrotlar yapmak için de ana malzeme olarak kullanılır. Bakırın aşınma direnci pirinçten fazladır, fakat daha zor işlenir. Bakır aynı zamanda grafitten daha pahalıdır. Tungsten karbür gibi sert metallerin veya iyi yüzey kalitesi istenilen işlemlerde kullanılır.

Gümüş: Gümüş yüksek elektriksel iletkenliği, saflığı ve yapısal bütünlüğünden dolayı elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır. Her zaman kullanılamamasının sebebi pahalı olmasıdır.

Tungsten: Tungsten yüksek ergime sıcaklığından dolayı (3410 °C) yüksek sıcaklık direncine ve kıvılcım direncine sahiptir. Fakat düşük iletkenliğe sahiptir, bundan dolayı pirinç veya bakıra göre daha yavaş işler. Tungsten kırılğan bir malzeme olduğu için daha çok toz metalürjisi yöntemi ile üretilir. Pahalı olduğu ve işlenebilirliğinin zor olmasından dolayı elektrot malzemesi olarak az kullanılır.

Bakır tungsten: Bakır tungsten elektrotlar toz metalürjisi yöntemi kullanılarak elde edilen bakır ve tungsten tozlarından oluşur. Diğer elektrot malzemelerine göre pahalıdır, fakat kötü fışkırtma koşullarında derin slotlar açmada iyi performansa sahiptir. Bakır tungsten geleneksel yöntemlerle üretilemez. Bunun sebebi tungsten ergimeden bakırın buharlaşmasıdır. Onun için bakır tungsten elektrotlar toz metalürjisi yöntemiyle elde edilir. Sinterleme sırasında malzeme %25 oranında küçülür. Bu esnada malzemede boşlukların olmamasına dikkat etmek gerekir. Piyasada satılan tungsten bakır elektrotlar daha çok %70 W-%30Cu oranına sahiptir.

Gümüş tungsten: Gümüş ve tungsten birbiri içinde çözünmez. Gümüş tungsten elektrotları gümüş içinde tungsten karbür parçacıklarından oluşur. Tungsten karbür yüksek aşınma direncine ve yüksek güç gerektiren işlemlerde kaynak olmama özelliğine sahiptir.

3.5. Elektro Erozyon ile İşleme Sonucu Yüzeyde Oluşan Katmanlar

Elektro erozyonla işleme sonunda malzeme yüzeyinde çeşitli tabakalar meydana gelir. Bu tabakalardan en üstte olanı beyaz tabaka olarak adlandırılır. Bu tabaka, iş parçası malzemesi yüzeyinden yüksek ısı sebebi ile hızla ergiyen malzemenin dielektrik sıvının etkisi ile tekrar soğuyarak malzeme yüzeyinde katılaşması neticesinde oluşur. 60-65 HRC

gibi yüksek bir sertliğe ve 1-40 μm arasında kalınlığa sahip olan beyaz tabaka, karbonca zengindir. Bunun sebebi dielektrik sıvısının işleme sırasında kimyasal olarak bozunması sonucunda ortaya çıkan karbon atomlarının iş parçasının yüzeyine nüfuz etmesidir. Beyaz tabakanın altındaki bölge, ısı olarak etkilenmiş bölge adını alır ve beyaz tabakadan malzeme difüzyonu ve hızlı ısınma-soğuma sonucu oluşur. Bu tabaka karbon atomlarının etkisine daha az maruz kaldığı için, beyaz tabakadan daha yumuşaktır. Isıl olarak etkilenmiş bölgenin altındaki bölge geçiş bölgesidir. Bundan sonra ana malzeme gelmektedir, dolayısıyla bu bölgenin özellikleri ana malzemenin özelliklerine yakındır. [54].

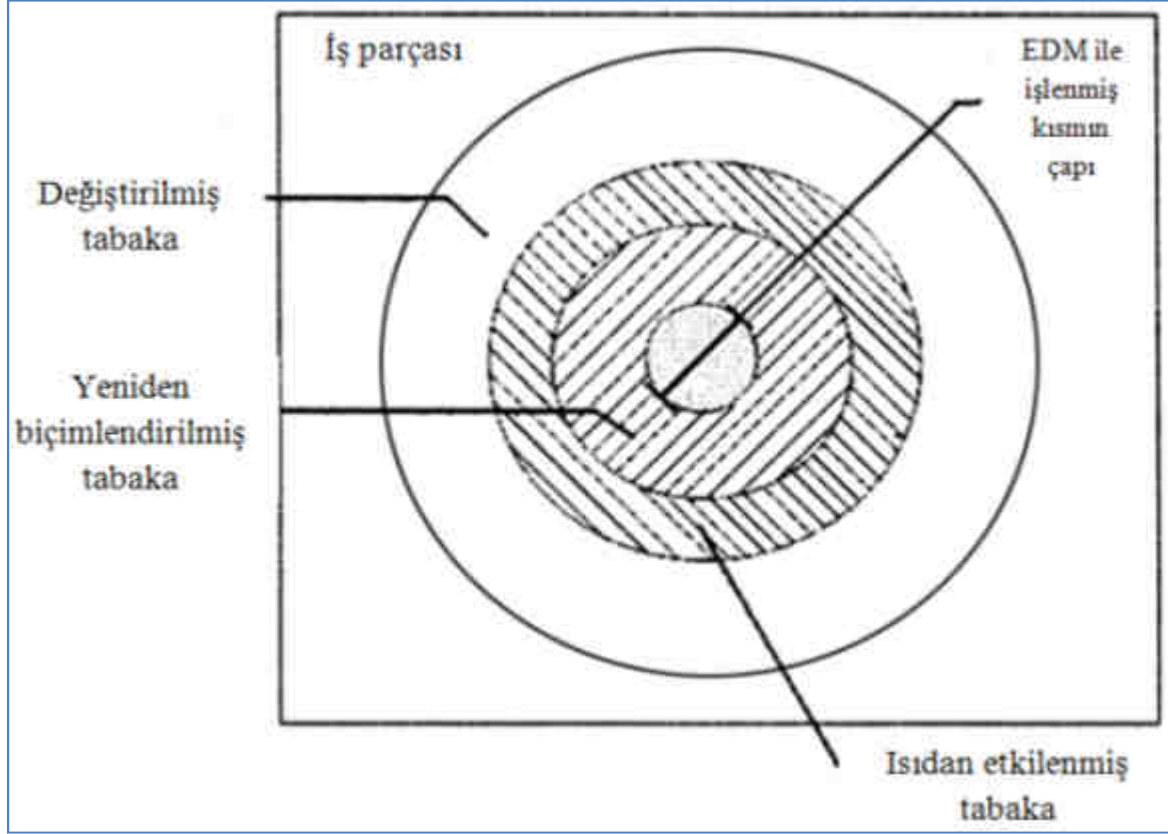
Elektro erozyon işlemi sonucunda iş parçası üzerinde artık bir malzeme tabakası oluşur. Bu tabaka iş parçası ve kullanılan elektrot ile dielektrik sıvısına bağlı olarak bazen iş parçasından daha sert bazen de daha yumuşak olabilir. Sert tabakaların oluşması daha iyi aşınma ve paslanma direncinden dolayı, yumuşak tabakaların oluşması ise farklı parçaların birleştirilmesi sırasında avantaj sağlar [21].

Elektro erozyonla işlemede en önemli dezavantajlardan birisi yüzeyde çatlakların oluşmasıdır. İşleme sırasında yüzeyde oluşan yüksek ısı ısı gerilime sebep olur. Yüzeyde eriyen metalin tamamı dielektrik sıvısı tarafından süpürülmediği için, iş parçası yüzeyinde germe gerilimi oluşur. Eğer bu gerilim malzemenin azami germe geriliminden fazla olursa yüzeyde çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar iş parçasının mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Aynı zamanda kalıbın ömrünü de azaltır [70].

Elektro erozyonla işleme sırasında, sıcaklığın 12000 $^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı bir akım boşalım kanalı oluşur ve bu sayede hem malzemedan hem de elektrottan buharlaşma ve ergime yoluyla malzeme kaldırılır. Akım boşalımının durmasından sonra yüzeyde hızlı soğumadan dolayı bir katman oluşur. Beyaz katman adı verilen bu tabaka birçok boşluk ve çatlak içerir. Beyaz katmanın içeriğinde bulunan karbon miktarı bu tabakanın sertliğini ve ısı iletkenliğini asıl belirleyen faktördür. Bu tabakanın kalınlığı iş parçası malzemesine, işlem sırasında verilen akıma ve elektriksel polariteye bağlıdır [46].

Elektro erozyonla işlenmiş yüzeyler incelendiğinde yüzeyden başlayarak üç farklı katmanın oluştuğu görülmüştür. Bunlar: yeniden biçimlendirilmiş katman (recast layer), ısıdan etkilenmiş katman (heat affected zone) ve değiştirilmiş katman (converted layer)

olarak adlandırılırlar. Şekil 3.12’de elektro erozyonla işlenmiş bir parçada bulunan bu katmanlar gösterilmiştir [71].



Şekil 3.12. Elektro erozyonla işlenmiş parçada oluşan katmanlar [68].

Eğer elektro erozyonla işleme sonucunda iş parçası yüzeyinden eriyen malzeme, hızlı bir şekilde iş parçası üzerinden süpürülmezse, dielektrik sıvının soğutucu etkisinden dolayı soğur ve iş parçası üzerinde 2,5-50 μm kalınlığında yeniden biçimlendirilmiş katman adı verilen bir tabaka oluşur. Bu katman çok sert, kırılgan ve gözeneklidir. Aynı zamanda iç kısımlarında mikro çatlaklar bulunabilir. Elektro erozyonla işlenen parçalar kullanılmadan önce bu katmandan arındırılmalıdır. Yeniden biçimlendirilmiş katmanın hemen arkasında işlem sırasındaki hızlı ısınmadan dolayı ısıdan etkilenmiş katman bulunur. Bu katmanın kalınlığı yaklaşık 25 μm kadardır. Isıdan etkilenmiş katman ile iş parçasının orijinal yapısı arasında değiştirilmiş katman bulunur [71, 72].

3.6. Elektro Erozyon ile İşlemede Performans Karakteristikleri

Genel olarak elektro erozyonla işleme operasyonunda işleme performansının değerlendirilmesi aşağıdaki performans karakteristiklerine göre yapılır [38, 39, 40, 41]:

İş parçası işleme hızı (İİH);

$$\text{İş Parçası İşleme Hızı [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{İş Parçası Toplam Aşınma Hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam İşleme Süresi [dk]}} \quad (3.3)$$

Elektrot aşınma hızı (EAH);

$$\text{Elektrot Aşınma Hızı [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{Elektrot Toplam Aşınma Hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam İşleme Süresi [dk]}} \quad (3.4)$$

Bağlı aşınma (BA);

$$\text{Bağlı Aşınma [\%]} = \frac{\text{Elektrot Aşınma Hızı}}{\text{İş Parçası İşleme Hızı}} \times 100 \quad (3.5)$$

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a);

$$R_a = \int_0^L |Y(x)| dx \quad (3.6)$$

Burada R_a , ortalama çizgiden aritmetik ortalama sapmasıdır, L örnekleme uzunluğudur ve Y ise profil eğrisinin ordinatıdır [50].

3.7. Elektro Erozyon ile İşlemenin Avantaj ve Dezavantajları [50]

Elektro erozyon işleminin avantajları;

1. İş parçası ile elektrot arasında herhangi bir temas olmadığı için, talaşlı imalatla olduğu gibi malzeme yüzeyinde işleme izleri bulunmaz ve daha hassas, pürüzsüz yüzeyler elde edilir.
2. Farklı şekillerde ve geometrilerde parçaların işlenmesi mümkündür.

3. Başka imalat yöntemleri ile işlenmeleri çok zor olan veya mümkün olmayan sert metaller rahatlıkla işlenebilir.
4. Sementit tungsten karpit veya sertleştirilmiş takım çelikleri gibi malzemelerin işlenebilirliği mümkündür.
5. Temasın olmaması sebebi ile herhangi bir kesme kuvvetine ihtiyaç duyulmaz.
6. Çok farklı türde metal kalıp (plastik enjeksiyon, ekstrüzyon, kesme kalıpları vs.) ve döküm kalıpları bu yöntemle üretilebilmektedir. Uygulama alanı geniştir, çünkü bütün elektrik iletebilen malzemeler üzerinde çalışabilir. İşlenecek malzemenin şekil ve sertliği işlemi engellemez. İş bitimi elde edilecek olan form ve yüzey kalitesi önceden belirlenebilir. Diğer tezgâhlarla yapılan parçalı kalıplardaki parçalar arası çizgiler bu tezgâhın yaptığı yekpare kalıplarda oluşmaz. Servo motor ile hareket tek eksen olduğundan işlem basittir. İş parçasına ve bağlama elemanlarına uygulanan kuvvetler ihmal edilebilir. İş parçası ısıtılma işlemi ile sertleştirilip sonra işlenebileceği için sertleştirme sırasındaki çarpılma, bozulma gibi olumsuz etkilerden uzak kalınır.

Elektro erozyon işleminin dezavantajları;

1. Daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için düşük akım ve düşük vurum süresi kullanılacağından işleme süresi uzun olmaktadır.
2. Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvısının buharı sağlığa zararlıdır.
3. Hem kaba hem de ince işlemede tek bir elektrot yetmeyebilir. Onun için birden fazla elektrota ihtiyaç duyulabilir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA PLANI

4.1. Kullanılan Metal Tozları

Deneysel çalışmalarda ortalama toz tanecik boyutu $32,42 \mu\text{m}$ olan Cu tozu, $23,57 \mu\text{m}$ olan Cr tozu, $15,88 \mu\text{m}$ olan Mo tozu ve $21,51 \mu\text{m}$ olan B₄C tozu kullanılmıştır. Toz tanecik boyutu ölçümleri, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan Mastersizer/E lazerle toz tanecik boyutu ölçüm cihazında yapılmıştır (Resim 4.1). Ölçüm detayları EK-1, EK-2, EK-3 ve EK-4'te gösterilmiştir.

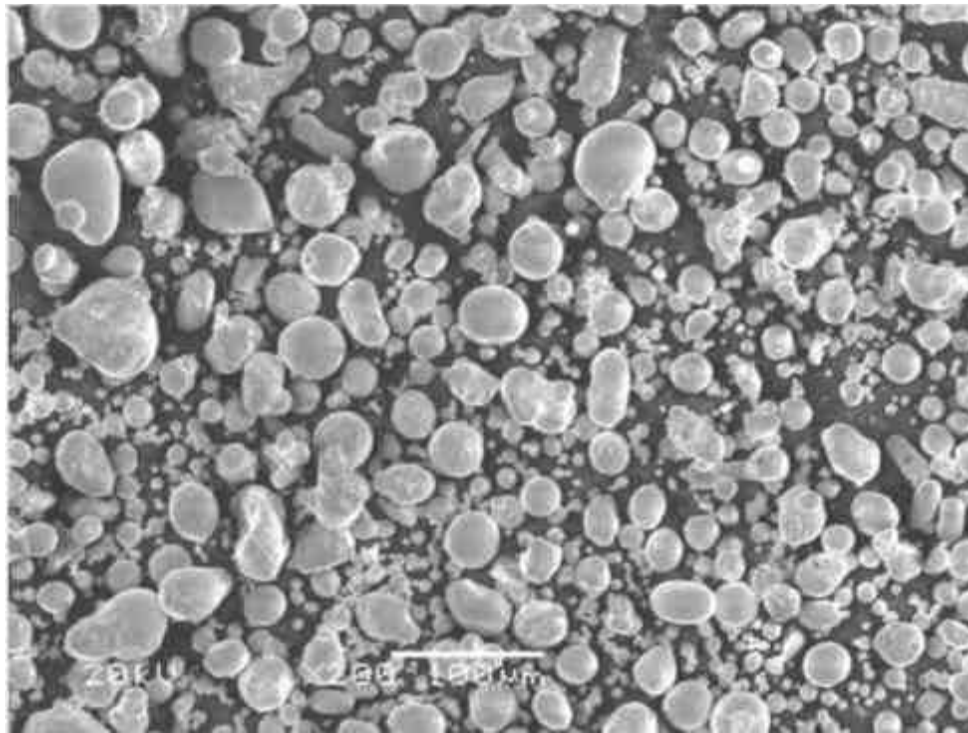


Resim 4.1. Mastersizer/E lazerle toz tanecik boyutu ölçüm cihazı

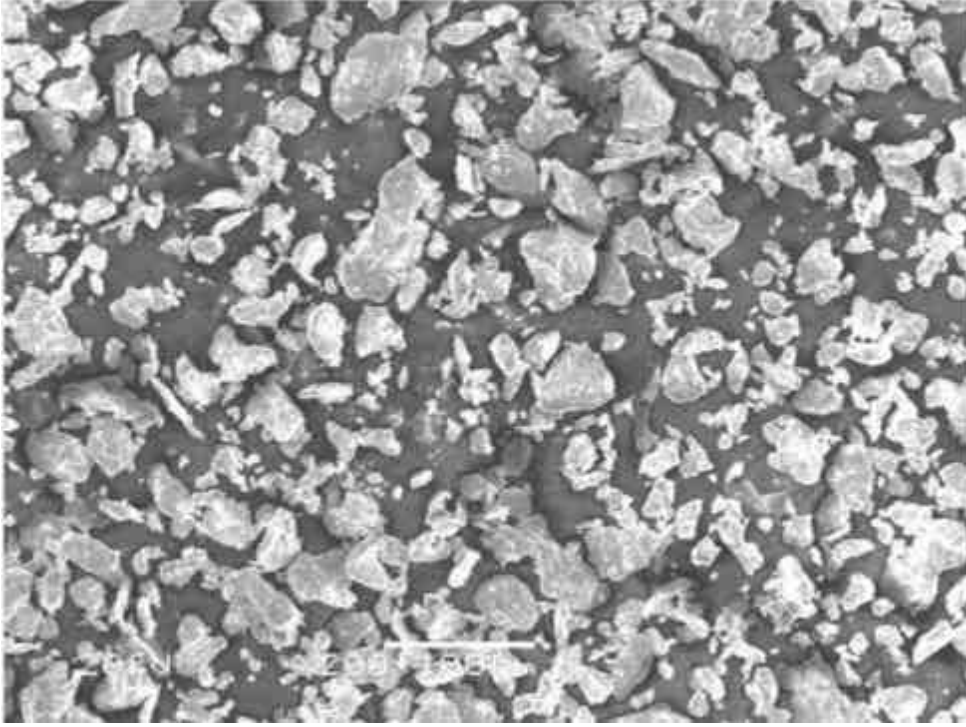
Tozların görünüşleri için Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SEM Laboratuvarı'nda bulunan JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu (Resim 4.2) kullanılmıştır. İlgili toz şekilleri Resim 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir.



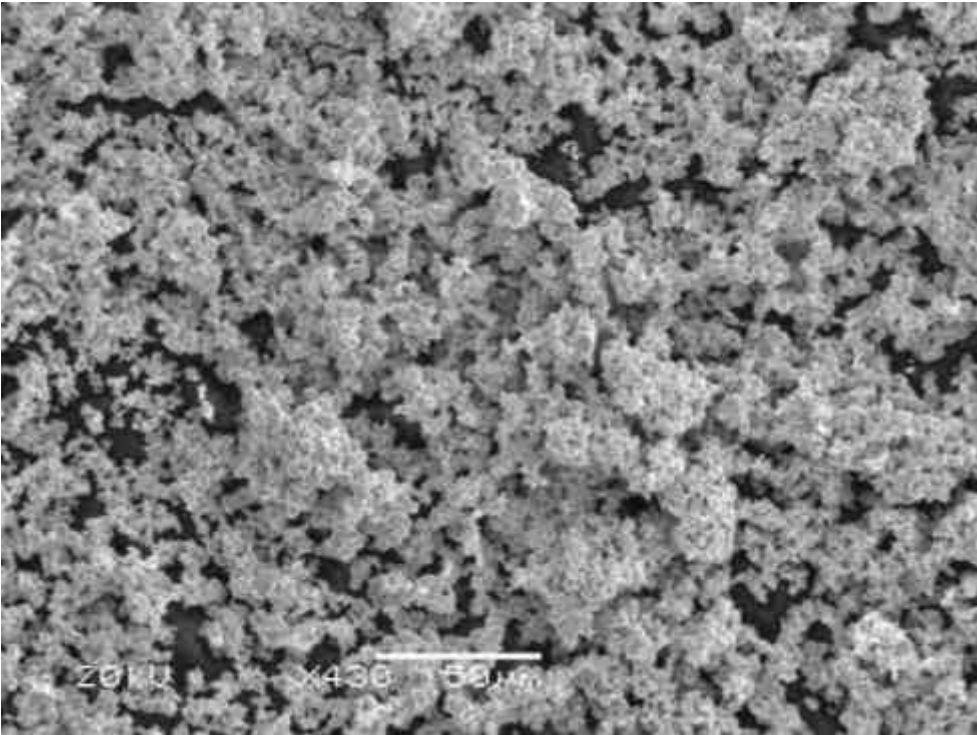
Resim 4.2. JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu



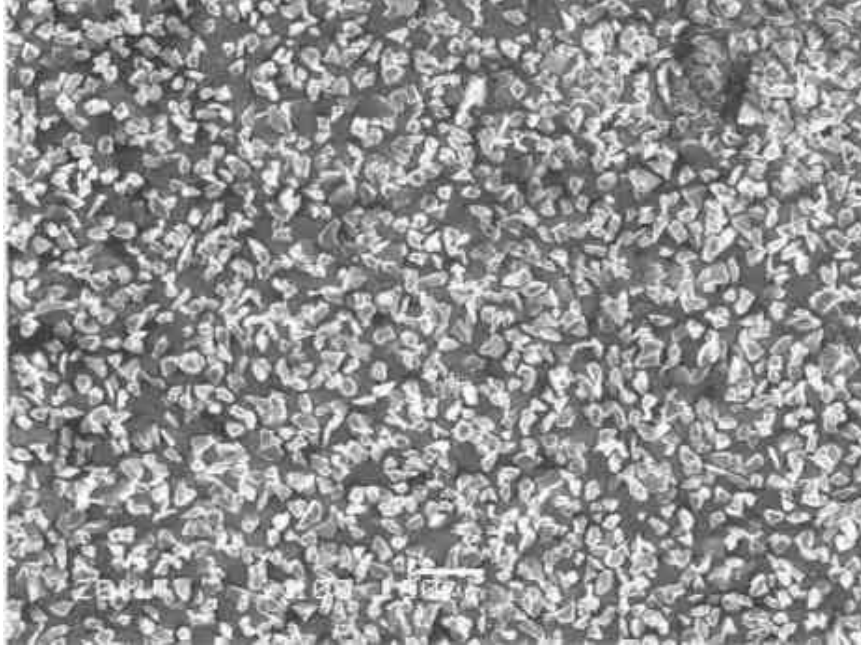
Resim 4.3. Deneylerde kullanılan Cu tozu



Resim 4.4. Deneylerde kullanılan Cr tozu



Resim 4.5. Deneylerde kullanılan Mo tozu



Resim 4.6. Deneylerde kullanılan bor karbür (B_4C) tozu

4.2. Toz Metal Elektrotların Üretimi

4.2.1. Metal tozlarının karıştırılması

Metal tozlarının karıştırma işleme Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan Turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda yapılmıştır. Karıştırma süresi 45 dk olarak belirlenmiştir. Resim 4.7'de ilgili karıştırıcı gösterilmiştir.



Resim 4.7. Metal tozlarının karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı

4.2.2. Metal tozlarının sıkıştırılması

Kalıp üretimi

İlk etapta kalıp malzemesi olarak Böhler K720 soğuk iş çeliği kullanılmıştır. İş parçasının kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Kalıp, üst zımba ve alt zımba parçaları üretildikten sonra kalıbın iç yüzeyi, üst ve alt zimbaların ise dış yüzeyi taşlanmıştır. Son olarak bütün parçalar ısıtılma tabi tutularak sertlikleri 55-60 HRC’ye çıkartılmıştır. Fakat ilk presleme sonucunda zımba parçalanmıştır (Resim 4.8). Bunun muhtemel sebebi olarak kalıbın aşırı sertleştirildiği ve kırılganlığının artırıldığı düşünülmüştür. Ayrıca kalıbın tasarımının da bu kırılmaya sebep olduğu düşünülmüştür. Bunun için ikinci aşamada AISI 4340 çeliği kullanılarak kalıp, üst zımba ve alt zımba parçaları üretilmiş ve üretildikten sonra kalıbın iç yüzeyi, üst ve alt zimbaların ise dış yüzeyi taşlanmıştır. Sonra ısıtılma ile bütün parçalar 44-46 HRC sertliğe çıkartılmıştır. AISI 4340 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Böhler K720 kimyasal kompozisyonu

	C	Si	Mn	Cr	V
%	0,90	0,25	2,00	0,35	0,10

Çizelge 4.2. Böhler K720 fiziksel özellikleri (20 °C’de)

Yoğunluk (kg/dm ³)	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Elektriksel direnç (Ohm.mm ² /m)	Elastisite modülü (N/mm ²)
7,85	30,0	0,35	210 x 10 ³

Çizelge 4.3. AISI 4340 çeliği kimyasal kompozisyonu

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
%	0,38-0,43	0,15-0,30	0,60-0,80	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00



Resim 4.8. İlk presleme sonucunda zımbası kırılan kalıp seti

Tozların sıkıştırılması

Metal tozları Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan 250 ton kapasiteli özel tasarım preste (Resim 4.9) sıkıştırılarak ham toz metal elektrotlar üretilmiştir. Her sıkıştırma işleminden önce kalıp iç yüzeyleri ve zımba dış yüzeyleri etil alkol-çinko stearat solüsyonu sürülerek yağlanmıştır.



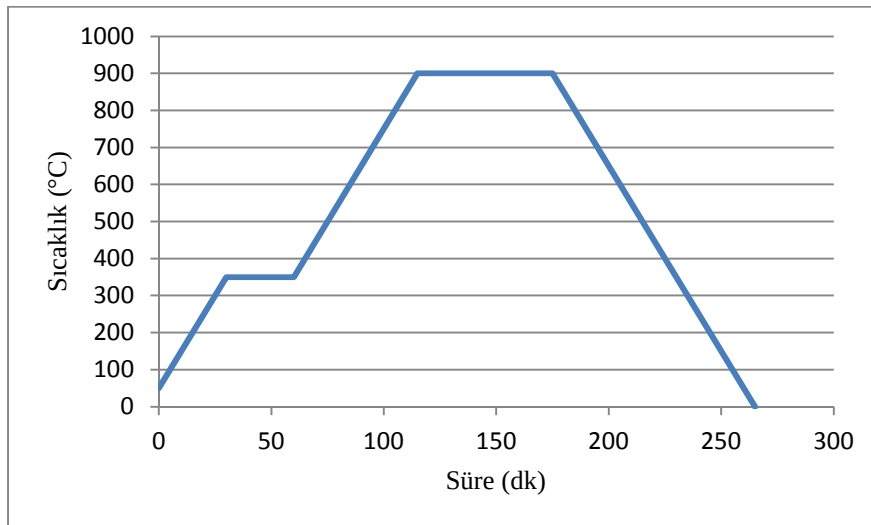
Resim 4.9. Toz metal elektrotların basıldığı pres tezgahı

4.2.3. Metal tozlarının sinterlenmesi

Metal tozlarının preslenmesiyle üretilen ham toz metal elektrotlar, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan MTI marka OTF-1200X model sinterleme fırınında (Resim 4.10) sinterlenerek toz metal elektrotlar elde edilmiştir. Sinterleme %99,999 saflıkta Argon gazı altında ve 3 lt/dk debide yapılmıştır. Sinterleme döngüsü Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Resim 4.10. Toz metal elektrotların sinterlendiği fırın



Şekil 4.1. Sinterleme döngüsü

4.2.4. Elektrotların yoğunluk ve gözenek miktarı ölçümleri

Elektrotların yoğunluk ve gözenek ölçümleri için öncelikle elektrotların hava ortamındaki ağırlıkları (M_{hava}) ve su ortamındaki ağırlıkları (M_{su}) ölçülmüştür. Daha sonra sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılarak yoğunluk ve gözenek miktarı bulunmuştur.

$$\text{Hacim} = m_{\text{hava}} - m_{\text{su}} \quad (4.1)$$

$$\text{Yoğunluk} = m_{\text{hava}} / \text{Hacim} \quad (4.2)$$

$$\text{Hacim Cu} = \% \text{ Hacim Cu} / \rho_{\text{Cu}} \quad (4.3)$$

$$\text{Hacim Cr/Mo} = \% \text{ Hacim Cr/Mo} / \rho_{\text{Cr/Mo}} \quad (4.4)$$

$$\text{Teorik Yoğunluk} = 100 / (\text{Hacim Cu} + \text{Hacim Cr/Mo}) \quad (4.5)$$

$$\% \text{ Göreceli Yoğunluk} = 100 * (\text{Teorik Yoğunluk} / \text{Yoğunluk}) \quad (4.6)$$

$$\% \text{ Gözenek} = 100 - \% \text{ Göreceli Yoğunluk} \quad (4.7)$$

Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça gözenek miktarı artmıştır.
- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır.
- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; P_s arttıkça gözenek miktarı önce azalmış, sonra hemen hemen değişmemiştir.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Mo miktarı arttıkça gözenek miktarı artmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; P_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır.
- ✓ Genel olarak T/M elektrotlardaki gözenek miktarı ile, işleme sonucunda elektrot yüzeyinde biriken malzeme miktarı arasında doğru bir orantı olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. Elektrot yoğunluk ve gözenek miktarı ölçüm sonuçları

Elektrot No	Malzeme	Karıştırma Oranı (%)	P _s (MPa)	T _s (°C)	m _{hava}	m _{su}	Hacim	Yoğunluk	Hacim Cu	Hacim Cr/Mo	Teorik Yoğunluk	% Göreceli Yoğunluk	% Gözenek
CuCr1	Cu-Cr	85-15	700	900	1,81	1,56	0,25	7,14	9,48	2,08	8,64	82,7	17,3
CuCr2	Cu-Cr	65-35	700	900	1,60	1,35	0,24	6,48	7,25	4,86	8,24	78,6	21,4
CuCr3	Cu-Cr	75-25	700	900	1,76	1,50	0,25	6,94	8,37	3,47	8,44	82,3	17,7
CuCr4	Cu-Cr	75-25	700	800	1,29	1,10	0,19	6,78	8,37	3,47	8,44	80,4	19,6
CuCr5	Cu-Cr	75-25	700	850	1,89	1,61	0,27	6,78	8,37	3,47	8,44	80,4	19,6
CuCr6	Cu-Cr	75-25	800	900	1,56	1,33	0,22	6,92	8,37	3,47	8,44	82,1	17,9
CuCr7	Cu-Cr	75-25	600	900	2,00	1,70	0,29	6,75	8,37	3,47	8,44	80,0	20,0
E-Cu	Elektrolitik Cu	-	-	-	1,93	1,71	0,21	8,95	-	-	8,96	99,9	0,1
CuMo1	Cu-Mo	85-15	700	900	2,51	2,20	0,31	8,09	9,48	1,45	9,13	88,6	11,4
CuMo2	Cu-Mo	65-35	700	900	1,81	1,58	0,22	7,92	7,25	3,40	9,38	84,5	15,5
CuMo3	Cu-Mo	75-25	700	900	1,99	1,74	0,24	7,99	8,37	2,43	9,25	86,4	13,6
CuMo4	Cu-Mo	75-25	700	800	1,78	1,55	0,22	7,82	8,37	2,43	9,25	84,6	15,4
CuMo5	Cu-Mo	75-25	700	850	1,54	1,35	0,19	7,89	8,37	2,43	9,25	85,3	14,7
CuMo6	Cu-Mo	75-25	800	900	1,67	1,46	0,20	8,07	8,37	2,43	9,25	87,2	12,8
CuMo7	Cu-Mo	75-25	600	900	1,71	1,49	0,21	7,81	8,37	2,43	9,25	84,5	15,5

4.3. Elektro Erozyon Tezgâhı

Deneysel çalışmalar, TUSAŞ (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.) tesislerinde bulunan Furkan EDM M100A elektro erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.11).



Resim 4.11. Tez çalışmasında kullanılan EEİ tezgahı (Furkan EDM M100A)

4.4. İşleme Parametreleri

Bütün deneylerde boşalım akımı (i_e), vurum süresi (t_i), dielektrik sıvı uygulama basıncı ve şekli, kutuplama, bekleme süresi (t_o), dielektrik sıvı tipi, işparçası ve işleme süresi sabit tutulmuştur. Çizelge 4.5'te tez çalışmasında kullanılan işleme parametreleri sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_e) [A]	2
Vurum Süresi (t_i) [μ s]	25
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (t_o) [μ s]	25
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı
İşparçası Malzemesi	SAE 1040
Çalışma bekleme	∞
Servo Gerilimi [V]	40-60
İşleme Süresi [dk]	60

4.5. İş Parçası

Tez çalışmasında iş parçası olarak SAE 1040 çeliği (189 BS) kullanılmıştır. Bu çeliğin malzeme özellikleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. İşparçası malzemesinin (SAE 1040) özellikleri

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Fe
%	0,3754	0,208	0,744	0,0081	0,0269	0,0727	0,0148	0,097	0,0183	0,0243	0,1495	0,0915	98,175

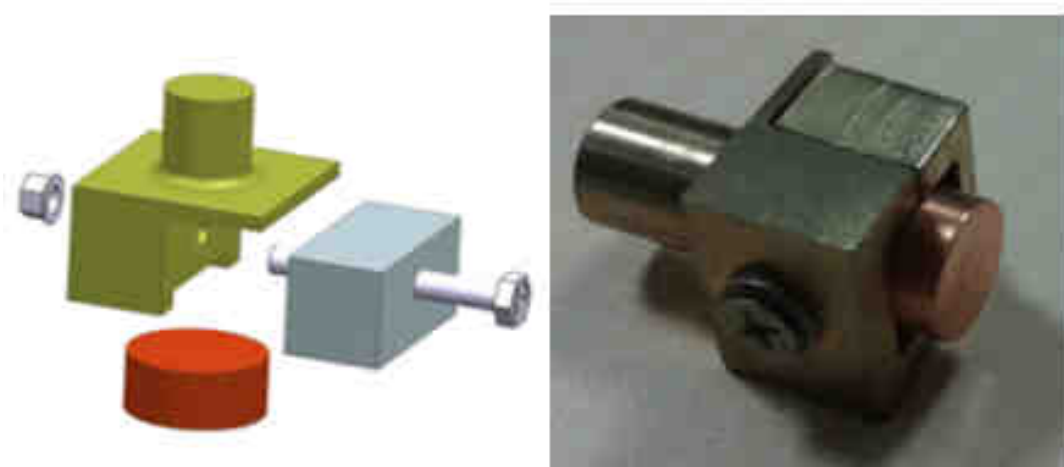
Literatür incelendiğinde elektro erozyonla işleme sonrasında yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik vb. ölçümlerin yapılması için iş parçasının testere veya tel elektro erozyonla kesildiği görülmüştür. Fakat bu şekilde bir işlemin, işlenmiş yüzeye zarar vereceği düşünüldüğünden, iş parçaları işleme öncesi 60×30×10 mm ölçülerinde kesilmiş ve üst ve yan iki yüzey taşlanmıştır (Resim 4.12). İşleme sırasında, iki adet iş parçası birleştirilerek sıkılmış ve birleşim çizgisi ortalanarak işleme yapılmıştır. Bu sayede işleme sonrasında ölçüm yapmak için, tek bir yarım iş parçasının, herhangi bir kesim işlemi yapmadan kullanımı sağlanmıştır.



Resim 4.12. İş parçaları

4.6. Elektrotların Tezgâha Bağlanması

Üretilen toz metal elektrotların elektro erozyon tezgâhına bağlanması için Resim 4.13'te ve EK-7'de gösterilen bağlama aparatı kullanılmıştır. İki parça olarak pirinç malzemedan üretilen bağlama aparatı M5 vida yardımı ile birleştirilerek, elektrotun tutulması sağlanmıştır. Sinterlemeden sonra elektrotların üst ve alt yüzeylerindeki paralellik hassasiyeti kaybolduğu için, elektrotlar bağlama aparatına bağlanmadan önce üst ve alt yüzeyleri tornada düz hale getirilmiş ve aparata bağlandıktan sonra da yüzey paralelliği high gage (Resim 4.14) yardımı ile kontrol edilmiştir. Tezgâha bağlanmış elektrot, iş parçası ve bağlama aparatı Resim 4.15'te gösterilmiştir.



Resim 4.13. Toz metal elektrot bağlama aparatı



Resim 4.14. Elektrotların yüzey paralelliğinin kontrolünde kullanılan high gage



Resim 4.15. Tezgâha bağlanmış elektrot, iş parçası ve bağlama aparatı

4.7. Ölçümlerin Alınması

İş parçası işleme hızının (İİH) tespiti: Frezeleme ve taşlama neticesinde 60×30×10 mm ölçülerine getirilmiş iş parçası aseton ile temizlenip basınçlı hava ile kurutulmuştur. İş parçaları, TUSAŞ tesislerinde bulunan 0,01 g hassasiyetli Sartorius marka, GC 1603 S-OCE model dijital terazide tartılmıştır. Deneylerden sonra iş parçaları benzer temizleme ve kurutma işlemlerine tabi tutulup, yeniden tartılmıştır. Elde edilen deney öncesi ve deney sonrası ağırlık bilgileri iş parçasının yoğunluk değerine (7,8 g/cm³) bölünerek, işleme öncesi ve sonrası iş parçası hacmi hesaplanmıştır. İşleme öncesi ve sonrası iş parçası hacim farkı işleme süresine bölünerek iş parçası işleme hızı, İİH [mm³/dk], değerleri elde edilmiştir.

Elektrot aşınma hızının (EAH) tespiti: İş parçası işleme hızının tespitinde olduğu gibi, elektrotların ölçülen deney öncesi ve deney sonrası ağırlık bilgileri kompozit elektrotun yoğunluk değerine bölünerek, işleme öncesi ve sonrası elektrot hacmi hesaplanmıştır. İşleme öncesi ve sonrası elektrot hacim farkı işleme süresine bölünerek elektrot aşınma hızı, EAH [mm³/dak], değerleri elde edilmiştir. Kompozit elektrotların yoğunluk değerleri hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılmıştır;

$$\rho_k V_k = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (4.1)$$

Bu denklemde;

ρ_k : kompozit elektrotun yoğunluğu [g/cm³]

V_k : kompozit elektrotun hacmi ($\pi r^2 h$) [cm³]

ρ_1 : birinci malzemenin yoğunluğu [g/cm³]

V_1 : birinci malzemenin hacmi [cm³]

ρ_2 : ikinci malzemenin yoğunluğu [g/cm³]

V_2 : ikinci malzemenin hacmi [cm³]

Bağlı aşınmanın (BA) tespiti: Bağlı aşınma değeri hesaplanırken elektrot aşınma hızı değeri, iş parçası işleme hızı değerine bölünüp 100 ile çarpılmıştır.

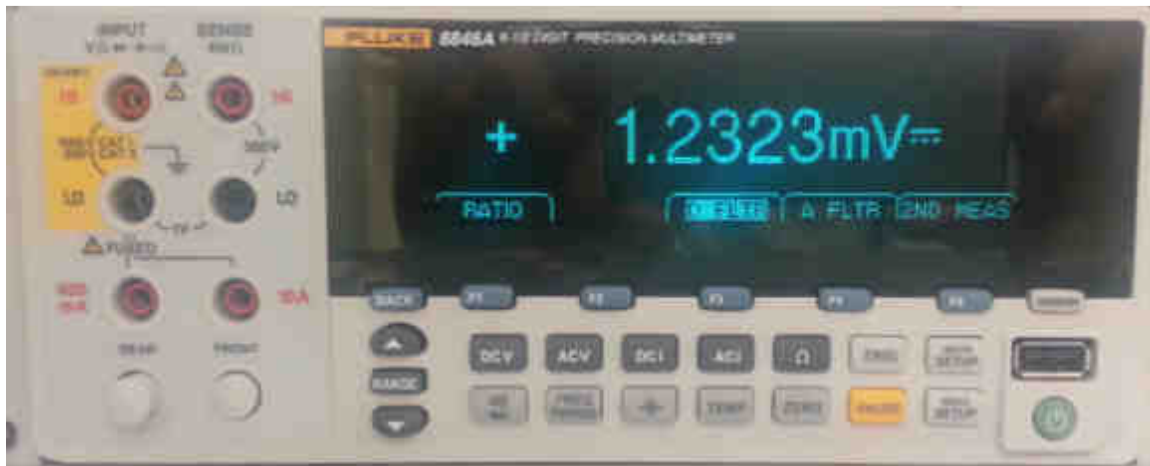
Yüzey pürüzlülüğünün tespiti: Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri TUSAŞ tesislerinde bulunan Mahr marka, MarSurf M300 model, MarSurf RD 18 detektör uçlu portatif yüzey

pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Ölçümlerde R_a ve R_z yüzey pürüzlülüğü parametreleri kaydedilmiştir.

Mikro sertliğin tespiti: İşlenmiş parçanın mikrosertliği Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan TTS/MATSUZAWA marka HWMMT-X3 model dijital mikrosertlik cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümlerde, 25, 50, 100, 200, 300 ve 1000 g yükler 10 s boyunca uygulanmış fakat elde edilen izler ölçüm almak için yeterli olmadığından, en son denemede 2000 g yük 10 s boyunca uygulanmıştır. İşleme kesiti boyunca beş farklı yerden ölçüm yapılmış, daha sonra ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Mikro yapının analizi: Mikro yapının, yüzeyde oluşan katman kalınlığının ve yüzey profilinin analizi için Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SEM Laboratuvarı'nda bulunan JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu (Resim 4.2) kullanılmıştır.

Elektrik iletkenlik ölçümü: Elektrotların elektrik iletkenlikleri TUSAŞ tesislerinde bulunan Fluke marka precision multimeterla ölçülmüştür (Resim 4.16).



Resim 4.16. Elektrik iletkenlik ölçümünde kullanılan cihaz

Cihazda ölçülen direnç değerleri yardımıyla, (4.2) numaralı formül kullanılarak elektrik iletkenlik değerleri 1/ohm.mm cinsinden ölçülmüştür.

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A} \quad (4.2)$$

Bu formülde;

L: Elektrot uzunluğu (mm)

A: Elektrot alanı (mm²)

R: Direnç (ohm)

σ : Elektrik iletkenlik (1/ohm.mm)

Korozyon ölçümü: İş parçalarının korozyon ölçümleri için Mikron Mühendislik firmasında bulunan korozyon test cihazı kullanılmıştır. Cihaza 15 numune yerleştirilmiş (Resim 4.17) ve 21 saat boyunca tuzlu suya maruz bırakılmıştır. Daha sonra işparçalarının yüzey görüntüleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SEM Laboratuvarı'nda bulunan JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskopunda elde edilmiş ve korozyona uğramış yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı bu görüntüler yardımıyla bulunmuştur.

Aşınma direnci ölçümü: İş parçalarının aşınma testleri için Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan özel tasarım aşınma test cihazı kullanılmıştır (Resim 4.18). Numunelerin işlenmemiş yüzeyleri, işlenmiş yüzeyleri ile aynı düzlemde olması için frezede işlenmiş (Resim 4.19), ardından cihaza bağlayabilmek için iki adet delik açılmıştır. Aşındırıcı olarak 4140 çeliğinden 12 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde parçalar üretilmiş ve ısıtma işlemiyle sertlikleri 52 HRC'ye çıkartılmıştır (Resim 4.20). Aşınma testleri 30 N yük altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. 5 mm/s hızda 50, 100, 250 ve 500 gidiş-geliş olacak şekilde aşındırıcıya ilerleme verilmiş ve 500 gidiş-gelişte uygun aşınmanın elde edildiği görülmüştür. Bu sayede toplamda 16 m temas yüzeyi sağlanmıştır (Resim 4.21). Deney öncesi ve sonrası iş parçalarının ağırlıkları ölçülerek mg cinsinden ağırlık kayıpları hesaplanmıştır.



Resim 4.17. Korozyon test cihazına yerleştirilmiş numuneler



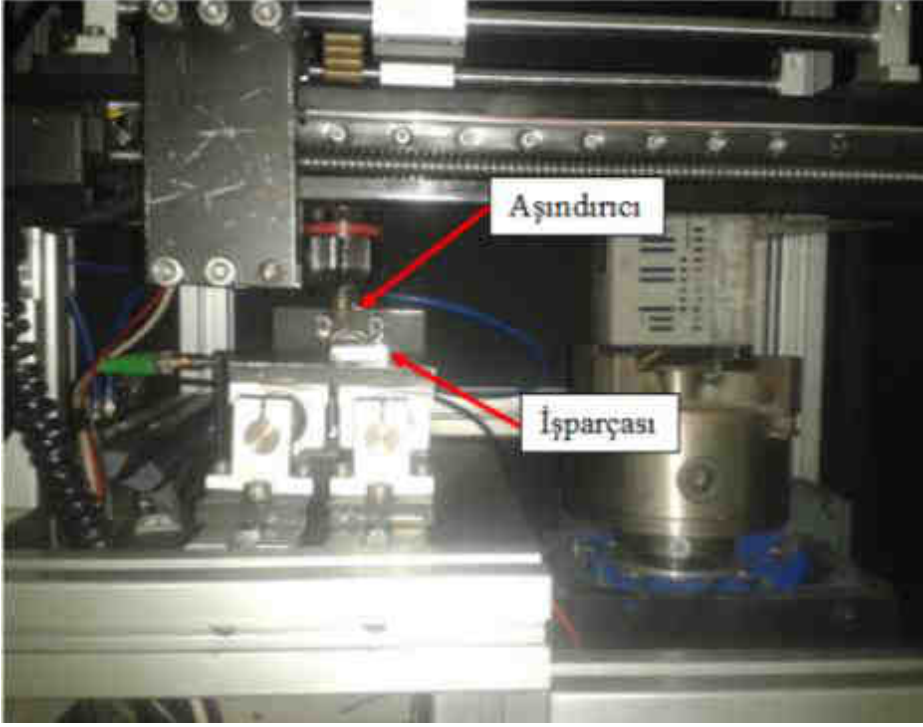
Resim 4.18. Aşınma test cihazı



Resim 4.19. Frezede işlenen numuneler



Resim 4.20. Aşındırmada kullanılan numuneler



Resim 4.21. Test cihazına bağlanan numuneler

5. DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Deneylerin Güvenilirliği

Yapılan deneylerin güvenilirliğini ölçmek için ilk etapta dört farklı elektrot için ikişer kez, toplamda sekiz adet deney yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te gösterilmiştir. Çizelgelerden de görülebileceği gibi ikili deney setlerinden elde edilen İİH, EAH, BA, R_a ve R_z değerleri arasında ciddi farklar ortaya çıkmamıştır. Bu da yapılan deneylerin ve kullanılan deney düzeneğinin doğruluğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları

Deney No	Elektrot	Deney Öncesi İş Parçası Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası İş Parçası Ağırlıkları (g)	İş Parçası Yoğunluğu (g/cm^3)	İİH (mm^3/dk)
1-a	Elektrolitik Cu	262,96	261,99	7,8	2,07
1-b	Elektrolitik Cu	260,32	259,34	7,8	2,10
2-a	T/M Cu	262,27	261,24	7,8	2,20
2-b	T/M Cu	261,68	260,62	7,8	2,26
3-a	%85Cu- %15Cr	260,53	259,12	7,8	3,01
3-b	%85Cu- %15Cr	262,05	260,67	7,8	2,95
4-a	%85Cu- %15Mo	260,86	259,85	7,8	2,16
4-b	%85Cu- %15Mo	261,43	260,38	7,8	2,24

Çizelge 5.2. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları

Deney No	Elektrot	Deney Öncesi Elektrot Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası Elektrot Ağırlıkları (g)	Elektrot Yoğunluğu (g/cm ³)	EAH (mm ³ /dk)
1-a	Elektrolitik Cu	14,25	14,18	8,96	0,13
1-b	Elektrolitik Cu	14,85	14,77	8,96	0,14
2-a	T/M Cu	14,12	14,06	8,96	0,11
2-b	T/M Cu	14,38	14,31	8,96	0,12
3-a	%85Cu- %15Cr	13,44	13,18	8,70	0,50
3-b	%85Cu- %15Cr	13,96	13,73	8,70	0,43
4-a	%85Cu- %15Mo	15,01	14,95	9,15	0,11
4-b	%85Cu- %15Mo	14,68	14,59	9,15	0,17

Çizelge 5.3. Deneylerin güvenilirliği için yapılan deney sonuçları

Deney No	Elektrot	Bağlı Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü, R _a (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü, R _z (µm)
1-a	Elektrolitik Cu	6,28	3,67	20,63
1-b	Elektrolitik Cu	6,45	3,60	20,42
2-a	T/M Cu	5,07	3,76	21,39
2-b	T/M Cu	5,49	3,88	21,62
3-a	%85Cu-%15Cr	16,54	4,16	24,43
3-b	%85Cu-%15Cr	14,66	4,21	24,06
4-a	%85Cu-%15Mo	5,07	3,49	21,49
4-b	%85Cu-%15Mo	7,45	3,48	21,78

5.2. Toz Metal Elektrotların Yüzey Analizleri

5.2.1. Elektrotların aşınma direnci ölçümleri

Literatürde daha çok işparçası yüzeyinin incelendiği görülmektedir. Elektro erozyonla işlemede elektrot aşınma hızının elektrotun mekanik aşınma direnci ile ilişkisini anlayabilmek için, tez kapsamında elektrotlar da aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Elektrotların aşınma testleri için Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan özel tasarım aşınma test cihazı kullanılmıştır. Deney öncesi ve sonrası elektrotların ağırlıkları ölçülerek mg cinsinden ağırlık kayıpları hesaplanmıştır.

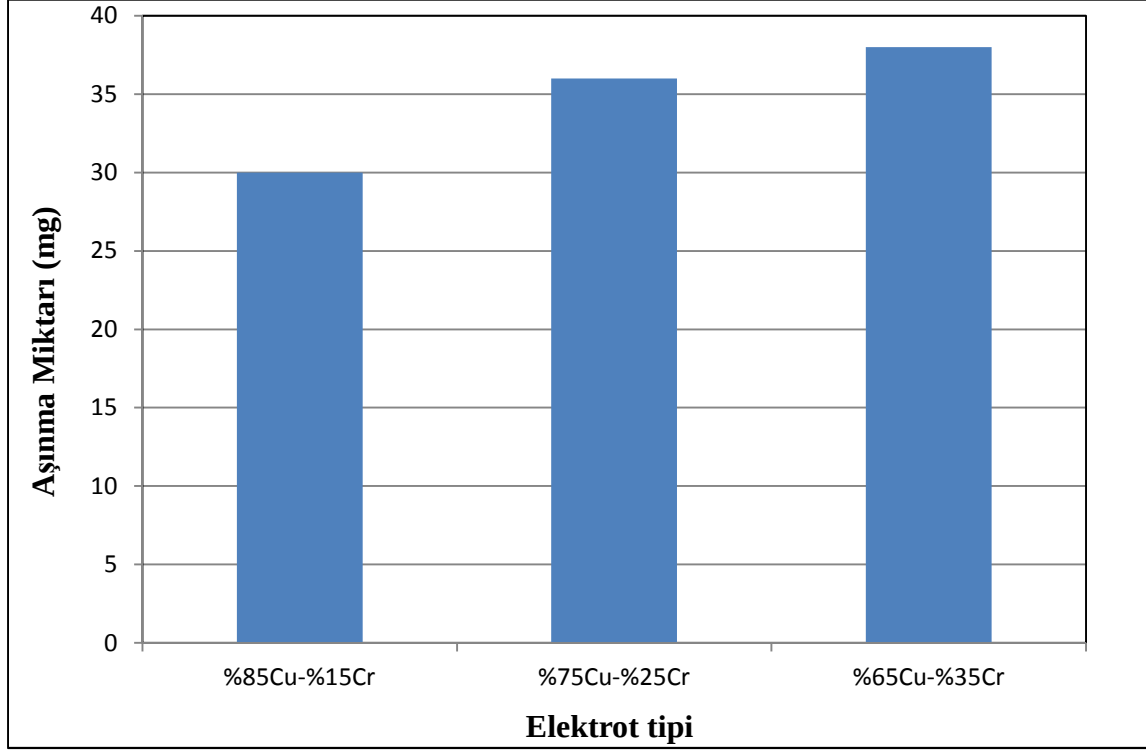
Deneylerden önce ve sonra ölçülen elektrot ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen aşınma değerleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Elektrotların aşınma direnci değerleri

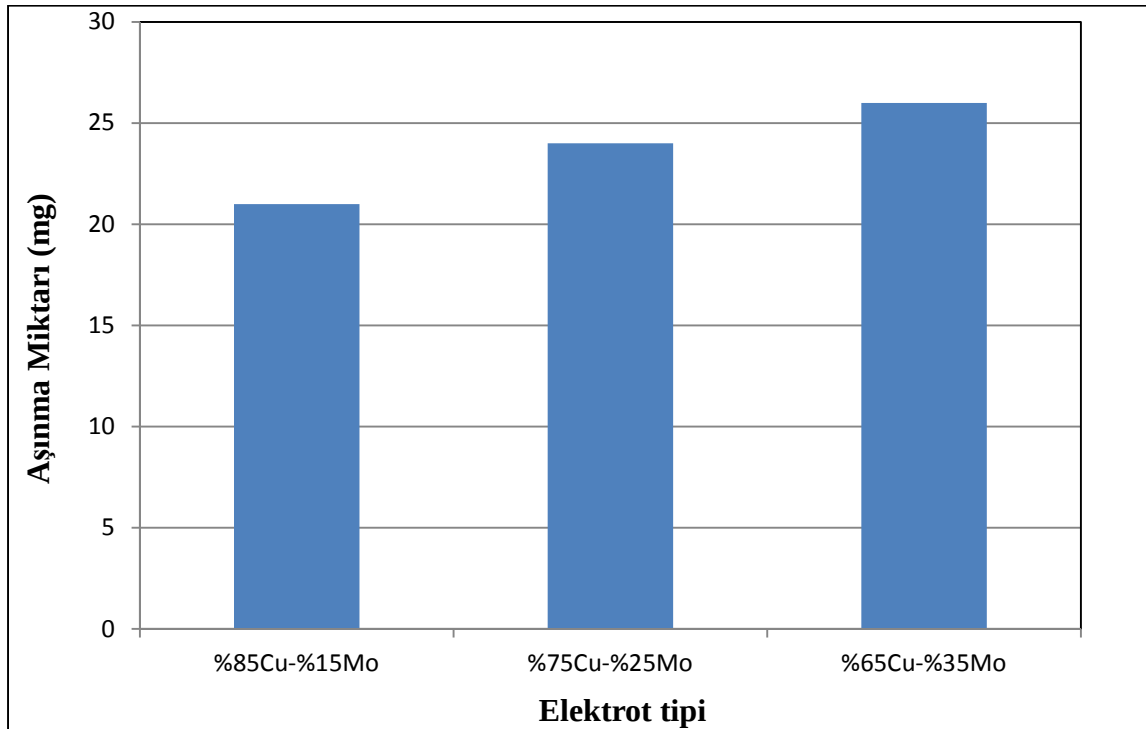
Elektrot No	Malzeme	K_t (%)	P_s (MPa)	T_s (°C)	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Aşınma (mg)
CuCr1	Cu-Cr	85-15	700	900	12,909	12,879	30
CuCr2	Cu-Cr	65-35	700	900	10,585	10,547	38
CuCr3	Cu-Cr	75-25	700	900	11,718	11,682	36
CuCr4	Cu-Cr	75-25	800	900	12,661	12,637	24
CuCr5	Cu-Cr	75-25	600	900	12,223	12,184	39
CuMo1	Cu-Mo	85-15	700	900	14,064	14,043	21
CuMo2	Cu-Mo	65-35	700	900	12,759	12,733	26
CuMo3	Cu-Mo	75-25	700	900	13,295	13,271	24
CuMo4	Cu-Mo	75-25	800	900	13,912	13,889	23
CuMo5	Cu-Mo	75-25	600	900	13,785	13,756	29

Şekil 5.1'de Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının, Şekil 5.2'de ise Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının aşınma direncine etkisi gösterilmiştir. Şekillerden de

görülebileceği gibi, elektrot içerisine farklı bir malzeme katıldıkça, tozlar arası bağlanma azalmakta ve aşınma artmaktadır.

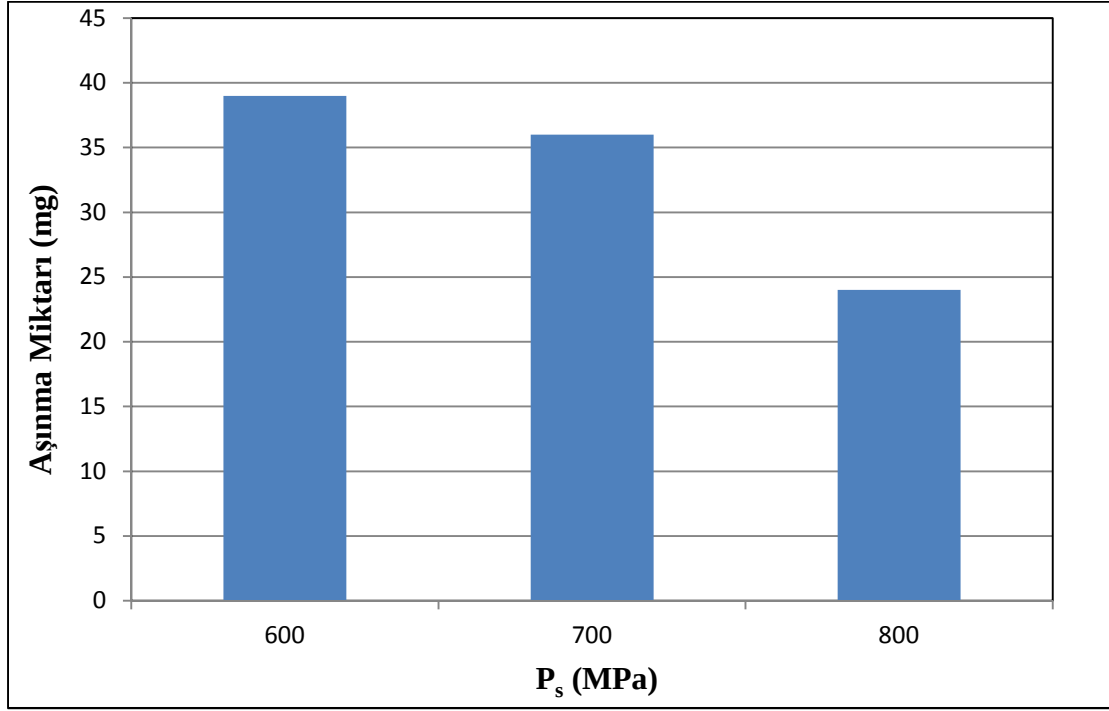


Şekil 5.1. Cr katkılı elektrotlar için elektrot aşınma direnci sonuçları

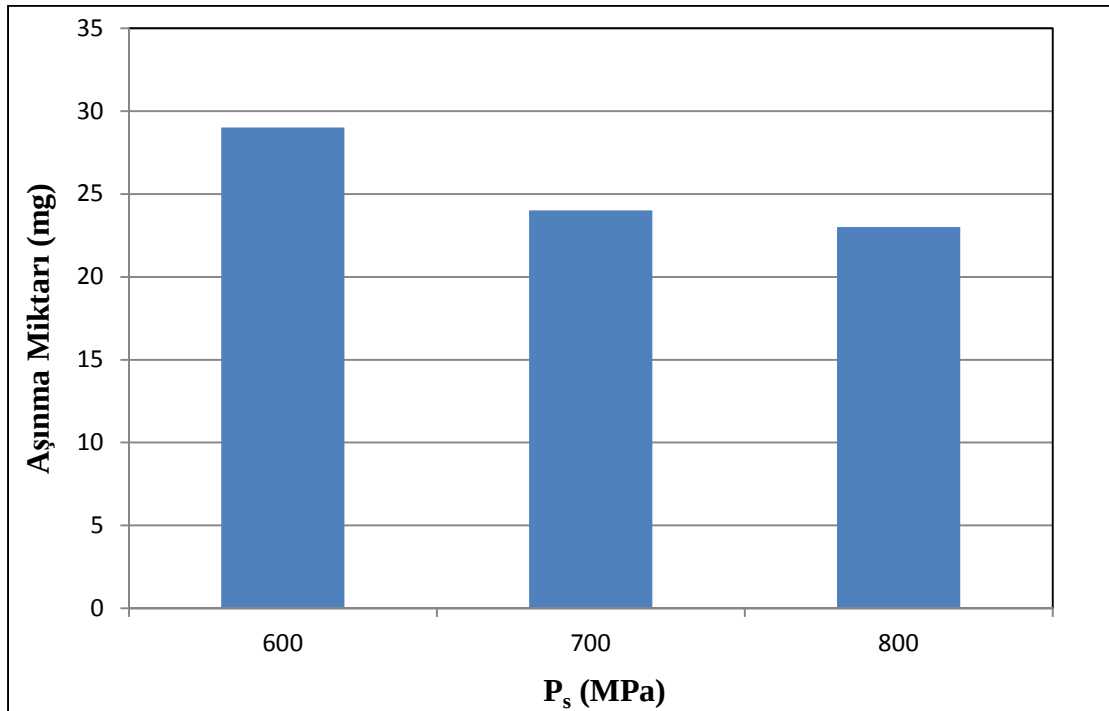


Şekil 5.2. Mo katkılı elektrotlar için elektrot aşınma direnci sonuçları

Şekil 5.3'te P_s 'nin Cu-Cr T/M elektrotların aşınma direncine, Şekil 5.4'te ise P_s 'nin Cu-Mo T/M elektrotların aşınma direncine etkileri gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, basınç arttıkça T/M elektrotun yoğunluğu artmakta, bu sayede aşınma azalmaktadır.



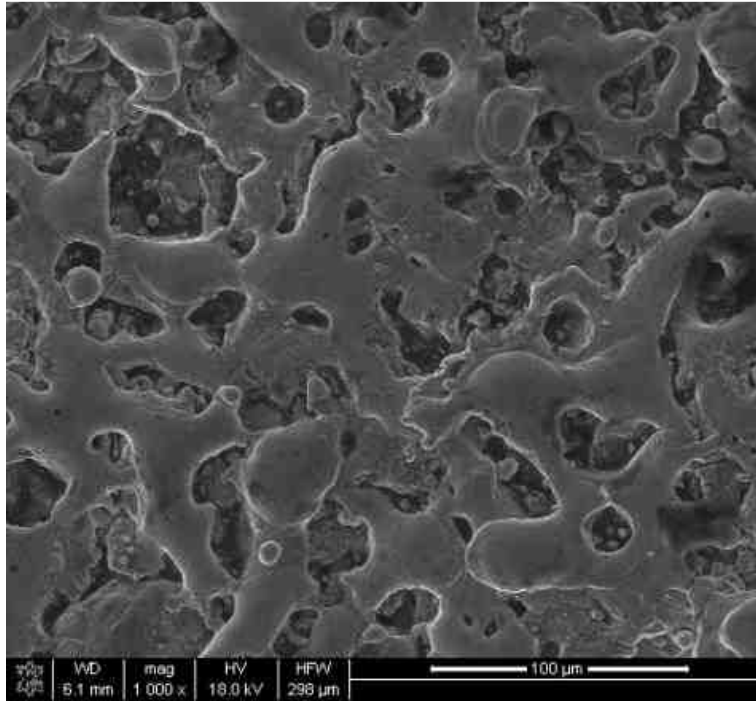
Şekil 5.3. Farklı P_s 'lerde üretilen Cr katkılı elektrotların aşınma direnci değerleri



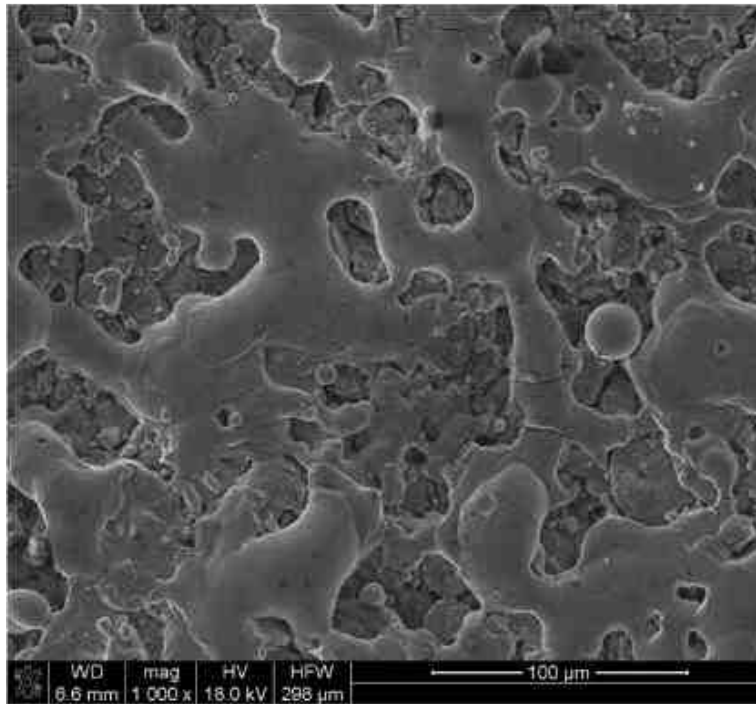
Şekil 5.4. Farklı P_s 'lerde üretilen Mo katkılı elektrotların aşınma direnci değerleri

5.2.2. Elektrot yüzeylerinin SEM analizleri

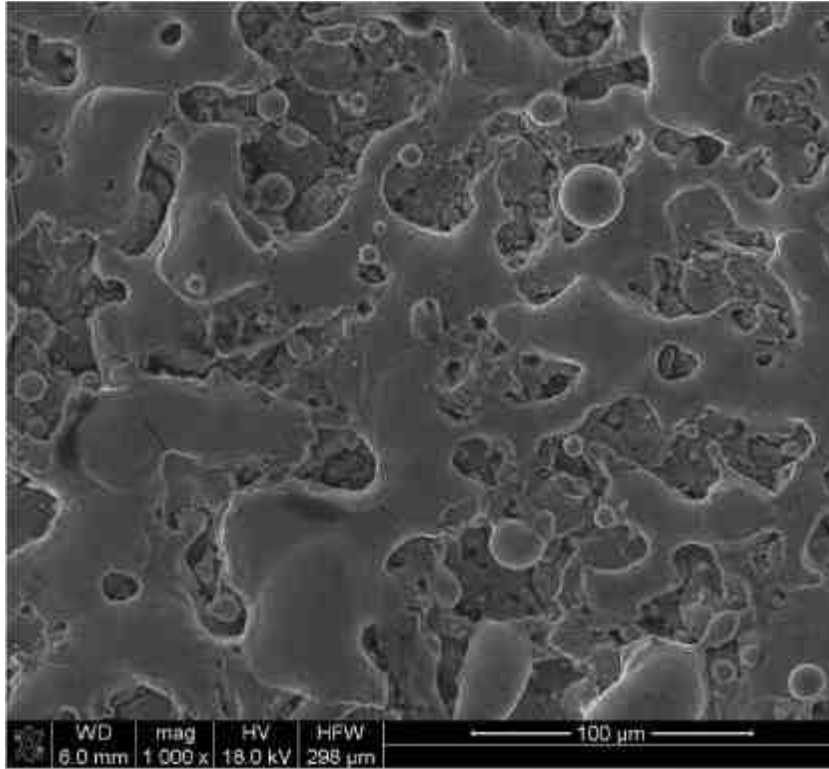
Elektrot yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.5-5.19 arasında gösterilmiştir.



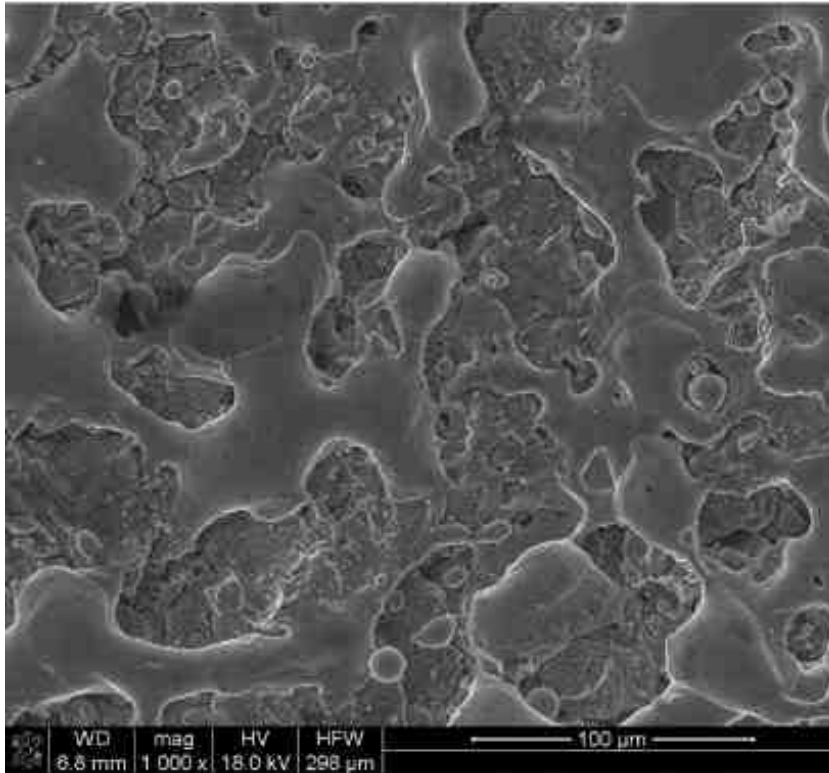
Şekil 5.5. CuCr1 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



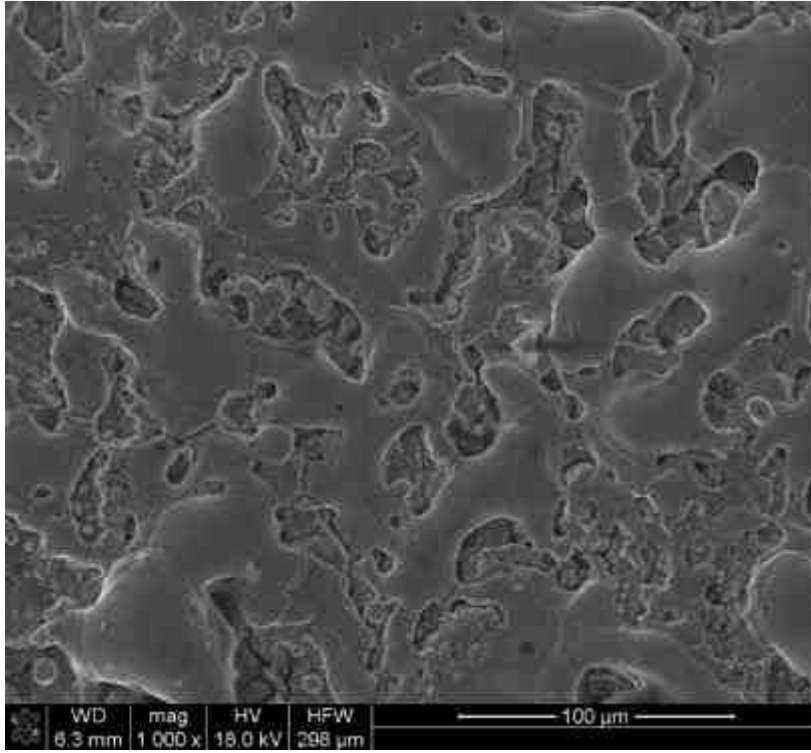
Şekil 5.6. CuCr2 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



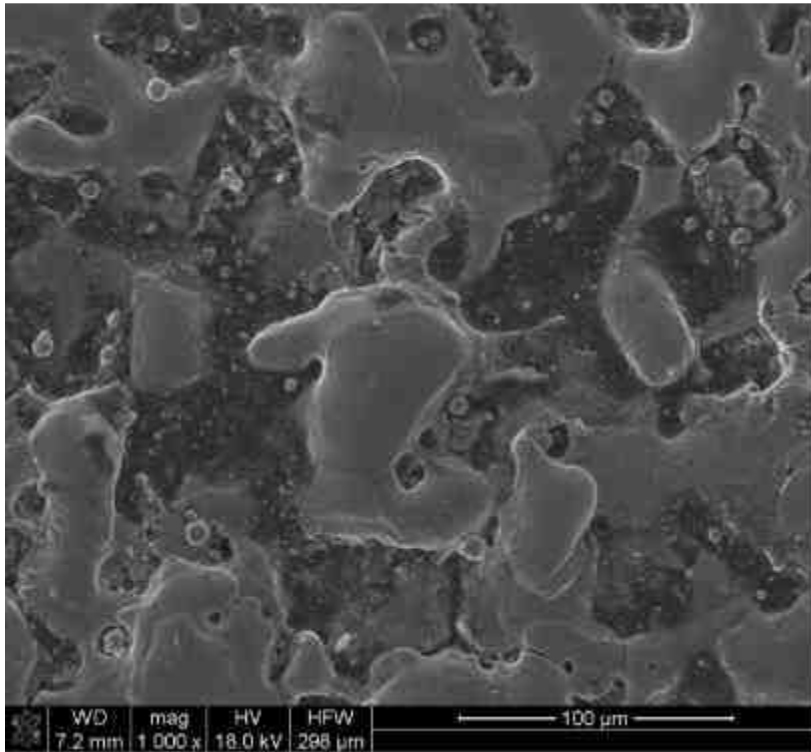
Şekil 5.7. CuCr3 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



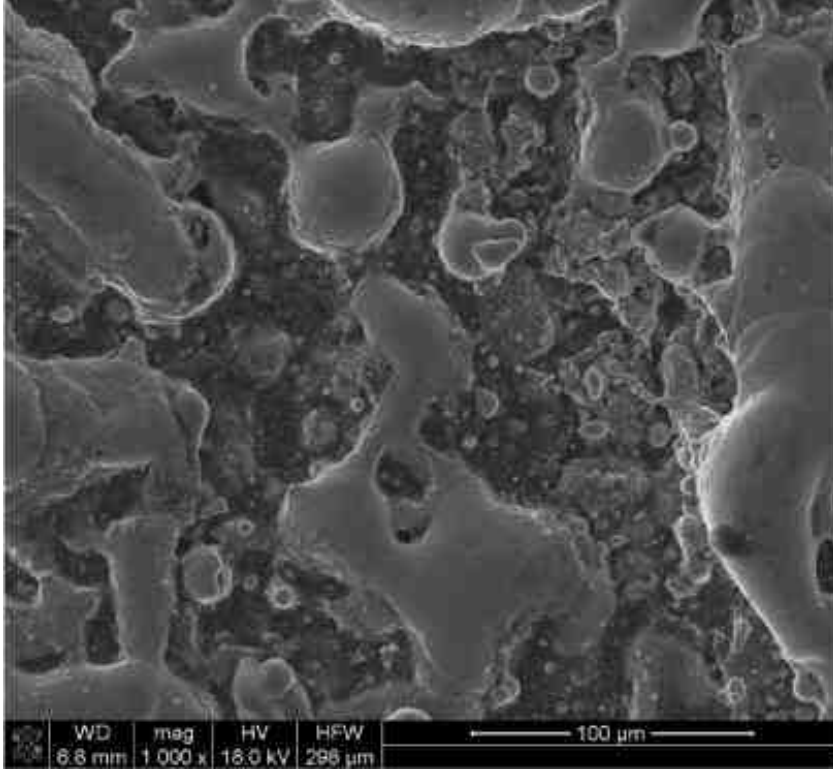
Şekil 5.8. CuCr4 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



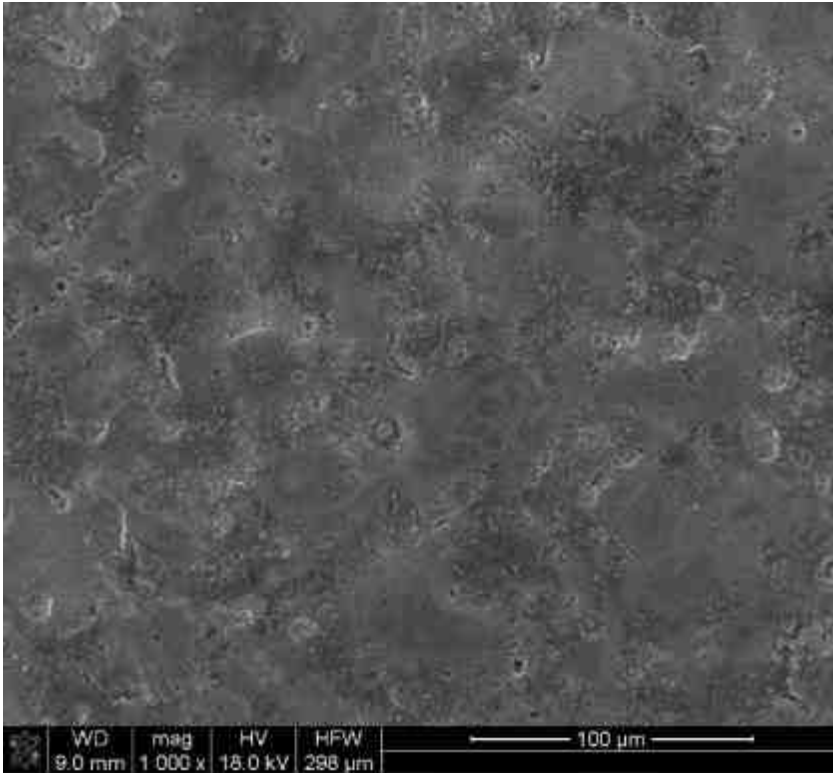
Şekil 5.9. CuCr5 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



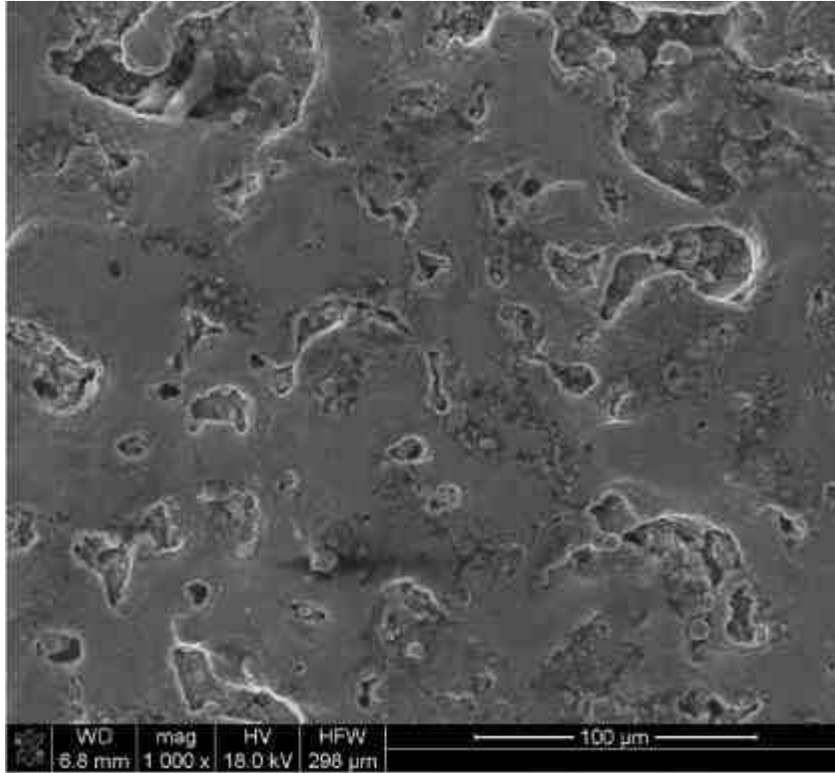
Şekil 5.10. CuCr6 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



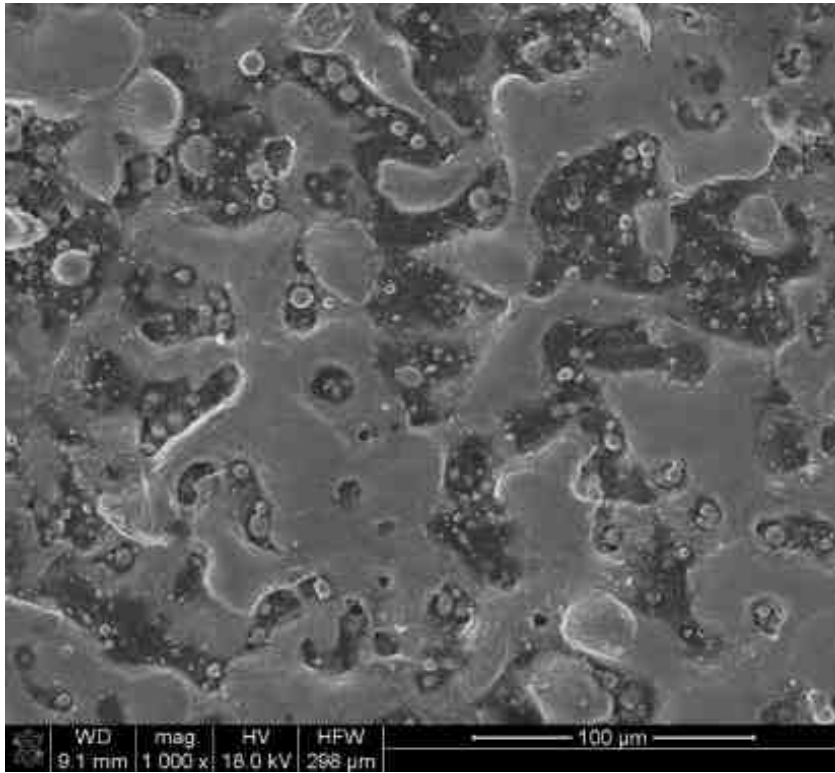
Şekil 5.11. CuCr7 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



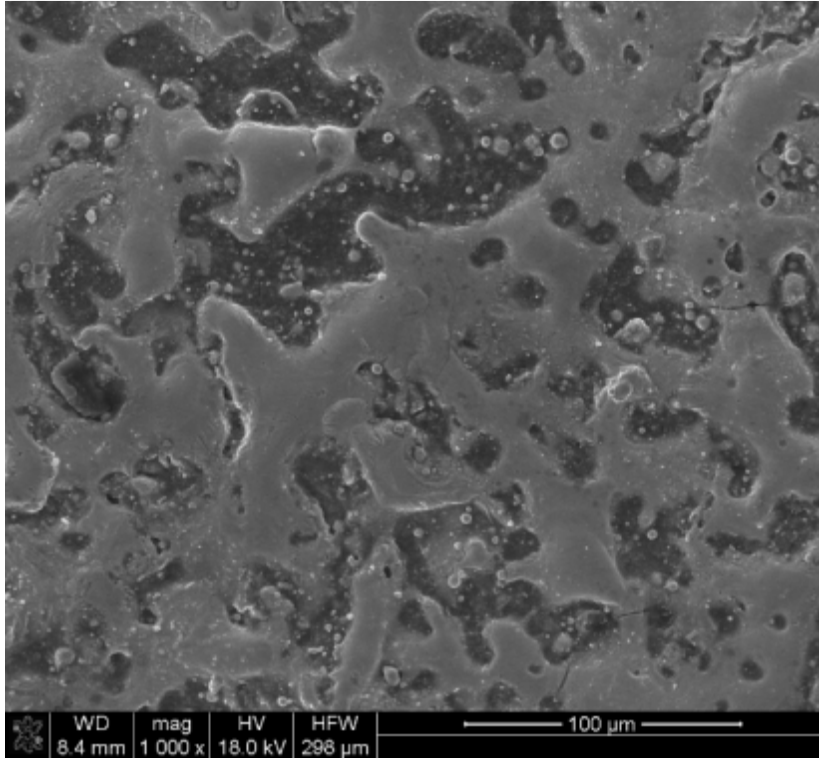
Şekil 5.12. E-Cu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



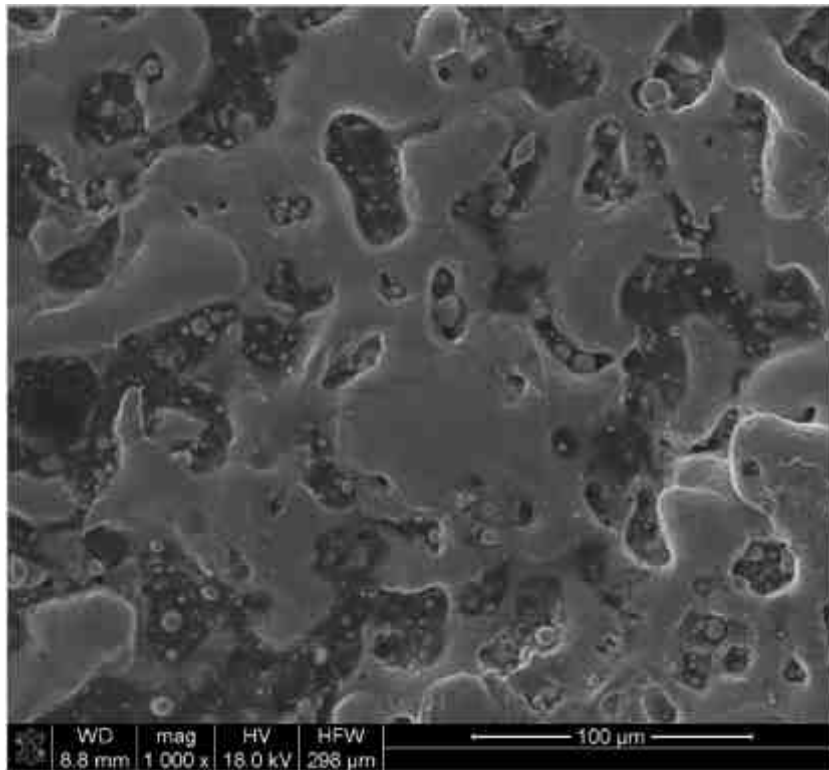
Şekil 5.13. CuMo1 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



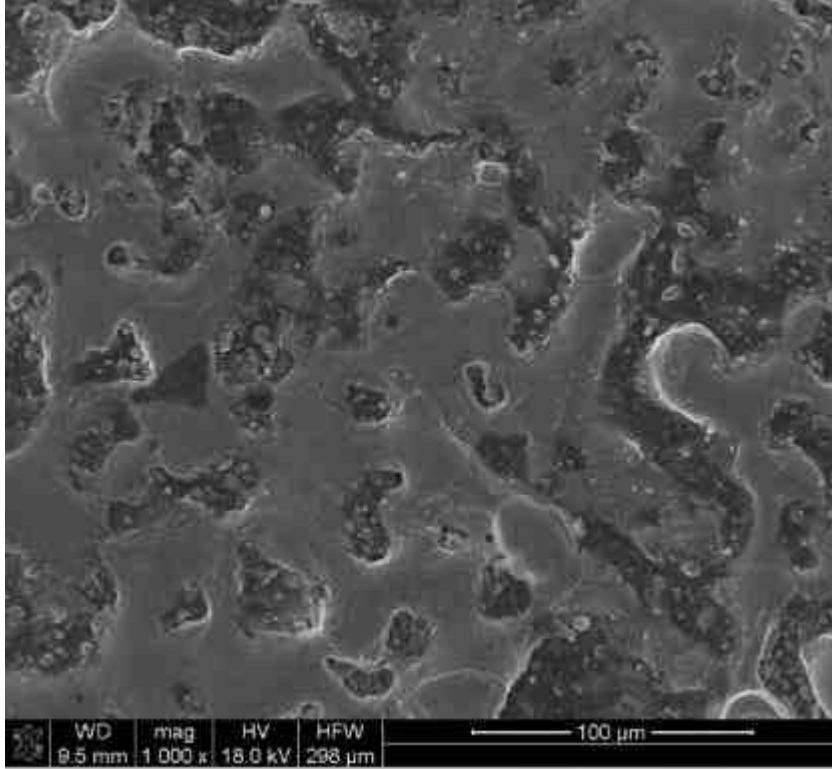
Şekil 5.14. CuMo2 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



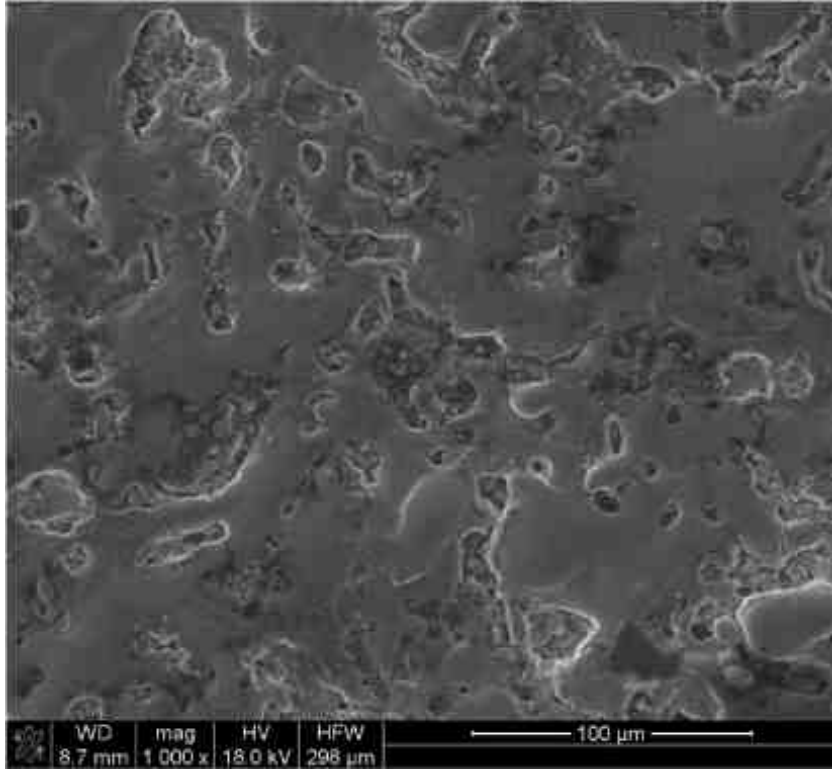
Şekil 5.15. CuMo3 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



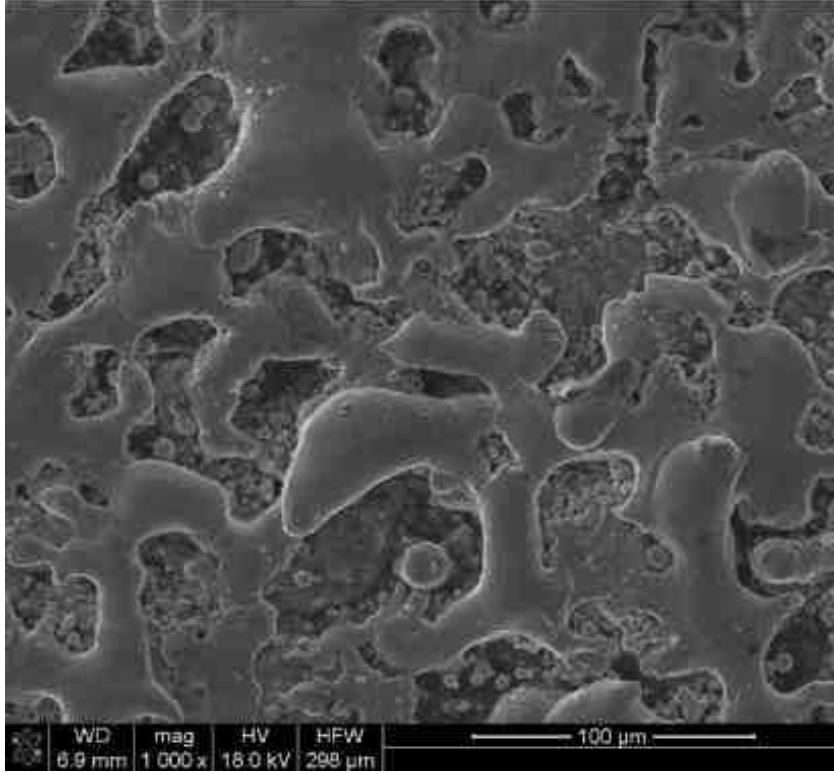
Şekil 5.16. CuMo4 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



Şekil 5.17. CuMo5 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



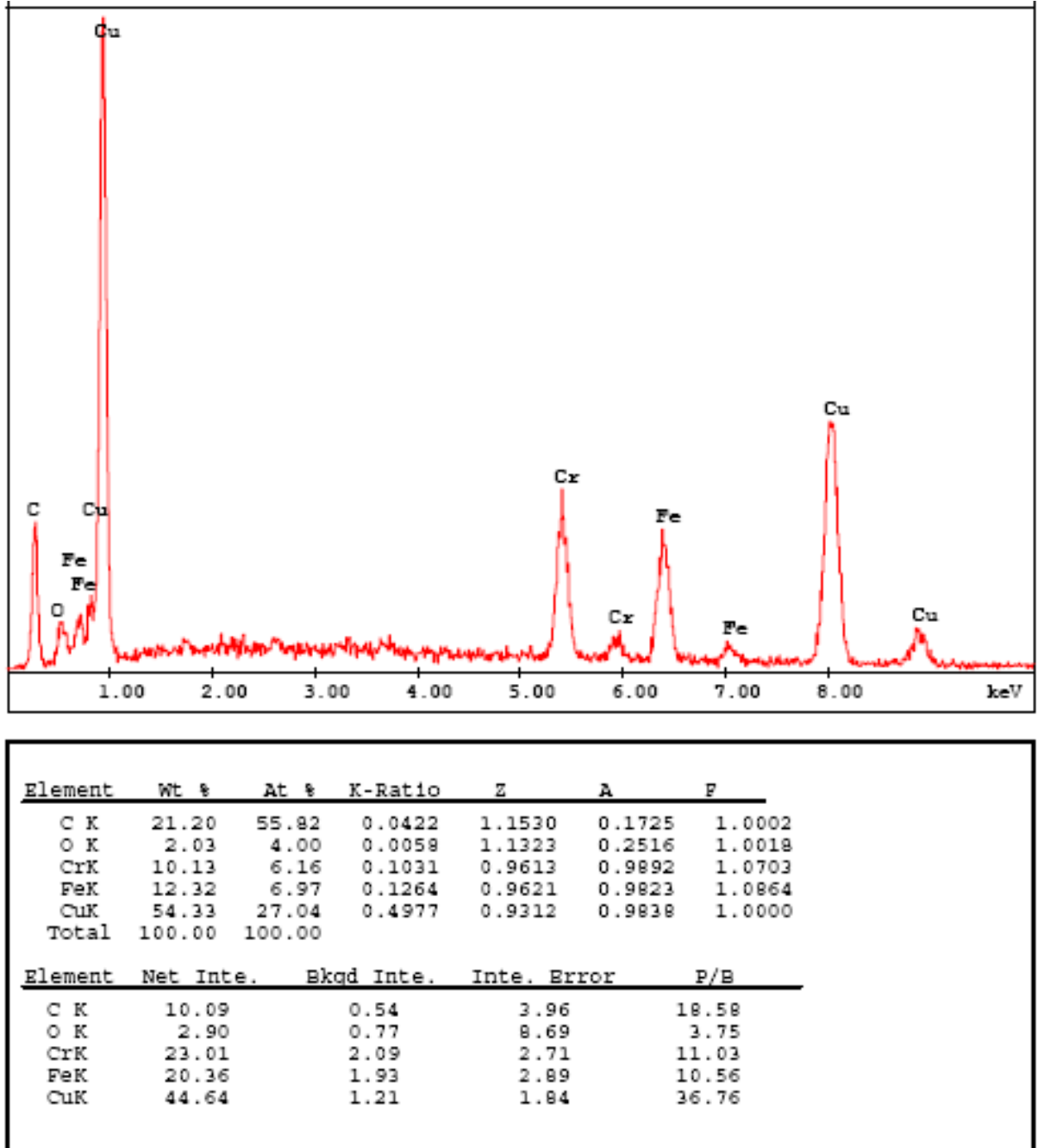
Şekil 5.18. CuMo6 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü



Şekil 5.19. CuMo7 nolu elektrot için yüzey SEM görüntüsü

5.2.3. Elektrot yüzeylerinin EDS analizleri

İşlemeden sonra elektrot yüzeylerinde biriken malzeme miktarı ve cinsi, EDS analizleri yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 5.20’de örnek bir EDS analizi verilmiştir. Çizelge 5.5’te elektrot yüzeylerinde biriken malzeme miktarı ve cinsi tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 5.20. CuCr1 nolu elektrot için yüzey EDS analizi

Çizelge 5.5. Elektrot yüzeylerinde biriken malzeme miktarı

Elektrot No	Malzeme	Karıştırma Oranı (%)	P _s (MPa)	T _s (°C)	C (%)	O (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	Cu (%)
CuCr1	Cu-Cr	85-15	700	900	21,20	2,03	10,13	-	12,32	54,33
CuCr2	Cu-Cr	65-35	700	900	19,05	1,47	18,24	-	26,40	34,85
CuCr3	Cu-Cr	75-25	700	900	18,16	1,21	16,55	-	21,32	42,75
CuCr4	Cu-Cr	75-25	700	800	18,25	1,16	14,17	-	18,71	47,71
CuCr5	Cu-Cr	75-25	700	850	18,07	1,19	17,68	-	19,52	43,55
CuCr6	Cu-Cr	75-25	800	900	31,15	0,98	13,52	-	11,94	42,41
CuCr7	Cu-Cr	75-25	600	900	33,61	1,04	10,22	-	19,18	35,95
E-Cu	Elektrolitik Bakır	-	-	-	27,10	0,76	-	-	23,82	48,32
CuMo1	Cu-Mo	85-15	700	900	29,22	0,72	-	11,60	10,50	47,96
CuMo2	Cu-Mo	65-35	700	900	29,80	0,77	-	12,92	16,64	39,86
CuMo3	Cu-Mo	75-25	700	900	29,88	0,73	-	15,32	15,87	38,20
CuMo4	Cu-Mo	75-25	700	800	28,54	1,08	-	11,23	14,20	44,96
CuMo5	Cu-Mo	75-25	700	850	28,60	0,62	-	14,94	13,95	41,88
CuMo6	Cu-Mo	75-25	800	900	23,05	1,15	-	20,11	10,12	45,57
CuMo7	Cu-Mo	75-25	600	900	20,85	1,24	-	15,14	15,72	47,05

Çizelge 5.5 incelendiğinde, işleme sırasında işparçasından eriyen Fe ve C'nin, ayrıca dielektrik sıvının bozulması neticesinde ortaya çıkan C'nin elektrot yüzeyine yapıştığı görülmektedir. Yüzeyde biriken Fe ve C miktarının karıştırma oranı, P_s ve T_s ile değişimi incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Mo miktarı arttıkça yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır.
- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça yüzeyde biriken C miktarı düzenli olarak artmıştır.

5.3. Cr Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlar ile Yapılan İşleme Sonuçları

Cr tozları, Cu tozları ile ağırlıkça üç farklı K_t 'de (%85Cu-%15Cr, %75Cu-%25Cr, %65Cu-%35Cr) karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar 700 MPa basınçta sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma basıncının (P_s) etkisini görebilmek için %75Cu-%25Cr karışimli tozlar 600 ve 800 MPa'da da sıkıştırılmıştır. Elde edilen ham elektrotlar, elektro erozyon tezgâhında kullanılacak seviyeye gelmeleri için 900 °C'de sinterlenmişlerdir. Sinterleme sıcaklığının (T_s) etkisini görebilmek için 700 MPa'da preslenen %75Cu-%25Cr karışimli tozlar, ayrıca 850 ve 800 °C'de de sinterlenmiştir. Her bir elektrottan yedek olması açısından üçer adet, toplamda yirmi bir adet elektrot üretilmiştir. Elde edilen elektrotlar elektro erozyonla işleme tezgâhında denenmiş ve toplamda yedi adet deney yapılmıştır. Bu elektrotların performansı, T/M Cu ve elektrolitik Cu elektrotlar ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.6'da her bir deneyde kullanılan elektrotlar ve özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Cr tozu katkılı elektrotlarla yapılan deney değişkenleri

Elektrot No	Malzeme	K _t (%)	P _s (MPa)	T _s (°C)
CuCr1	Cu-Cr	85-15	700	900
CuCr 2	Cu-Cr	65-35	700	900
CuCr 3	Cu-Cr	75-25	700	900
CuCr 4	Cu-Cr	75-25	700	800
CuCr 5	Cu-Cr	75-25	700	850
CuCr 6	Cu-Cr	75-25	800	900
CuCr 7	Cu-Cr	75-25	600	900
E-Cu	Elektrolitik Cu	-	-	-
TM-Cu	T/M Cu	100-0	700	900

5.3.1. Elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

Elde edilen yedi farklı Cr-Cu kompozit T/M elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Cr tozu katkılı elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

Elektrot No	R (ohm)	L (mm)	A (mm ²)	σ (1/ohm.mm)
CuCr1	0,0007x10 ³	8,65	211,24	58,498x10 ³
CuCr 2	0,0046x10 ³	8,05	211,24	8,284x10 ³
CuCr 3	0,0033x10 ³	8,31	211,24	11,921x10 ³
CuCr 4	0,0064x10 ³	7,94	211,24	5,873x10 ³
CuCr 5	0,0047x10 ³	7,9	211,24	7,957x10 ³
CuCr 6	0,0024x10 ³	8,83	212,01	17,353x10 ³
CuCr 7	0,0044x10 ³	8,22	211,24	8,844x10 ³

Çizelge 5.7’den de anlaşılabileceği gibi elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça elektrik iletkenlik azalmaktadır (Elektrot No CuCr1, CuCr3, CuCr2). Bunun sebebi Cu’nun Cr’ye göre daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır. P_s arttıkça elektrik iletkenlik artmaktadır (Elektrot No CuCr7, CuCr3, CuCr6). Bunun sebebi, P_s’nin artmasıyla elektrot içerisinde bulunan tozların birbirlerine daha fazla mekanik alaşımlanmaları ve aralarında

elektrik iletken bir köprü oluşturmalarıdır. T_s 'nin artmasıyla da elektrik iletkenlik artmaktadır (Elektrot No CuCr4, CuCr5, CuCr3). Bunun sebebi ise T_s 'nin artmasıyla tozların birbirlerine daha fazla kaynaşmaları ve aralarındaki boşlukların azalmasıdır.

5.3.2. İİH sonuçları

Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen İİH değerleri Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

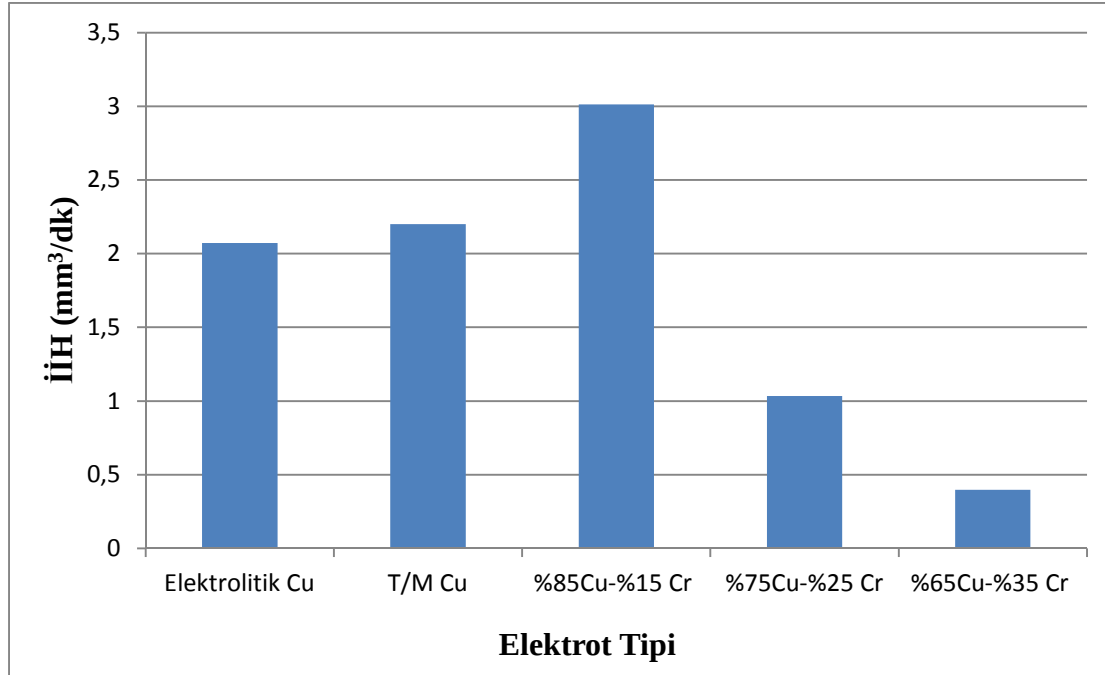
Şekil 5.21'de Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının İİH'ya etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Cr oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında İİH yaklaşık %66 azalmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %62 azalmıştır. %85 Cu-%15 Cr elektrot en yüksek İİH, %65 Cu-% 35Cr elektrot ise en düşük İİH değerlerini vermiştir. T/M Cu elektrot, elektrolitik Cu elektrota göre daha yüksek İİH değeri vermiştir. Literatürde, T/M elektrotların İİH değerleri elektrolitik Cu elektrotlarındaki ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha yüksek İİH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 4, 5, 18, 21]. Sonuçta, T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça İİH değerleri azalmıştır. Bu çalışmanın yazarı artan Cr miktarı ile İİH azalmasının elektrotun elektrik iletkenliği ile ilgili olduğunu düşünmektedir [23]. Cu, Cr'den daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu için, T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça, elektrotun elektrik iletkenliği azalmakta, işleme sırasında elektrot ile işparçası arasında daha az sayıda boşalım vurumu oluşmakta ve bu da sonuç olarak daha düşük İİH'na sebep olmaktadır. Ayrıca, elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça elektrottaki gözenek miktarı artmış, elektrot yüzeyinde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmış, elektrotun elektrik iletkenliği azalmış ve bunun sonucunda İİH azalmıştır. Bir diğer etkili sebep ise, Tsai ve arkadaşlarının da [3] belirttiği gibi, Cr miktarı arttıkça elektrotun bağlama kuvvetinin azalmasıdır. Bunun sonucunda, elektrottan daha fazla toz malzeme koparak işleme ortamında (dielektrik içinde) birikmekte, bu da işleme sürekliliğini ve verimini bozmaktadır (düşük İİH). Kompozit T/M elektrot içindeki Cu miktarının artması ile İİH'nın artacağı [36] numaralı referansta da belirtilmiştir. Bu çalışmada ZrB_2 -Cu elektrotlar kullanılmış ve Cu ile ZrB_2 arasındaki düşük bağlanma kuvvetinden dolayı, akım uygulandığında Cu ile ZrB_2 arasında kıvılcım oluşmayabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan, [2] numaralı referansta artan Cu oranı ile birlikte İİH'nın önce arttığı sonra azaldığı belirtilmiştir. Grafik incelendiğinde 700 MPa'da sıkıştırılan, 900 °C'de sinterlenen

%85Cu-%15Cr elektrotlar, elektrolitik Cu'ya göre daha yüksek İİH'ya sebep olmuştur. Bu da uygun koşullar ve parametreler kullanıldığında kompozit T/M elektrotların, geleneksel olarak elektro erozyonla işlemede en çok kullanılan elektrot malzemesi olan elektrolitik Cu'ya göre daha hızlı işleme gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

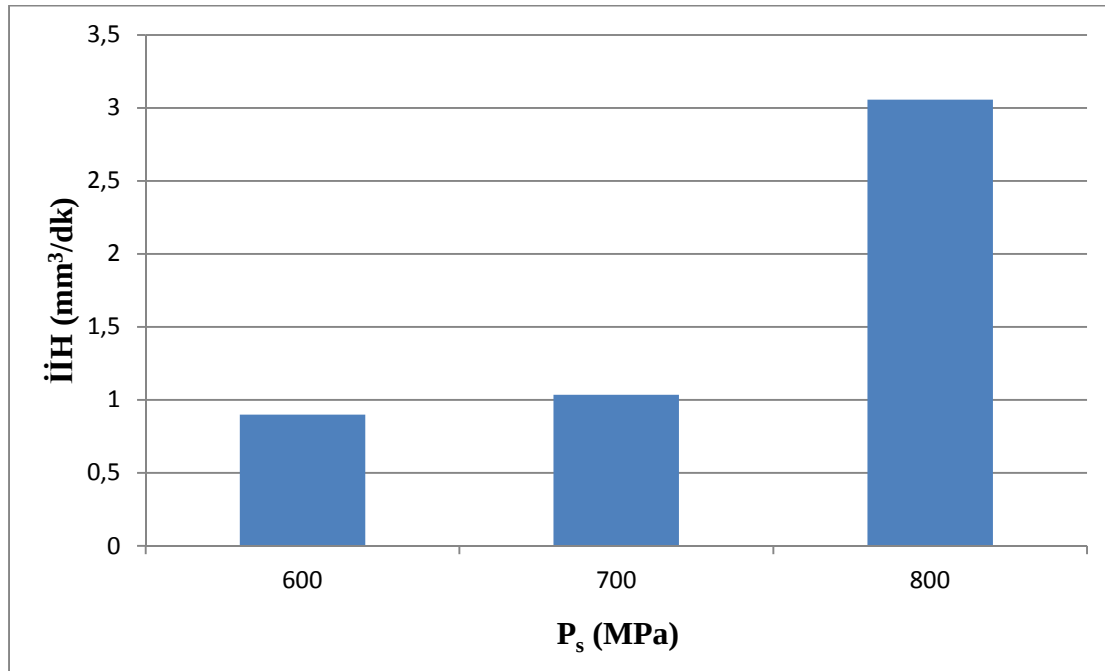
Çizelge 5.8. İİH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi İş Parçası Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası İş Parçası Ağırlıkları (g)	İş Parçası Yoğunluğu (g/cm ³)	İİH (mm ³ /dk)
CuCr1	260,53	259,12	7,8	3,01
CuCr2	262,22	262,03	7,8	0,40
CuCr3	256,75	256,27	7,8	1,03
CuCr4	260,83	260,77	7,8	0,13
CuCr5	256,18	256,01	7,8	0,36
CuCr6	261,91	260,48	7,8	3,06
CuCr7	261,47	261,05	7,8	0,90
E-Cu	262,96	261,99	7,8	2,07
TM-Cu	262,27	261,24	7,8	2,20

Şekil 5.22'de Cr-Cu tozlarının P_s değerlerinin İİH üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça İİH artmaktadır. P_s düşük olduğunda, toz tanecikleri birbirlerine gevşek bir şekilde bağlanmaktadır. Bu, çalışma aralığında (dielektrik sıvı içinde) elektrottan kopan fazla miktarda Cu ve Cr toz birikmesine ve sonuçta düşük İİH'ye sebep olmaktadır. P_s artırıldığında ise, toz tanecikleri birbirlerine daha kuvvetli bağlanmakta, yoğunluk ve elektrik iletkenlik artmaktadır [4, 7, 21]. P_s arttıkça gözenek miktarı önce azalmış, sonra hemen hemen değişmemiştir. Gözenek miktarının azalması ile elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu sayede de İİH artmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında İİH yaklaşık %15 artmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %195 artmıştır. Basınç 800 MPa'a çıkartıldığında elde edilen İİH değeri (3,06 mm³/dk), elektrolitik Cu ile yapılan işlemede elde edilen değerden (2,07 mm³/dk) fazladır. Bu da yukarıda belirtildiği gibi uygun koşullar ve parametreler kullanıldığında kompozit T/M elektrotlar yardımıyla, işleme hızının, elektrolitik Cu ile yapılan işlemlere göre, arttırılabileceğini göstermektedir.



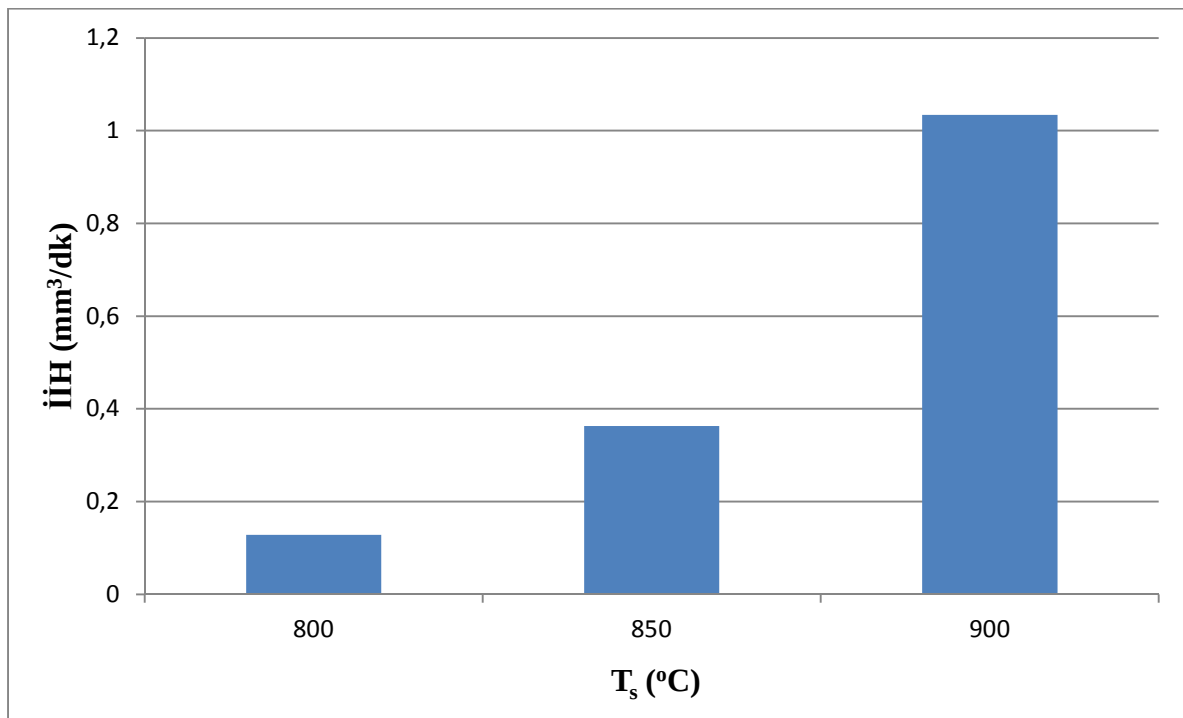
Şekil 5.21. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için İİH sonuçları



Şekil 5.22. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

T_s 'nin İİH üzerindeki etkisi Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça İİH ciddi oranda artmaktadır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında İİH yaklaşık %183 artarken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında yaklaşık %185 artmıştır. T_s arttıkça elektrottaki gözenek miktarı azalmış, elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu

sayede de İİH artmıştır. Her üç sıcaklıkta elde edilen İİH değerleri, elektrolitik Cu ile yapılan işlemde elde edilen değere göre düşük çıkmıştır. Dolayısıyla Cr katkılı T/M elektrotlarda İİH üzerinde P_s 'nin T_s 'den daha etkili olduğu yorumu yapılabilir. Literatürde, İİH üzerindeki P_s ve T_s etkisi [5, 7, 10, 12, 21, 29, 36] numaralı referanslarda da incelenmiş ve P_s ve/veya T_s 'nin artmasıyla daha yüksek İİH değerleri elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 5.23. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların İİH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

5.3.3. EAH sonuçları

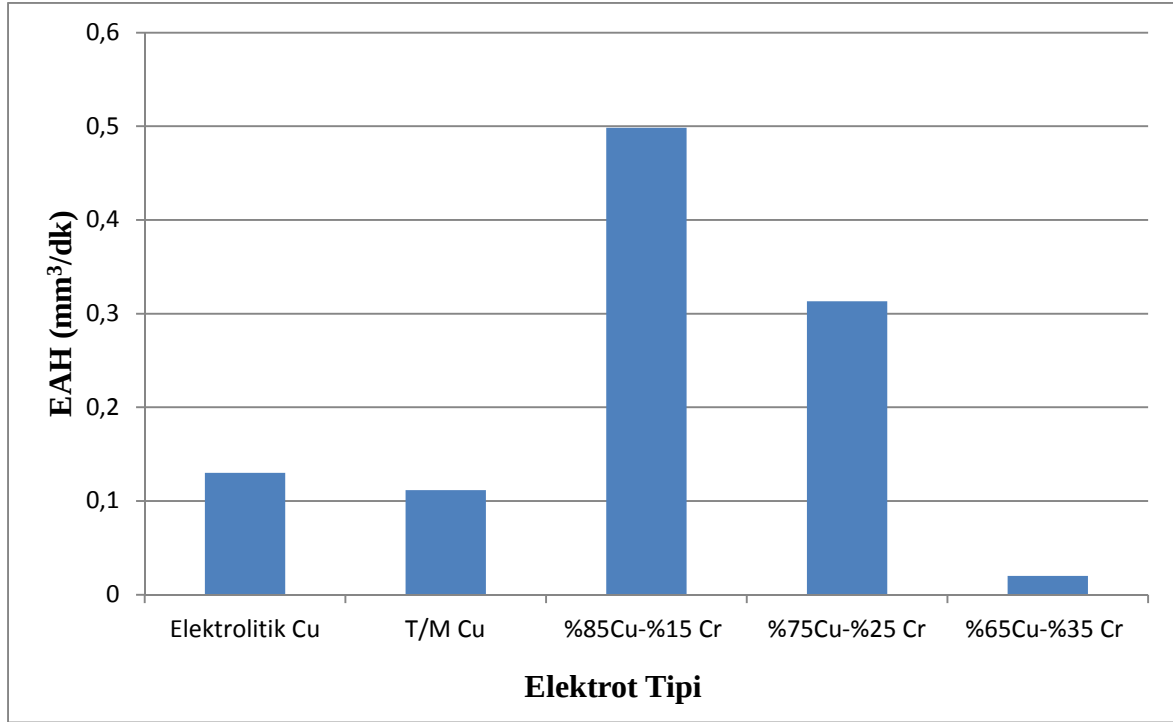
Deneylerden önce ve sonra ölçülen elektrot ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen EAH değerleri Çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Şekil 5.24'te Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının EAH üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi Cr miktarı arttıkça EAH azalmaktadır. Benzer bir yorum [2] numaralı referansta da yapılmıştır. Diğer taraftan, Cu oranının arttıkça EAH'nin azalacağı [2] numaralı referansta belirtilmiştir. Cr oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında EAH yaklaşık %37 azalmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %94 azalmıştır. Cr katkılı

elektrotlarda; elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça elektrottaki gözenek miktarı artmış, yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmış ve bunun sonucunda da EAH azalmıştır. Genel olarak Cr katkılı T/M elektrotların elektrolitik Cu ve T/M Cu'ya göre daha fazla aşındığı görülmektedir. Bunun sebebi, P_s ve T_s ne kadar artarsa artsın, elde edilen T/M elektrot, elektrolitik Cu kadar yoğun olamaz. Bundan dolayı işleme sırasında elektrottan Cr ve Cu tozları kopmaktadır. Bir kısmı dielektrik sıvısına karışan, diğer bir kısmı ise yüzeye alışımlanan bu tozlar yüzünden EAH artmaktadır. Literatürde, T/M elektrotların EAH değerleri elektrolitik Cu elektrotlarındaki ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha düşük EAH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 3, 5, 18, 36].

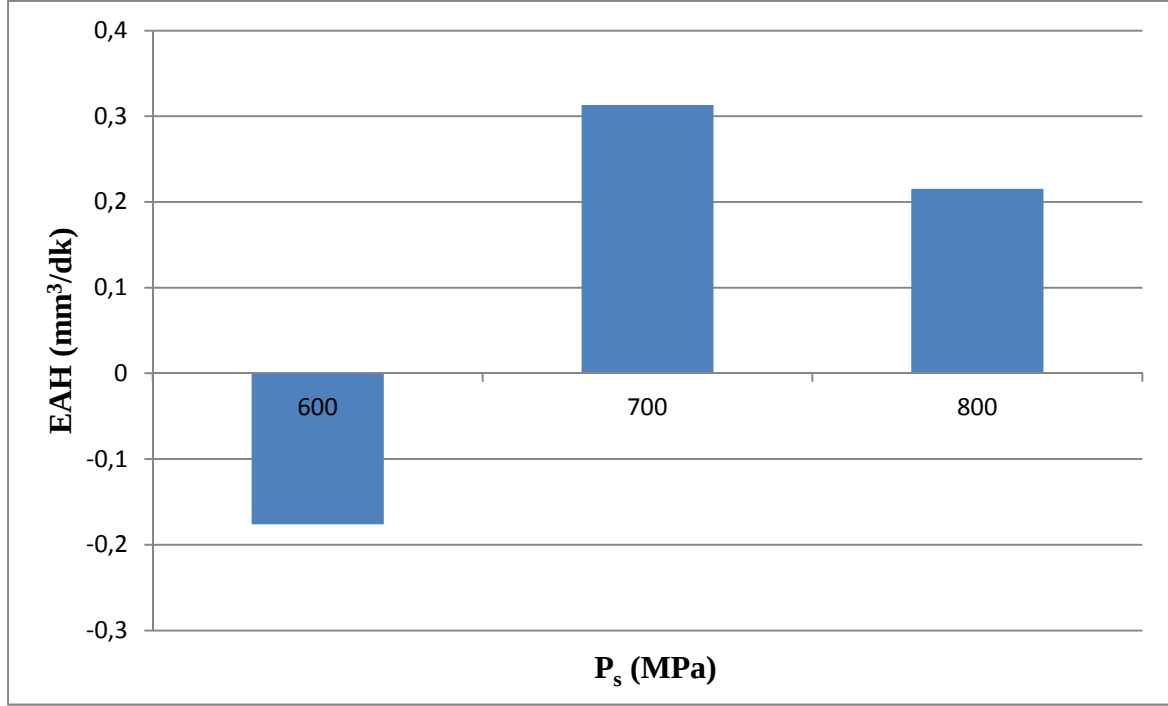
Çizelge 5.9. EAH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Elektrot Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası Elektrot Ağırlıkları (g)	Elektrot Yoğunluğu (g/cm^3)	EAH (mm^3/dk)
CuCr1	13,44	13,18	8,70	0,50
CuCr2	10,95	10,94	8,34	0,02
CuCr3	12,14	11,98	8,52	0,31
CuCr4	11,24	11,38	8,52	-0,27
CuCr5	12,49	12,46	8,52	0,06
CuCr6	11,48	11,37	8,52	0,22
CuCr7	11,38	11,47	8,52	-0,18
E-Cu	14,25	14,18	8,96	0,13
TM-Cu	14,12	14,06	8,96	0,11



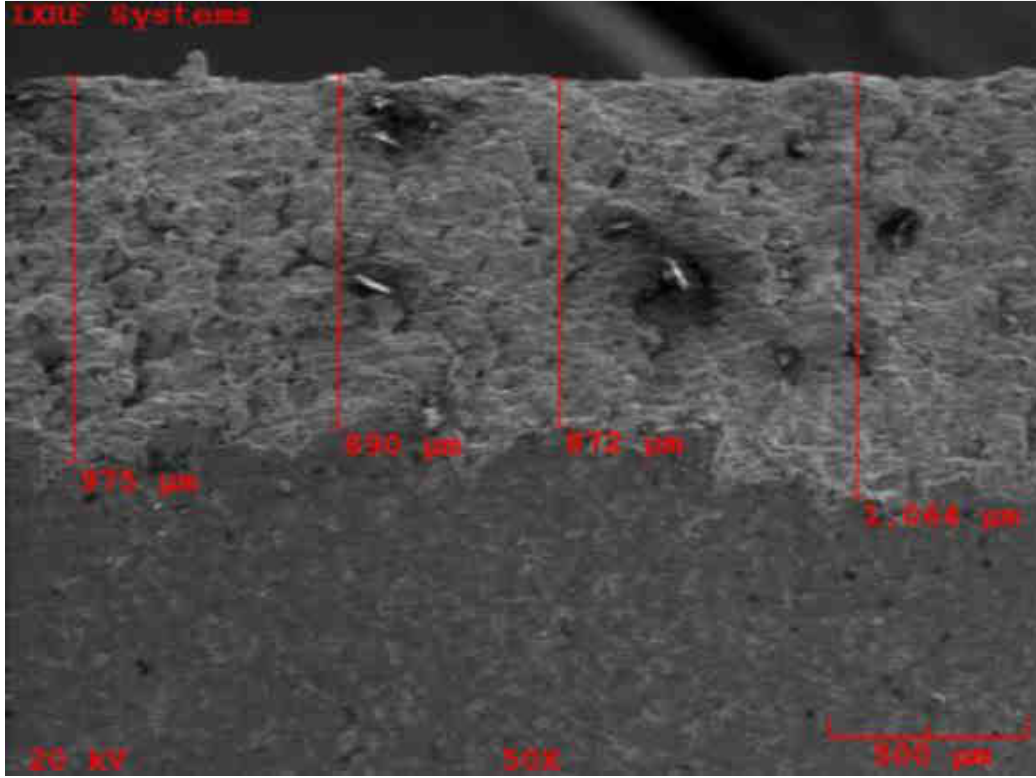
Şekil 5.24. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları

Şekil 5.25'te Cr-Cu tozlarının P_s değerlerinin EAH üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça önce EAH artmış, daha sonra azalmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında EAH yaklaşık %278 artmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %31 azalmıştır. Dikkat edilirse, 600 MPa'da sıkıştırılan elektrotlar için EAH negatif çıkmıştır. Yani elektrot üzerine biriken (kaplanan) malzeme miktarı, elektrottan kopan malzeme miktarından fazladır. İşleme sırasında işparçası yüzeyinden kopan ergimiş malzemenin elektrot yüzeyine yapıştığı daha önceki bir çalışmada da rapor edilmiştir [73].

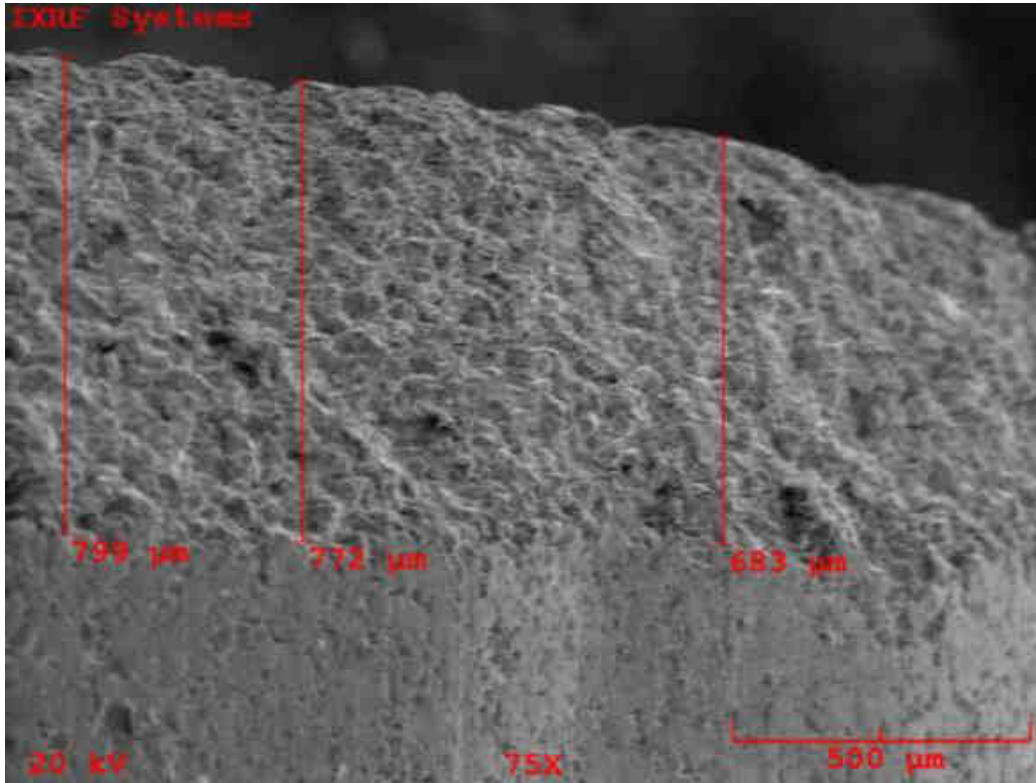


Şekil 5.25. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

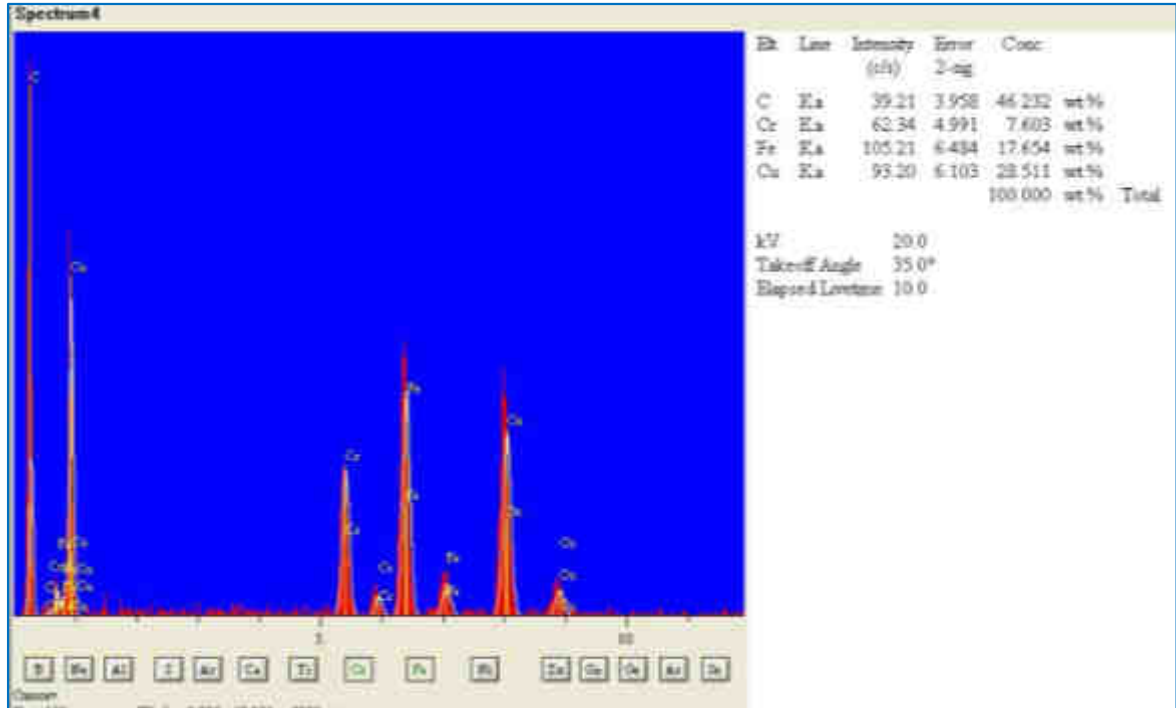
600 MPa'da sıkıştırılan elektrotun SEM analizi, yüzeyde ergimiş-katılaşmış bir katman oluştuğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. İki farklı bölgeden çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.26 ve 5.27'de gösterilmiştir. Ergimiş-katılaşmış katman kalınlığının 1064 μm 'ye kadar çıktığı ilgili şekillerden görülmektedir. EDS analizleri ise (Şekil 5.28) ergimiş-katılaşmış katmanda yaklaşık %46 C, %17 Fe, %28 Cu ve %7 Cr olduğunu göstermektedir. Marafona da yaptığı çalışmada [24], elektro erozyonla işlemede elektrot üzerinde siyah bir tabakanın oluşabileceğini ve bu tabakadaki temel elementlerin karbon ve demir olduğunu belirtmiştir. Bu siyah tabaka dielektrik sıvısından gelen karbon ile iş parçasından gelen Fe, Cr, V ve Mo gibi elementlerden oluşmaktadır ve element miktarları ve dolayısıyla siyah katman kalınlığı arttıkça EAH azalmaktadır. Yüzeydeki element miktarının, yüzey boyunca düzgün olmadığını, bunun sebebinin ise çalışma boşluğundaki akım yoğunluğunun ve sıcaklık dağılımının düzgün olmaması olduğunu belirtmiştir.



Şekil 5.26. CuCr7 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü



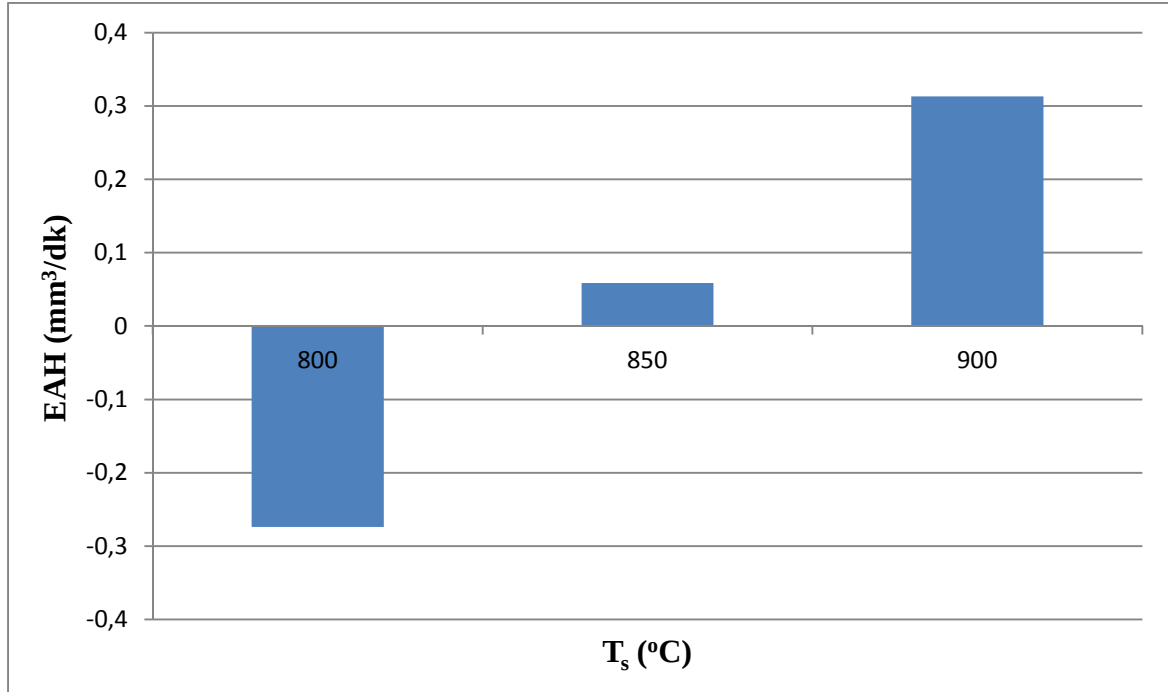
Şekil 5.27. CuCr7 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü



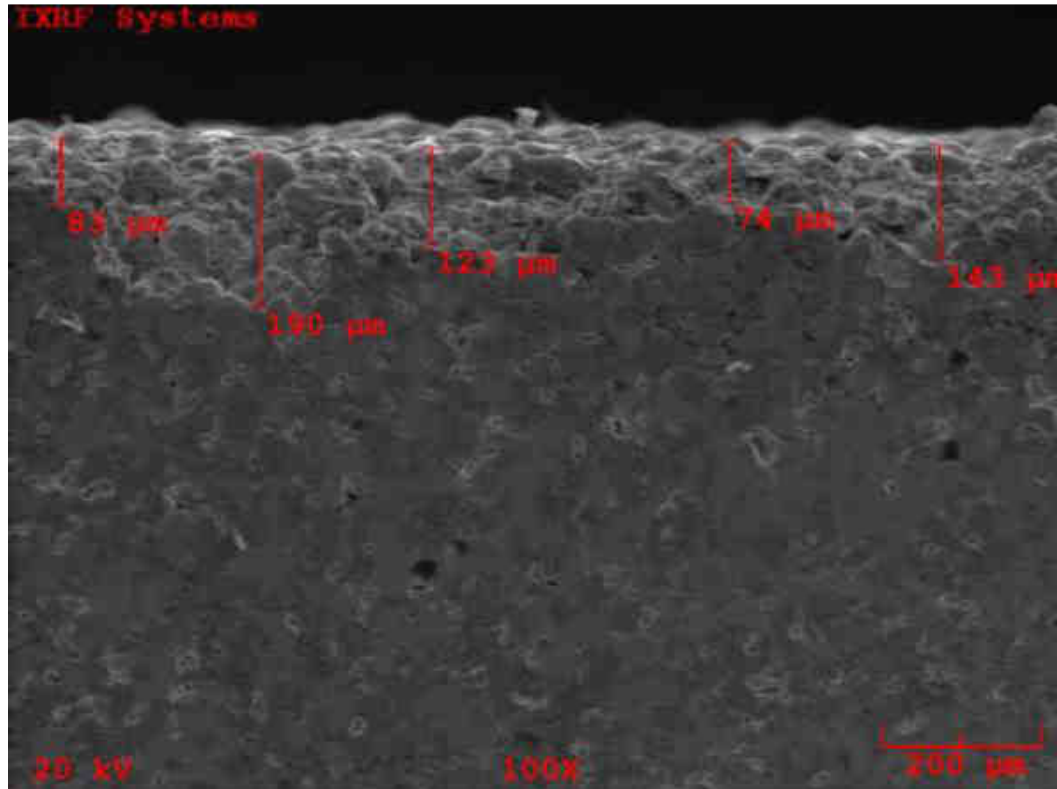
Şekil 5.28. CuCr7 elektrot yüzeyinin EDS analizi

T_s 'nin EAH üzerindeki etkisi Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça EAH artmaktadır. Cr katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça gözenek miktarı azalmış, elektrot yüzeyinde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmış, elektrotun elektrik iletkenliği artmış ve bu sayede de İİH ve EAH artmıştır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında EAH yaklaşık %121 artarken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %433 artmıştır. 800 °C'de sinterlenen elektrotun SEM görüntüsü Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Ergimiş-katılaşmış katman kalınlığının 190 μm 'ye kadar çıktığı ilgili şekilden görülmektedir. EDS analizleri ise (Şekil 5.31) ergimiş-katılaşmış katmanda yaklaşık %17 C, %18 Fe, %49 Cu ve %14 Cr olduğunu göstermektedir.

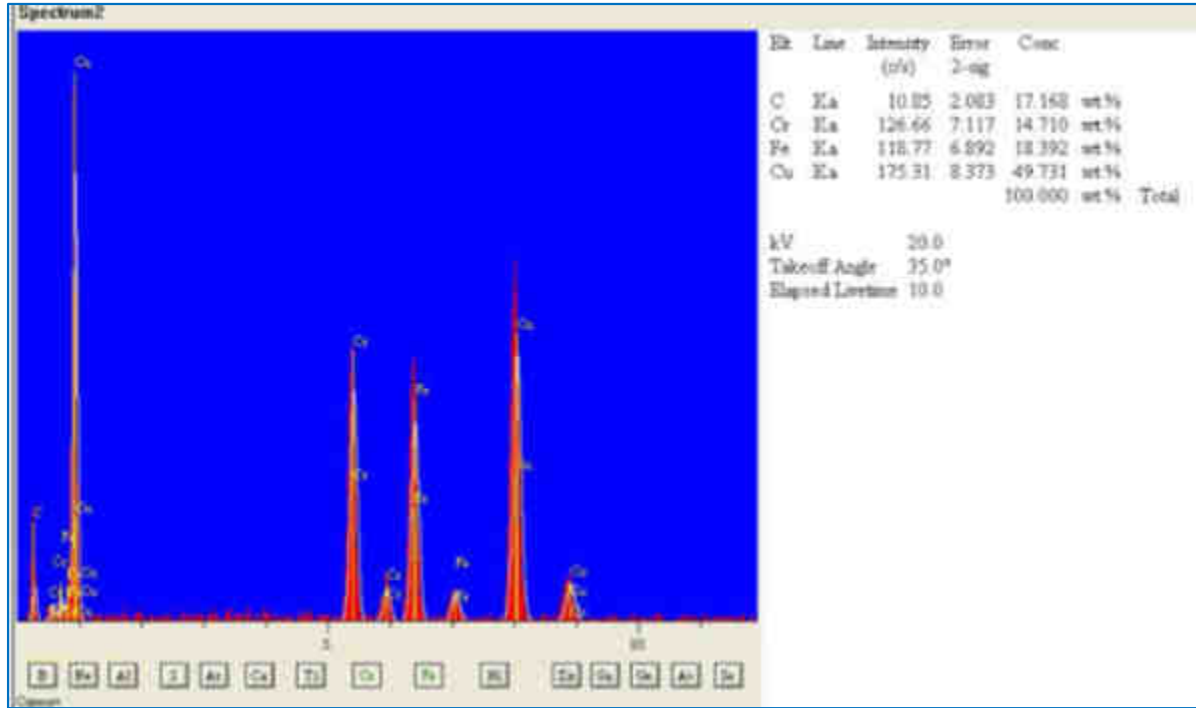
Yüksek P_s ve T_s değerleri ile daha düşük EAH elde edileceği [7, 10, 12, 29] numaralı referanslarda belirtilmiştir. Bu çalışmalarda, yüksek P_s ve/veya T_s değerlerinde toz taneciklerinin birbirlerine daha kuvvetli bir şekilde bağlanacağı ve bu sayede elektrottan iş parçasına malzeme transferinin azalacağı ve iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarının azalacağı belirtilmiştir. Fakat Samuel ve Philip'in de [5] belirttiği gibi T/M elektrotların EAH değerleri sadece P_s ve T_s 'ye değil, aynı zamanda tozların ergime sıcaklıkları ve birbirleri arasındaki bağlanma kuvvetine de bağlıdır.



Şekil 5.29. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri (Cr katkılı elektrotlar)



Şekil 5.30. CuCr4 elektrot yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 5.31. CuCr4 elektrot yüzeyinin EDS analizi

5.3.4. Bağlı aşınma (BA) sonuçları

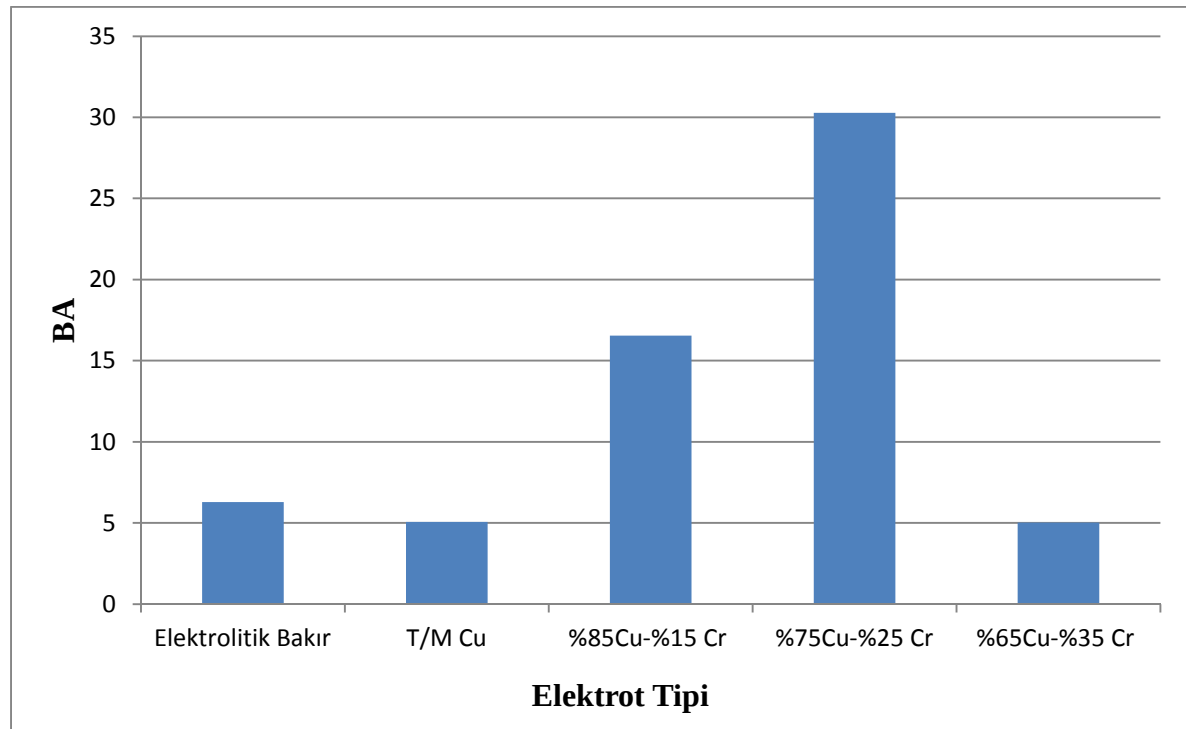
EAH değerlerinin İİH değerlerine bölünüp 100 ile çarpılması neticesinde elde edilen BA değerleri Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Birim İİH'ya göre elektrot ne kadar az aşınırsa (EAH, dolayısıyla BA, ne kadar az olursa) işlemenin o kadar verimli olduğu söylenebilir.

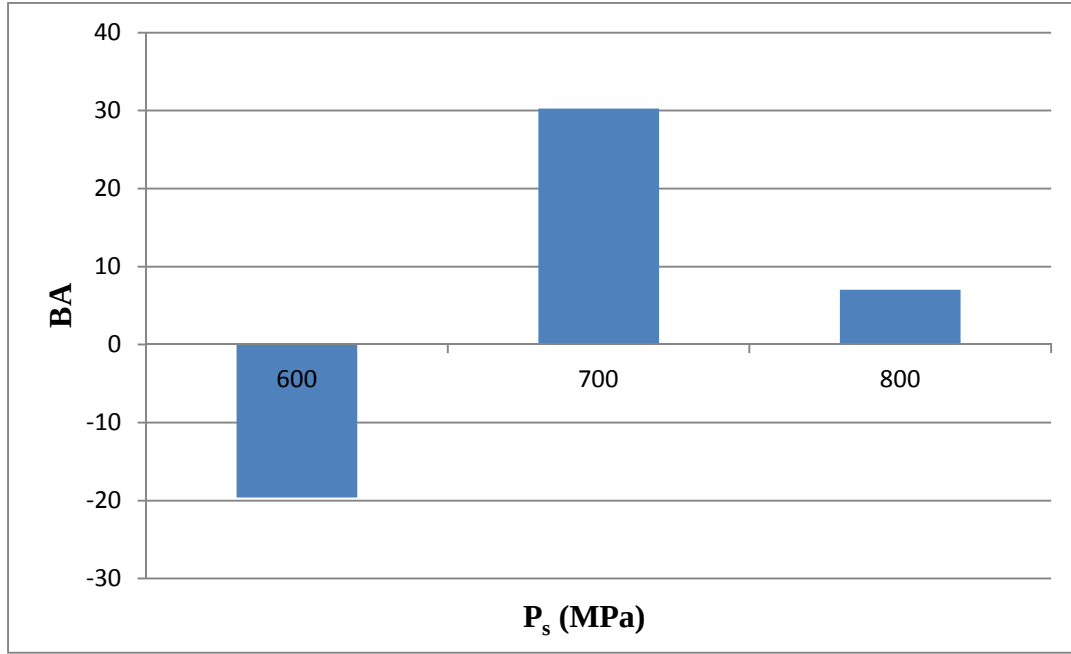
Şekil 5.32'de Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının BA üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Cr oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında bağlı aşınma yaklaşık %80 artmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %83 azalmıştır.

Şekil 5.33'te Cr-Cu tozlarının P_s değerlerinin BA üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça önce BA artmış, daha sonra azalmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında BA yaklaşık %254 artmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %77 azalmıştır. Dikkat edilirse, 600 MPa'da sıkıştırılan elektrotlar için bağlı aşınma negatif çıkmıştır. Bunun sebebi bu basınçta elde edilen EAH'nın negatif olmasıdır.

Çizelge 5.10. BA değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

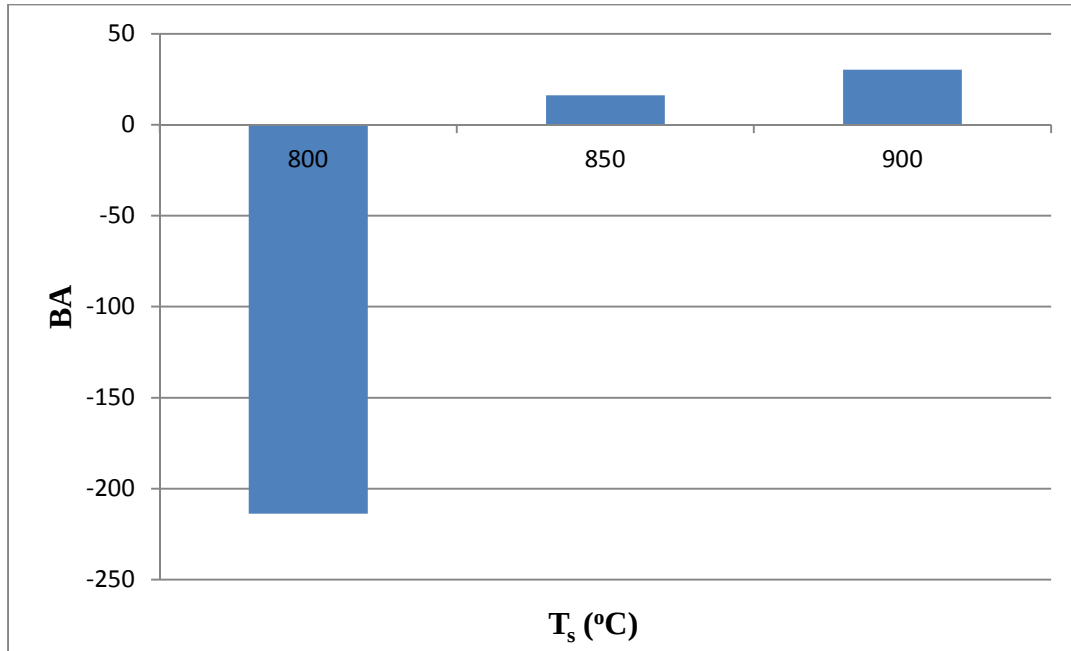
Elektrot No	EAH (mm ³ /dk)	İİH (mm ³ /dk)	BA
CuCr1	0,50	3,01	16,54
CuCr2	0,02	0,40	5,03
CuCr3	0,31	1,03	30,27
CuCr4	-0,27	0,14	-213,68
CuCr5	0,06	0,36	16,16
CuCr6	0,22	3,06	7,04
CuCr7	-0,18	0,90	-19,62
E-Cu	0,13	2,07	6,28
TM-Cu	0,11	2,20	5,07

Şekil 5.32. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları



Şekil 5.33. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

T_s 'nin BA üzerindeki etkisi Şekil 5.34'te gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça BA artmaktadır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında BA yaklaşık %108 artarken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %87 artmıştır.



Şekil 5.34. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

5.3.5. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

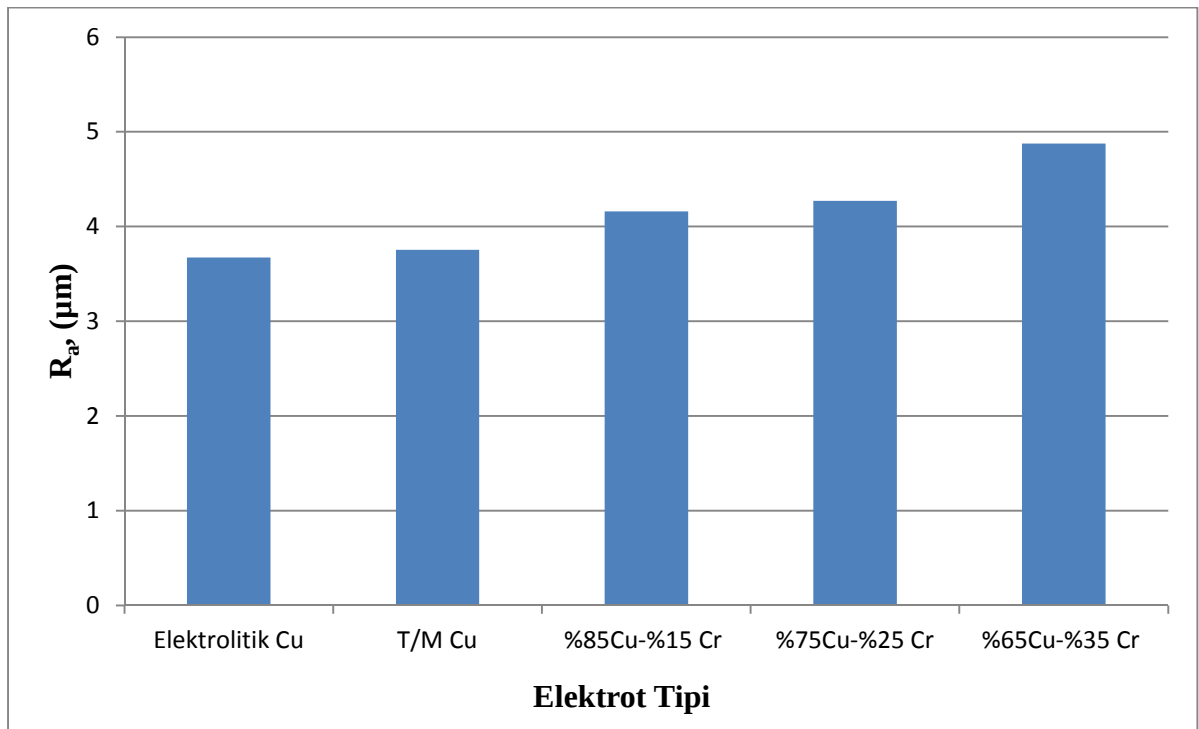
İş parçalarının işlenmiş yüzeylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları R_a ve R_z cinsinden Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.

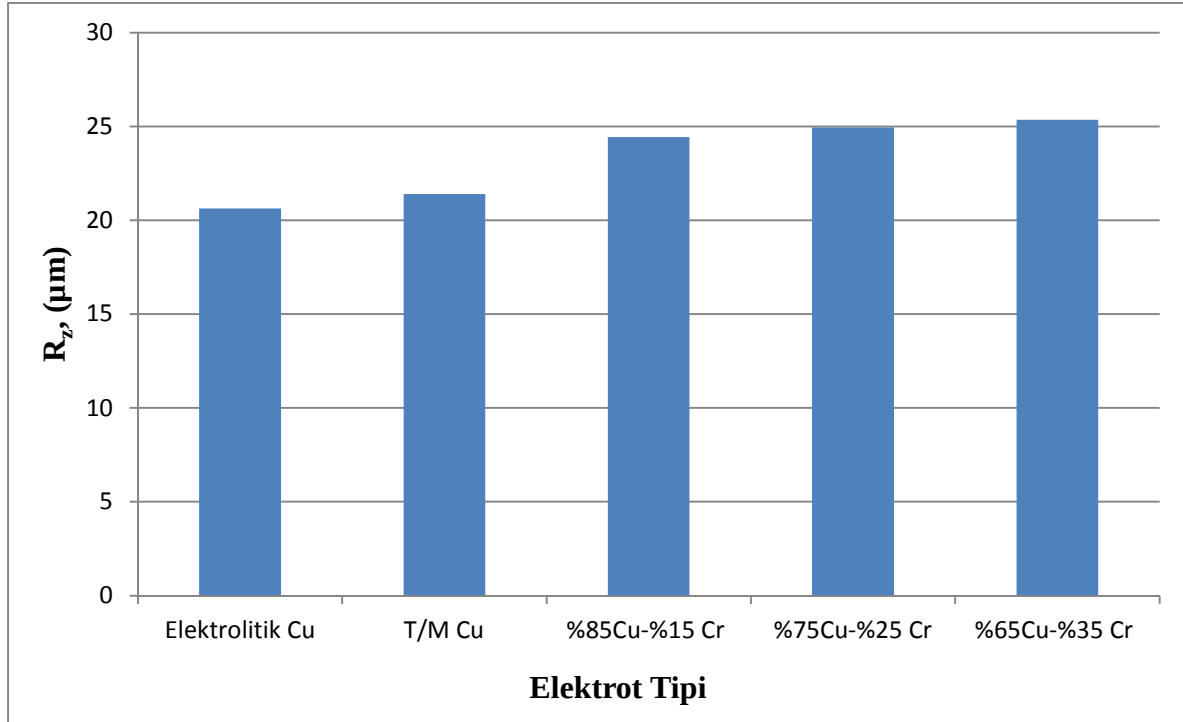
Şekil 5.35’te R_a cinsinden, Şekil 5.36’da ise R_z cinsinden, Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi Cr miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Cr oranı %15’ten %25’e çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %2,6 artmış, %25’ten %35’e çıkartıldığında ise yaklaşık %14 artmıştır. Cr oranı %15’ten %25’e çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %2 artmış, %25’ten %35’e çıkartıldığında ise yaklaşık %1,6 artmıştır. Cr miktarı azaldıkça kompozit elektrotun elektrik iletkenliği artmaktadır. Elektrotun elektrik iletkenliği yüksek olduğunda vurum frekansı da yüksek olur. Bu da daha hassas yüzeyler elde edilmesini sağlar [17]. Kompozit T/M elektrot içindeki TiC [7] ve Zr_2B [36] oranının artması ile R_a ’nın arttığı literatürde belirtilmiştir.

Literatürde T/M elektrotlar ile elde edilen R_a değerleri 2,5-15 μm arasında değişmektedir [10, 12, 25, 26]. Katı Cu elektrota göre T/M elektrotların daha düşük R_a değerleri verdiği [4] numaralı referansta da belirtilmiştir. Bu çalışmada, yazarlar, elektrottan kopan tozların işparçası yüzeyinde birikmesi ile yüzey çatlaklarının azaldığını ve böylece yüzey pürüzlülüğünün de azaldığını belirtmişlerdir. Benzer bir yorum T/M Al-Mo elektrotlar için de yapılmıştır [25]. Diğer taraftan, işparçası yüzeyine yapışan yüksek miktardaki tozdan dolayı T/M elektrotlar ile yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek çıkacağı da literatürde belirtilmiştir [25]

Çizelge 5.11. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Cr katkıli elektrotlar)

Elektrot No	Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü, R_z (μm)
CuCr1	4,16	24,43
CuCr2	4,88	25,36
CuCr3	4,27	24,95
CuCr4	5,66	30,75
CuCr5	3,80	22,93
CuCr6	5,00	34,40
CuCr7	5,69	31,18
E-Cu	3,67	20,63
TM-Cu	3,76	21,39

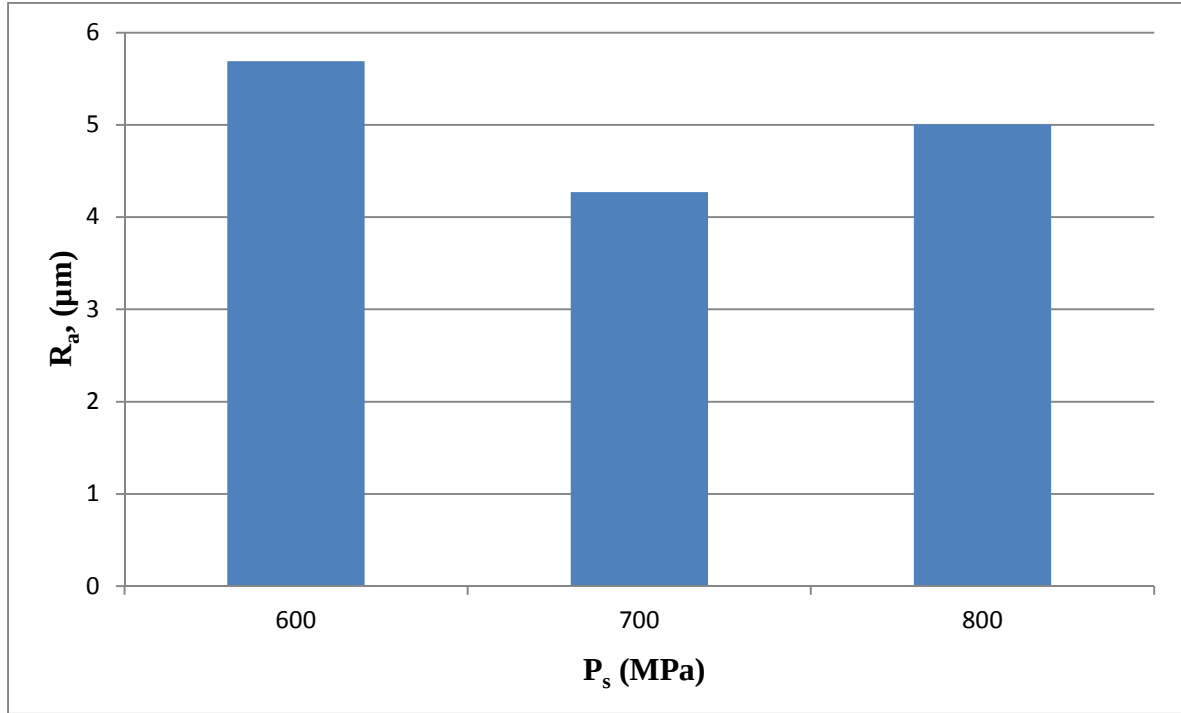
Şekil 5.35. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotların R_a sonuçları (Cr katkıli elektrotlar)



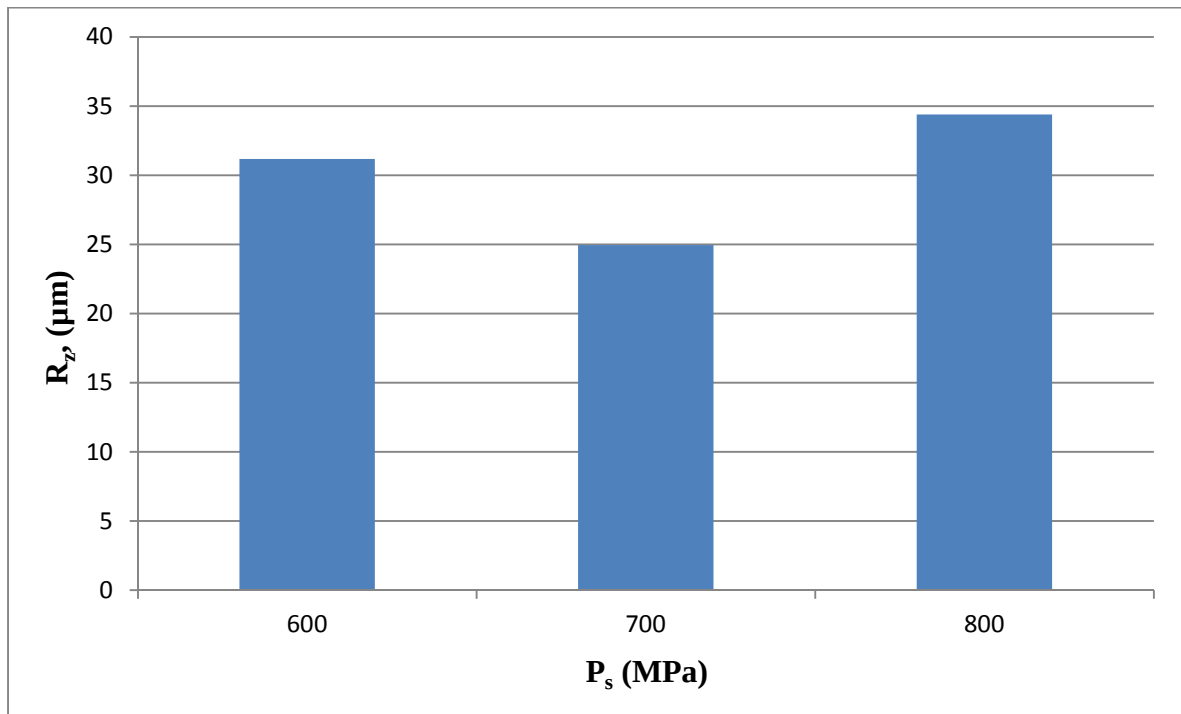
Şekil 5.36. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotların R_z sonuçları (Cr katkılı elektrotlar)

Şekil 5.37'de R_a cinsinden, Şekil 5.38'de R_z cinsinden Cr-Cu tozlarının P_s değerlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi gösterilmiştir. P_s arttıkça önce yüzey pürüzlülüğü azalmış, daha sonra artmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %25 azalmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %17 artmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %20 azalmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %38 artmıştır. P_s arttıkça elektrik iletkenlik artar ve böylece düzensiz kıvılcım oluşumu azalar, daha düzgün, pürüzsüz yüzeyler elde edilir [21]. Das ve Misra [7], TiC-Cu ham elektrotları 200, 300 ve 400 MPa'da sıkıştırmış ve P_s - R_a ilişkisi ile alakalı benzer yorumu yapmışlardır.

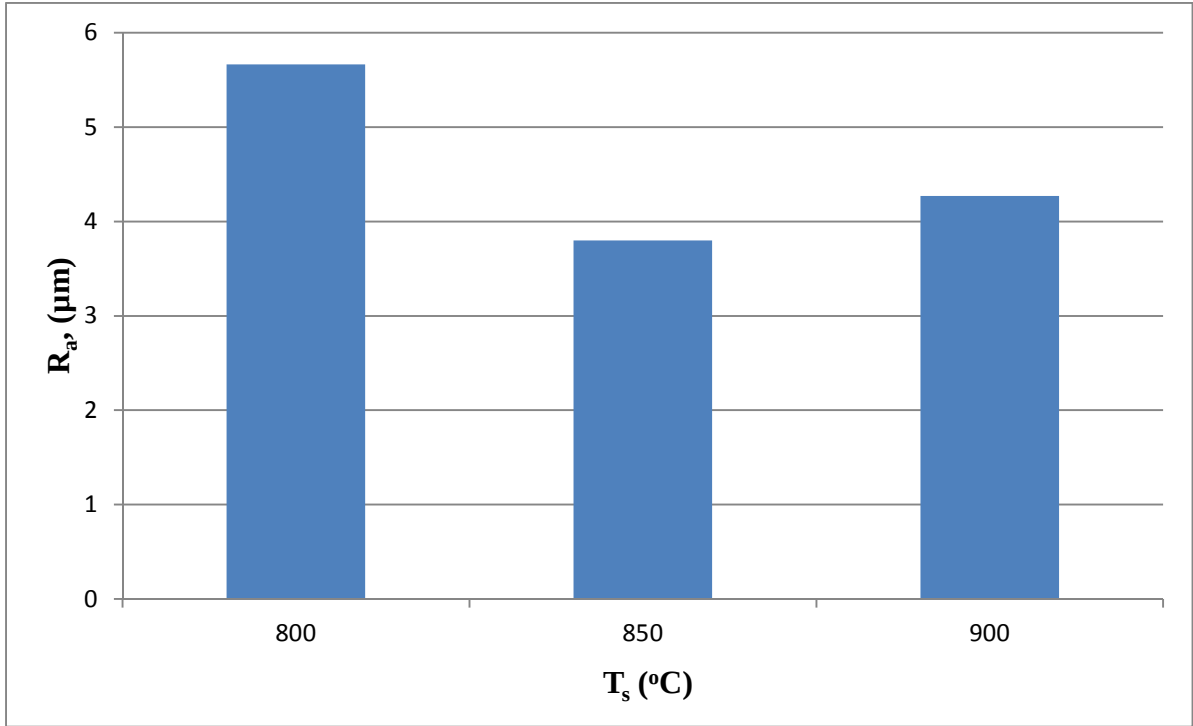
T_s 'nin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi Şekil 5.39'da R_a cinsinden, Şekil 5.40'ta ise R_z cinsinden gösterilmiştir. T_s arttıkça önce yüzey pürüzlülüğü azalmış, daha sonra artmıştır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %33 azalmış, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %12 artmıştır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %25 azalmış, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %9 artmıştır.



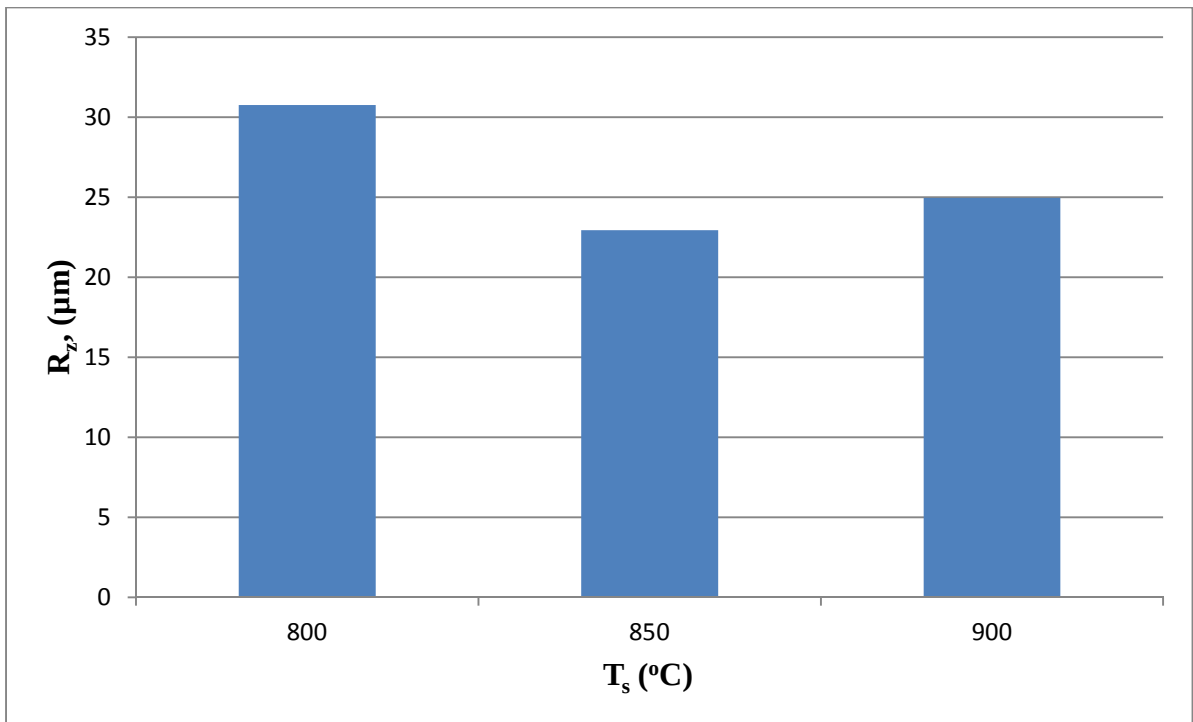
Şekil 5.37. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri (Cr katkılı elektrotlar)



Şekil 5.38. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri (Cr katkılı elektrotlar)



Şekil 5.39. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri (Cr katkılı elektrotlar)



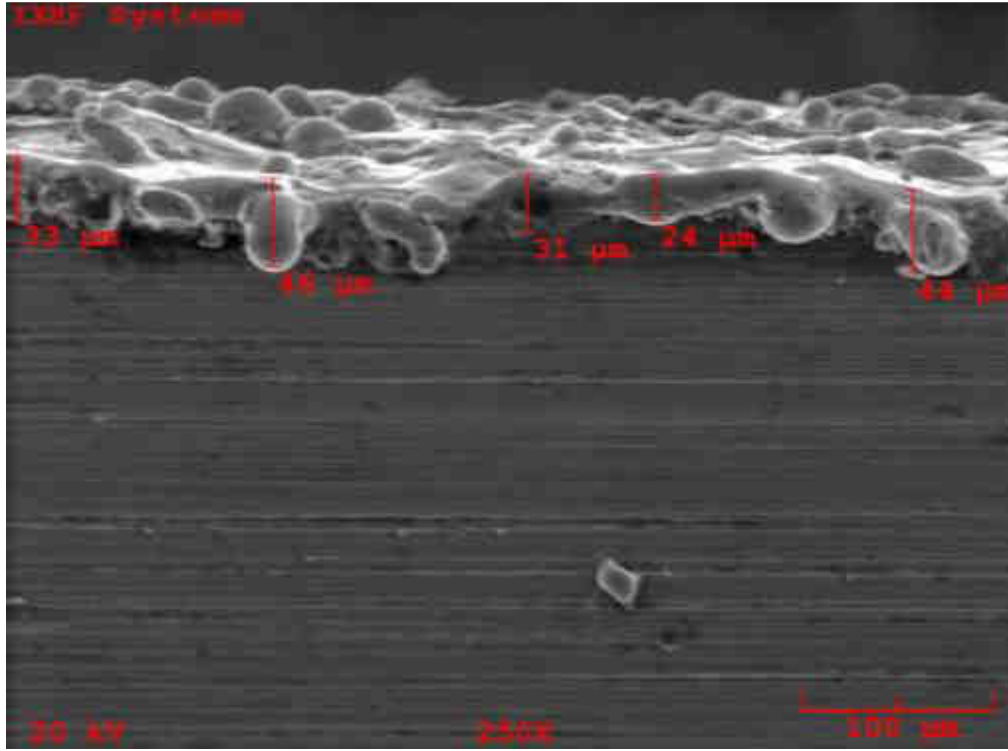
Şekil 5.40. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

5.3.6. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)

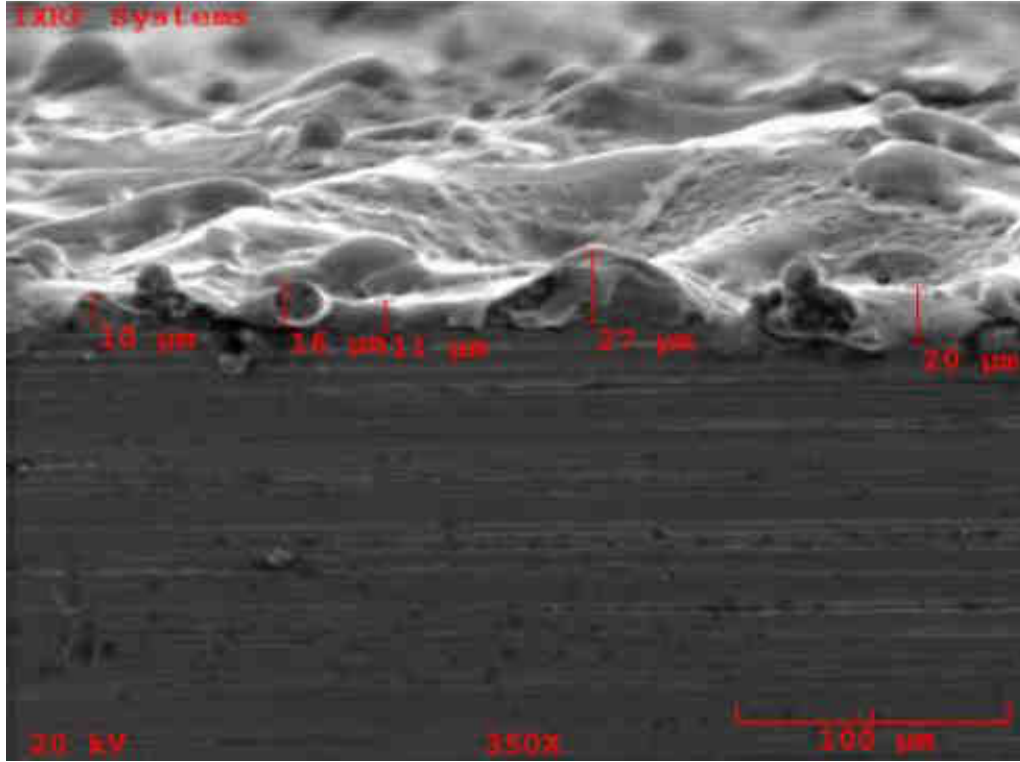
Cr tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığı, SEM analizleri yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 5.41 ve 5.42’de CuCr T/M elektrotlar, Şekil 5.43’te elektrolitik Cu, Şekil 5.44’te ise T/M Cu elektrot ile yapılan işleme neticesinde elde edilen yüzeyde oluşan katman kalınlığı gösterilmiştir. %85 Cu - %15 Cr oranında karıştırılmış, 700 MPa’da sıkıştırılmış, 900 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 46 μm ’ye kadar; %65 Cu - %35 Cr oranında karıştırılmış, 700 MPa’da sıkıştırılmış, 900 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 270 μm ’ye kadar; %75 Cu - %25 Cr oranında karıştırılmış, 700 MPa’da sıkıştırılmış, 900 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 230 μm ’ye kadar; %75 Cu - %25 Cr oranında karıştırılmış, 700 MPa’da sıkıştırılmış, 800 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 145 μm ’ye kadar; %75 Cu - %25 Cr oranında karıştırılmış, 700 MPa’da sıkıştırılmış, 850 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 25 μm ’ye kadar; %75 Cu - %25 Cr oranında karıştırılmış, 800 MPa’da sıkıştırılmış, 900 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 15 μm ’ye kadar; %75 Cu - %25 Cr oranında karıştırılmış, 600 MPa’da sıkıştırılmış, 900 °C’de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 27 μm ’ye kadar; elektrolitik Cu elektrot ve T/M Cu elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının ise 22 μm ’ye kadar çıktığı görülmüştür. P_s ve T_s ’nin değişiminin yüzeyde oluşan katman kalınlığı değişimi ile doğru orantılı olmadığı ama elektrot içindeki Cr oranı arttıkça yüzeyde oluşan katman kalınlığının arttığı görülmüştür. Elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça elektrot iletkenliğinin azalması, böylece işleme sırasında daha az kıvılcım oluşması neticesinde iş parçası yüzeyinde hızlı bir şekilde ergiyemeyen malzemenin, dielektrik sıvısı tarafından iş parçası yüzeyinden zamanında uzaklaştırılamaması ve tekrar soğuyup iş parçası yüzeyine yapışması, katman kalınlığının artmasının muhtemel sebebi olarak söylenebilir. Yüzeyde oluşan katman kalınlığının kompozit T/M elektrot içindeki TiC oranının artması ile arttığı [7] numaralı referansta da belirtilmiştir. P_s ’nin artması ile yüzeyde oluşan katman kalınlığının azalacağı [7, 10, 12] numaralı referanslarda belirtilmiştir.

Literatürde; düşük karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 12-100 μm [18], C-40 karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 3-785 μm [10, 12], Ti-6Al-4V işparçasının Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 4-11 μm [21], AISI

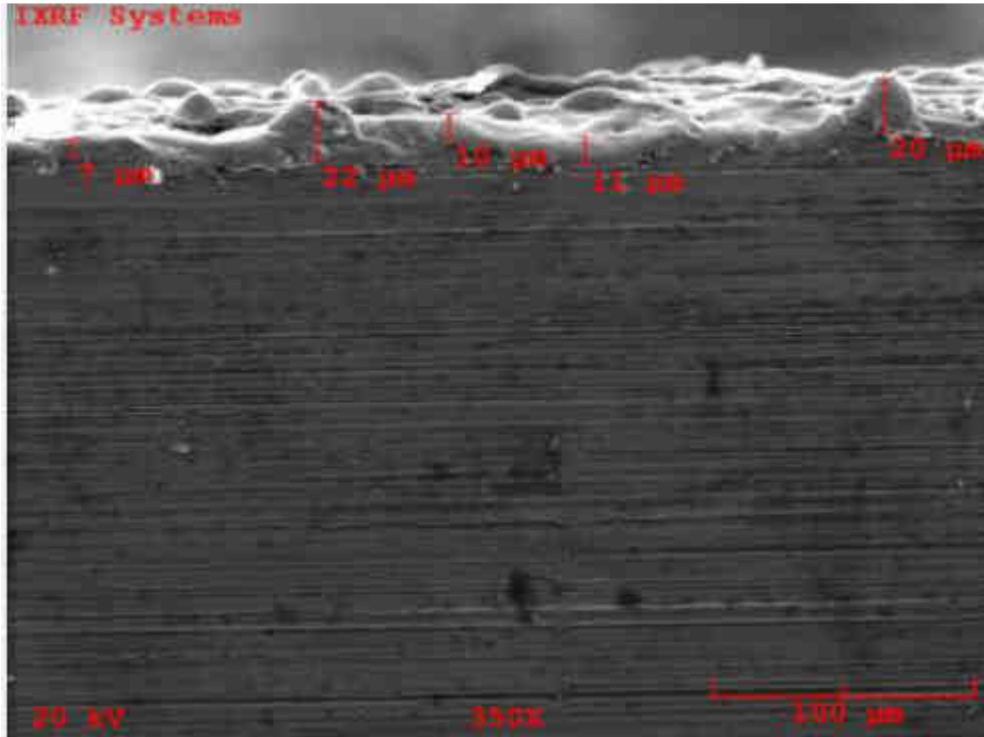
1045 işparçasının Cu-Cr T/M elektrotlar ile işlenmesi ile $<10\text{ }\mu\text{m}$ [3], AISI H13 işparçasının WC-Co T/M elektrotlar ile işlenmesi ile $30\text{ }\mu\text{m}$ [29], Ni tabanlı Haynes 230 süperalaşımı işparçasının Al-Mo T/M elektrotlar ile işlenmesi ile $30\text{-}50\text{ }\mu\text{m}$ [25, 26], alüminyum işparçasının TiC-Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile $30\text{-}160\text{ }\mu\text{m}$ [7] katman kalınlığı oluştuğu belirtilmiştir.



şekil 5.41. CuCr1 nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.42. CuCr7 nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.43. Elektrolitik Cu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.44. T/M Cu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü

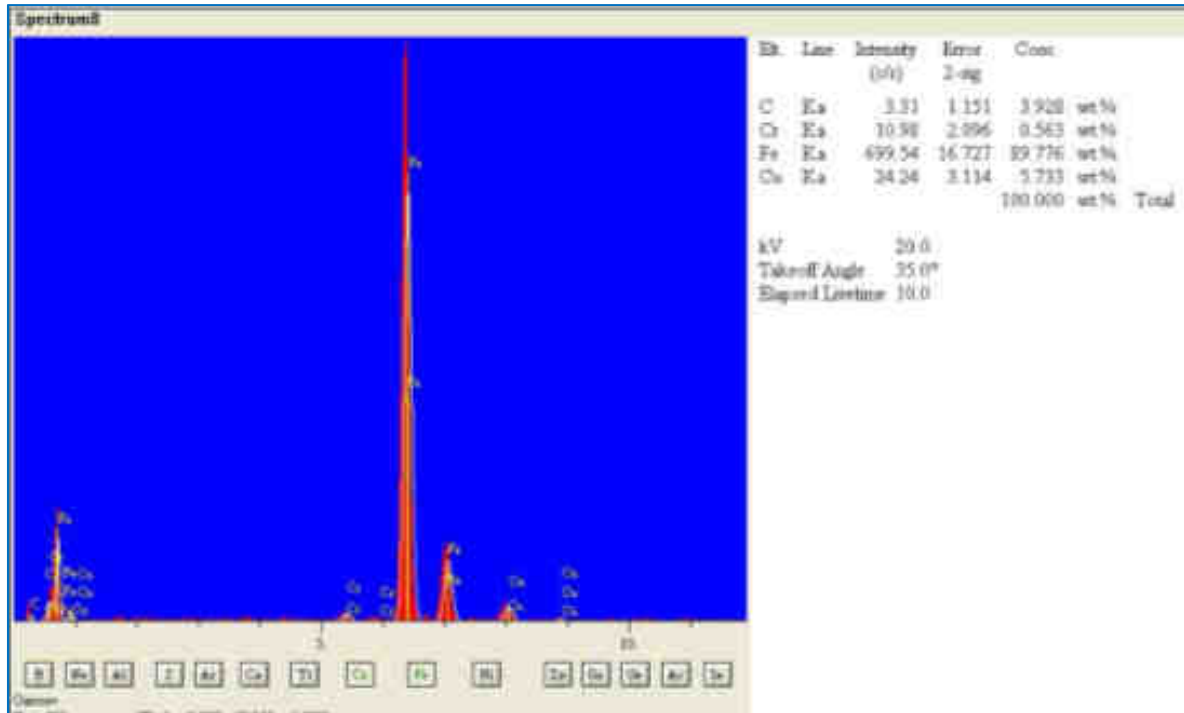
5.3.7. EDS analizleri

Cr tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi, EDS analizleri yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 5.45'te örnek bir EDS analizi gösterilmiştir. Çizelge 5.12'de Cr tozu katkılı elektrotlarla ve elektrolitik Cu ile yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 incelendiğinde, iş parçası yüzeyinde Cr ve Cu tozlarının biriktiği görülmüştür. Bunun sebebi, işleme sırasında elektrottan kopan Cr ve Cu tozlarının iş parçası yüzeyine yapışmasıdır. Çizelge incelendiğinde, elektrot içerisinde bulunan Cr miktarı ile iş parçası yüzeyinde biriken Cr ve Cu malzeme miktarının doğrusal olmadığı görülmüştür. T_s ve P_s arttıkça, iş parçası yüzeyinde biriken Cr ve Cu malzeme miktarları azalmıştır. Bunun muhtemel sebebi, T_s ve P_s 'nin artmasıyla elektrot yoğunluğunun artması ve bu sebeple işleme sırasında elektrottan daha az malzeme kopmasıdır [7, 10, 12].

Çizelge 5.12. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (Cr katkıli elektrotlar)

Elektrot No	C (%)	Cr (%)	Fe (%)	Cu (%)
CuCr1	3,93	0,56	89,78	5,73
CuCr2	9,75	2,11	83,29	4,84
CuCr3	6,91	0,53	88,87	3,69
CuCr4	7,52	1,43	82,80	8,26
CuCr5	7,02	1,40	86,44	5,14
CuCr6	4,42	0,49	92,12	2,98
CuCr7	15,11	0,62	79,95	4,33
E-Cu	17,48	-	81,33	1,19



Şekil 5.45. CuCr1 nolu elektrot için, iş parçası EDS analizi

5.3.8. Mikrosertlik ölçümleri

Cr tozu katkıli elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında ölçülen iş parçası yüzeyinin mikrosertlik değerleri Çizelge 5.13'te verilmiştir. Yüzeyde beş farklı yerden ölçüm alınmış ve tabloda bu ölçümlerin ortalamaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (Cr katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Mikrosertlik (HV)
CuCr1	975,4
CuCr2	1057,2
CuCr3	806,4
CuCr4	871,5
CuCr5	851,8
CuCr6	622,1
CuCr7	1062,4
E-Cu	1637,6
TM-Cu	786,5

Çizelgeden de görülebileceği gibi Cr katkılı elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzeyinin mikrosertliği, ana metalin sertliğinden (593,5 HV) daha yüksek çıkmıştır. En yüksek mikrosertlik elektrolitik Cu elektrotla yapılan işlemede çıkmıştır (1637,6 HV). [3] numaralı referansta da elektrolitik Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği Cu-Cr T/M elektrot ile işlenenden daha yüksek çıkmıştır. Fakat [6] numaralı referansta TaC-Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği elektrolitik Cu ile işlenenden daha yüksek çıkmıştır. En düşük mikrosertlik ise en yüksek basınçta sıkıştırılan elektrot ile işlenen yüzeyde çıkmıştır (622,1 HV). Kompozit T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça, iş parçası yüzeyinin mikrosertliği önce azalmış sonra artmıştır (Elektrot No CuCr1, CuCr3, CuCr2). Das ve Misra [7], TiC-Cu T/M elektrot içindeki Cu oranını azalttıkça, işlenmiş yüzeyin mikrosertliğinin arttığını belirtmişlerdir. P_s arttıkça iş parçası yüzeyinin mikrosertliği sürekli azalmıştır (Elektrot No CuCr7, CuCr3, CuCr6). Çünkü P_s 'nin artmasıyla, iş parçasının yüzeyinde biriken karbon ve krom da azalmıştır. Benzer sonuç [7] numaralı referansta da bulunmuştur. T_s 'nin artmasıyla iş parçası yüzeyinin mikrosertliği sürekli azalmıştır. (Elektrot No CuCr4, CuCr5, CuCr3). Çünkü T_s 'nin artmasıyla, iş parçasının yüzeyinde biriken karbon ve krom da azalmıştır.

5.3.9. Korozyon direnci ölçümleri

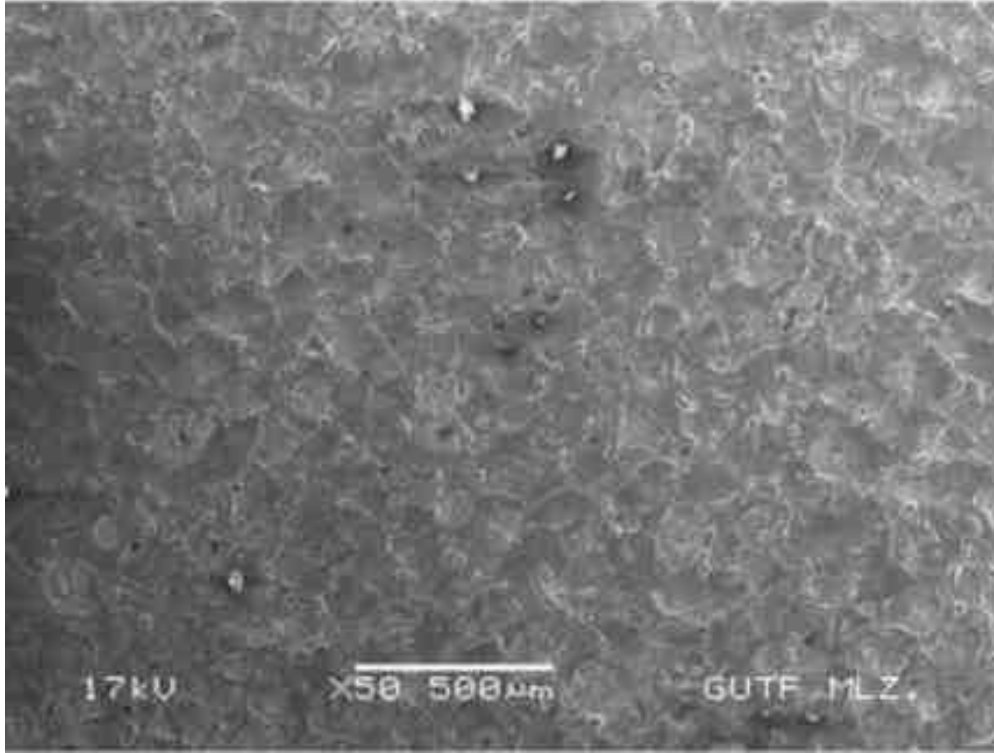
Korozyona tabi tutulmuş numunelerin yüzey görüntüleri SEM yardımıyla alınmıştır. Yüzeyde dört farklı bölgeden görüntü alınmış ve korozyonun yüzeyin % kaçına nüfuz

ettiği dört farklı görüntüden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Çizelge 5.14'te elde edilen sonuçlar listelenmiştir. Yüzeyde biriken Cr tozu miktarının korozyon direncine etkisini net görebilmek için, çizelgede numuneler, iş parçası yüzeyinde biriken en fazla Cr miktarından en aza doğru sıralanmıştır. En son satırda işlenmemiş iş parçasının üzerindeki korozyon yayılımı değeri gösterilmiştir.

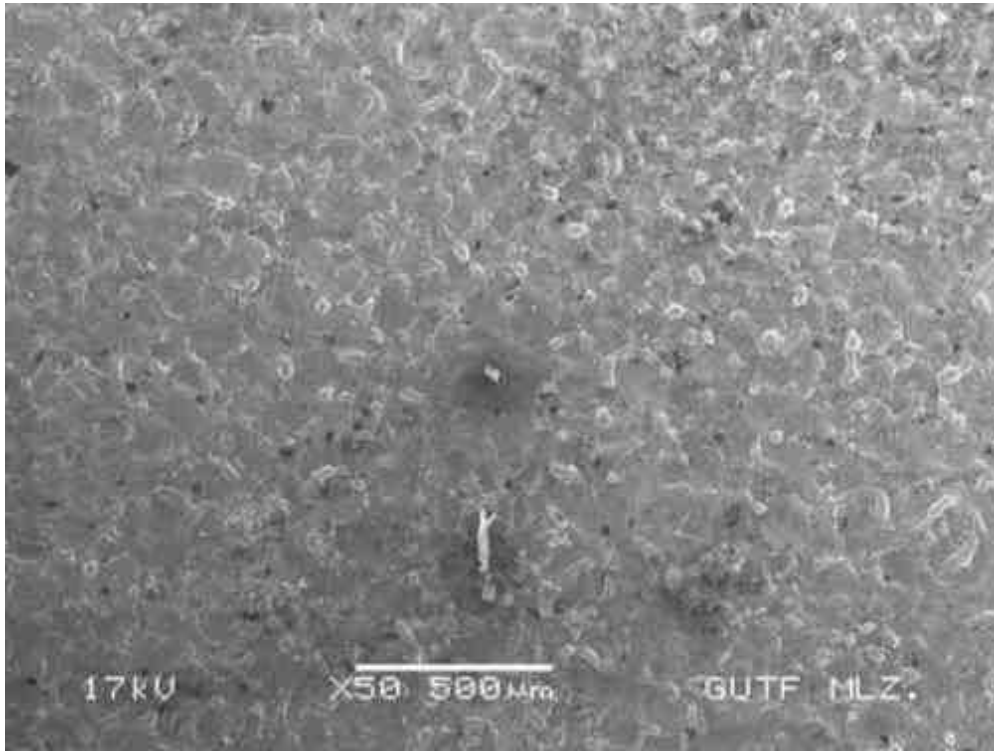
Şekil 5.46-5.54 arasında korozyona tabi tutulmuş numunelerin yüzey görüntüleri gösterilmiştir. İlgili çizelge ve şekiller incelendiğinde, yüzeyde en çok Cr biriken numunenin korozyon direncinin en yüksek çıktığı görülmektedir. Yüzeyde biriken Cr miktarı arttıkça, yüzeyin korozyon direnci artmaktadır. Ayrıca, iş parçasının korozyon direnci ile karşılaştırıldığında, elektrolitik Cu hariç, diğer bütün numunelerin korozyon direnci, iş parçasının direncinden yüksek çıkmıştır. Bu da, Cr katkılı T/M elektrotlar kullanıldığında, iş parçası yüzeyinde Cr içeren bir tabaka oluşturulabileceğini ve bu tabaka sayesinde iş parçasının korozyon direncinin artırılabilceğini göstermektedir. Literatürde, EEİ ile işlenmiş işparçası yüzeylerinin korozyon dirençlerinin arttığı, Cu-W elektrotlar (düşük karbon çeliği işparçası) [18], Cu-Cr elektrotlar (AISI 1045 işparçası) [3], Al-Mo elektrotlar (Ni tabanlı süperalaşım Haynes 230 işparçası) [25, 26] ve SiFe elektrotlar (5083 Al işparçası) [8] kullanılarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.14. Korozyon direnci sonuçları (Cr katkılı elektrotlar)

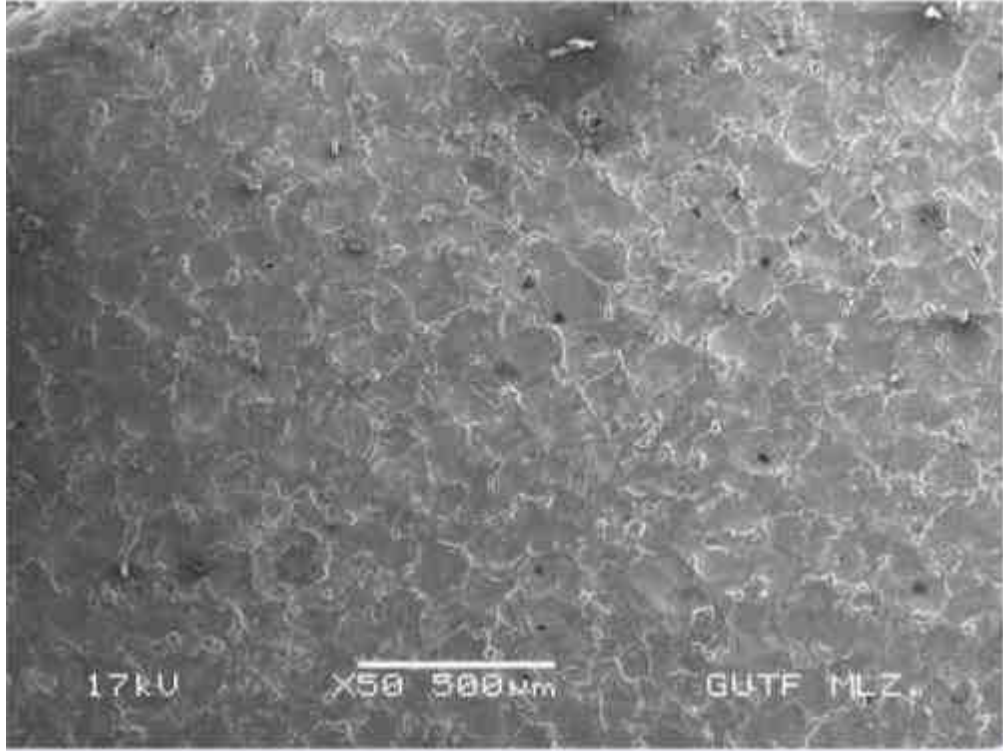
Elektrot No	İş parçası yüzeyinde biriken Cr (%)	Korozyon Yayılımı (%)
CuCr2	2,11	2
CuCr4	1,43	3
CuCr5	1,40	5
CuCr7	0,62	10
CuCr1	0,56	24
CuCr3	0,53	27
CuCr6	0,49	30
E-Cu	-	46
İş parçası	-	32



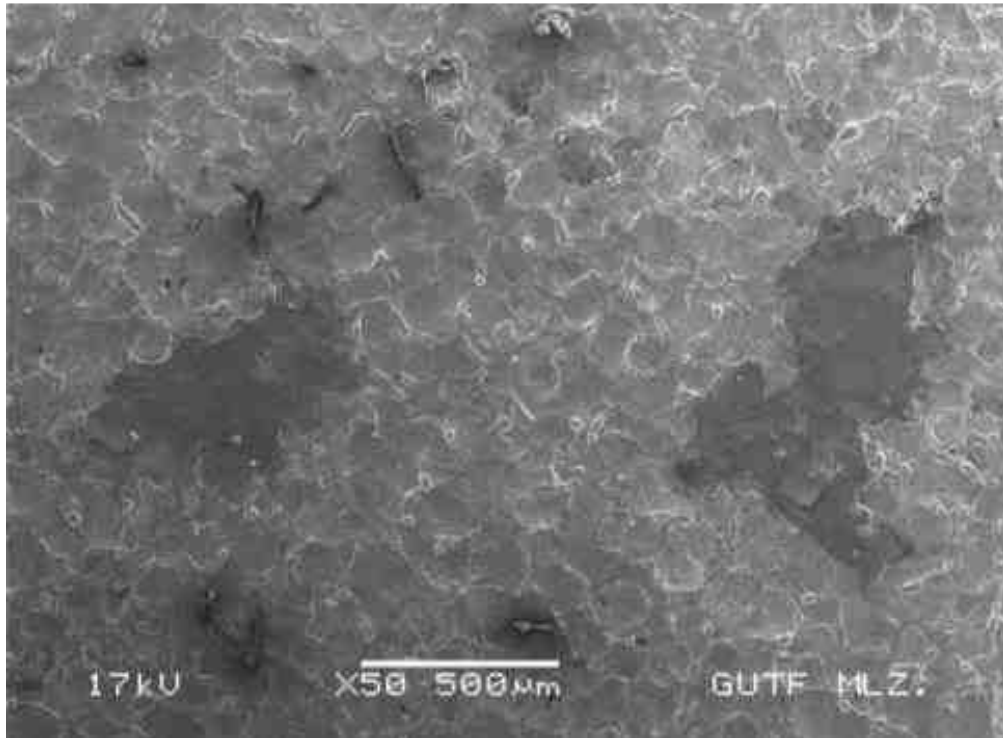
Şekil 5.46. CuCr2 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



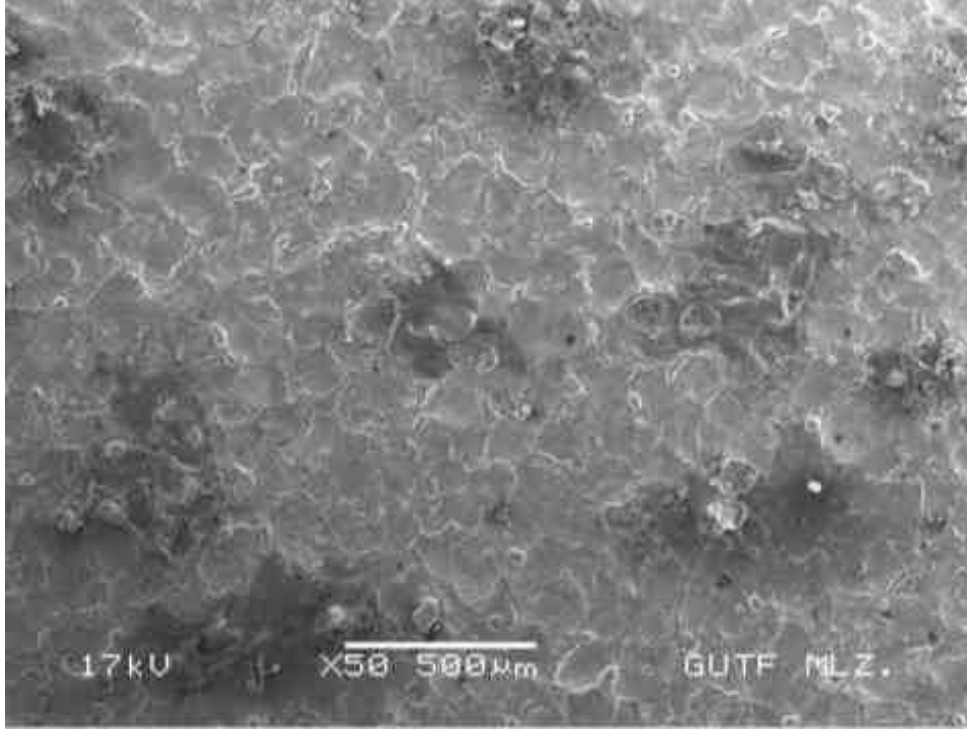
Şekil 5.47. CuCr4 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



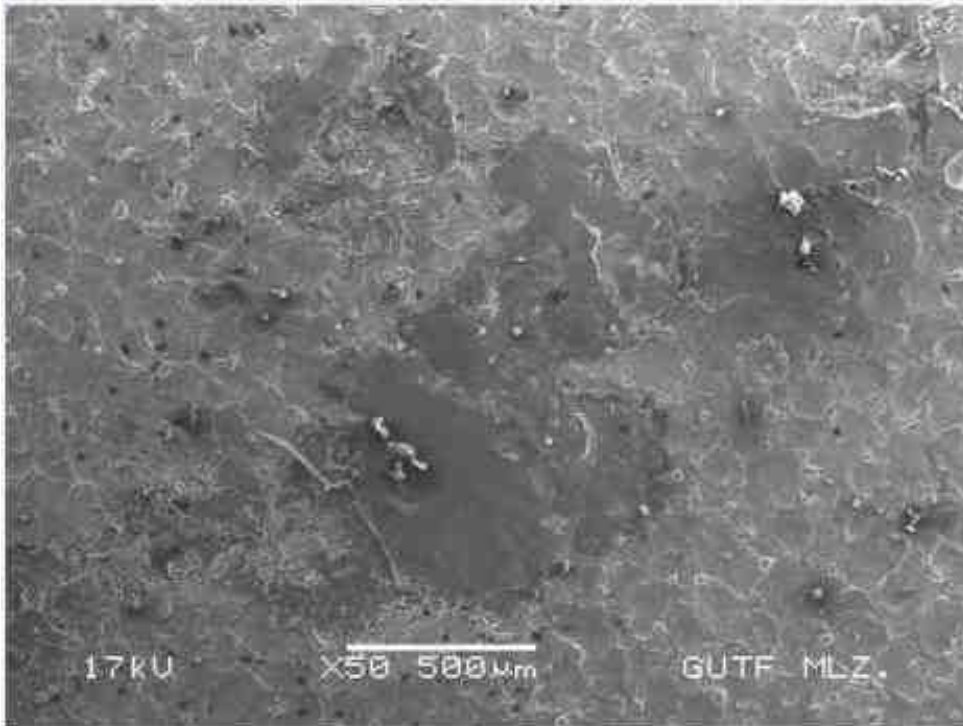
Şekil 5.48. CuCr5 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



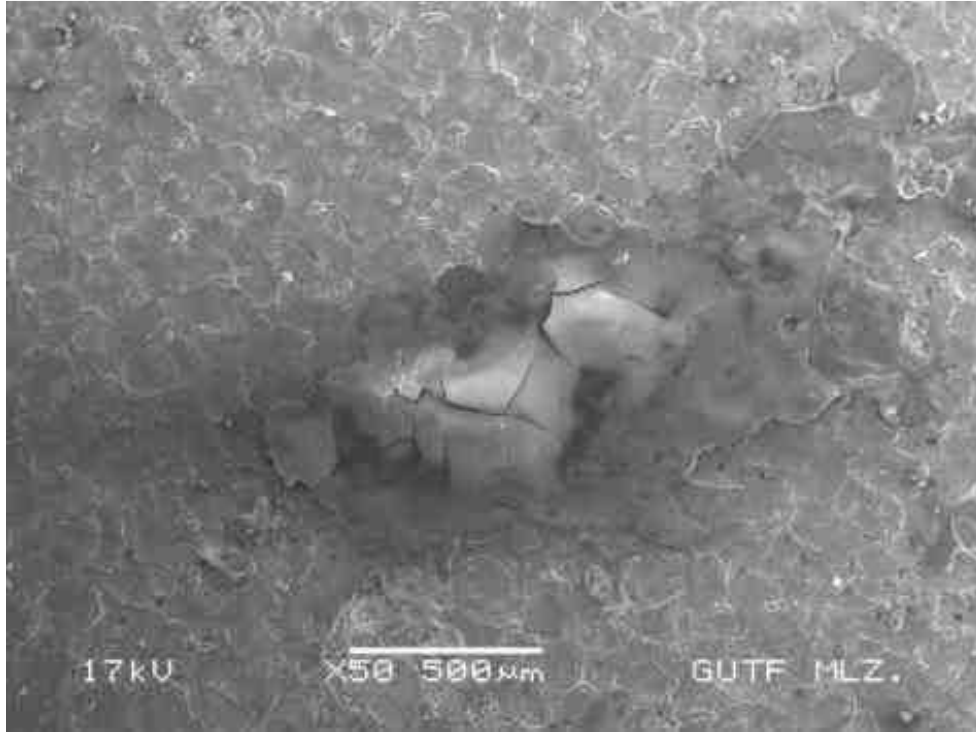
Şekil 5.49. CuCr7 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



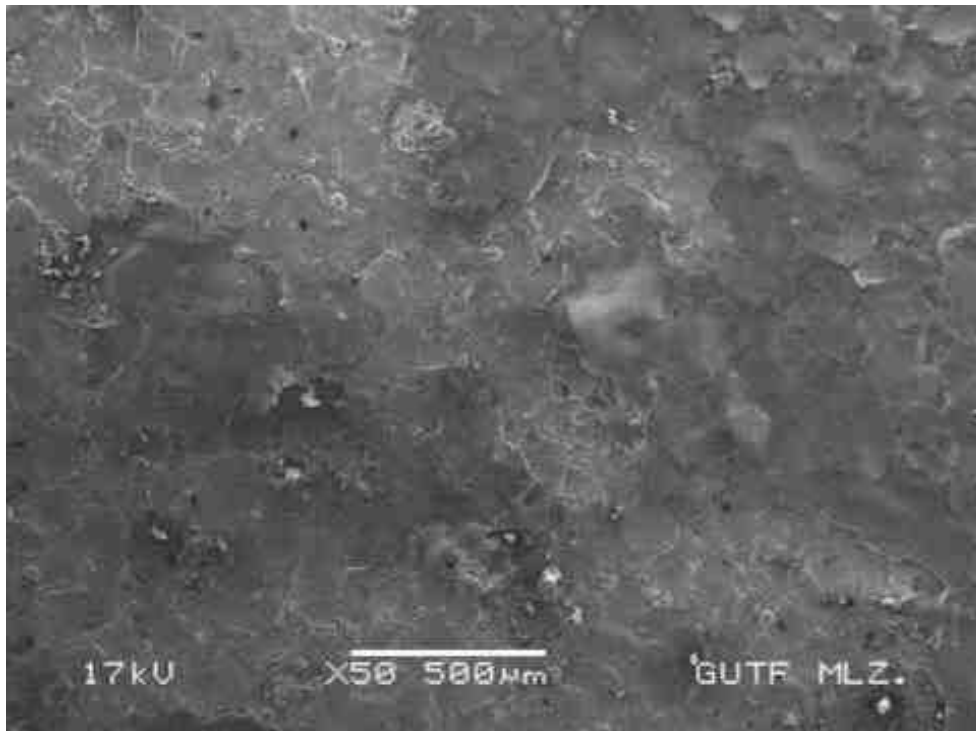
Şekil 5.50. CuCr1 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



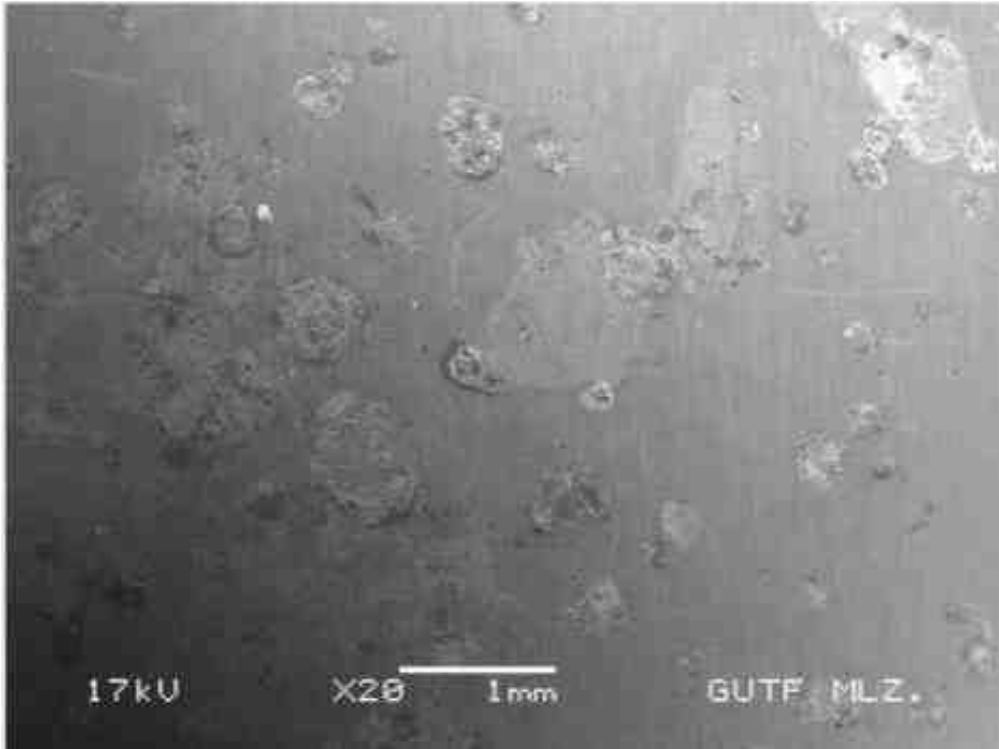
Şekil 5.51. CuCr3 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.52. CuCr6 elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.53. E-Cu elektrot ile işlenmiş ve korozyona tabi tutulmuş işparçası için SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.54. Korozyona tabi tutulmuş iş parçası için SEM yüzey görüntüsü

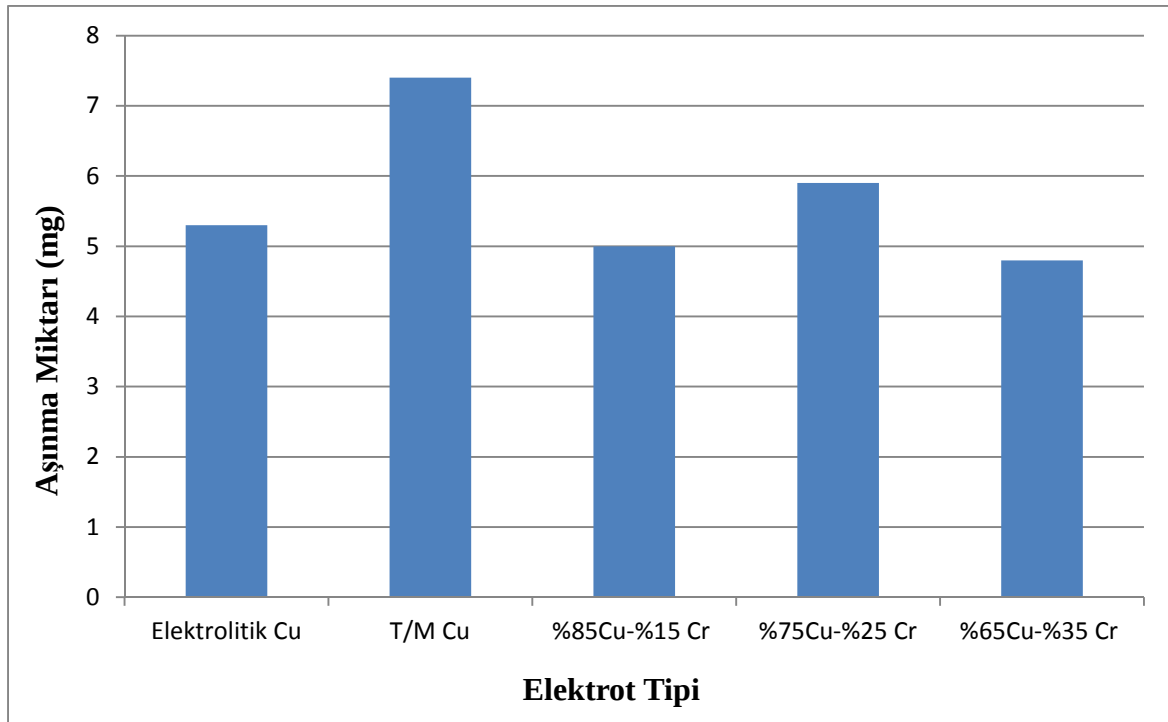
5.3.10. Aşınma direnci ölçümleri

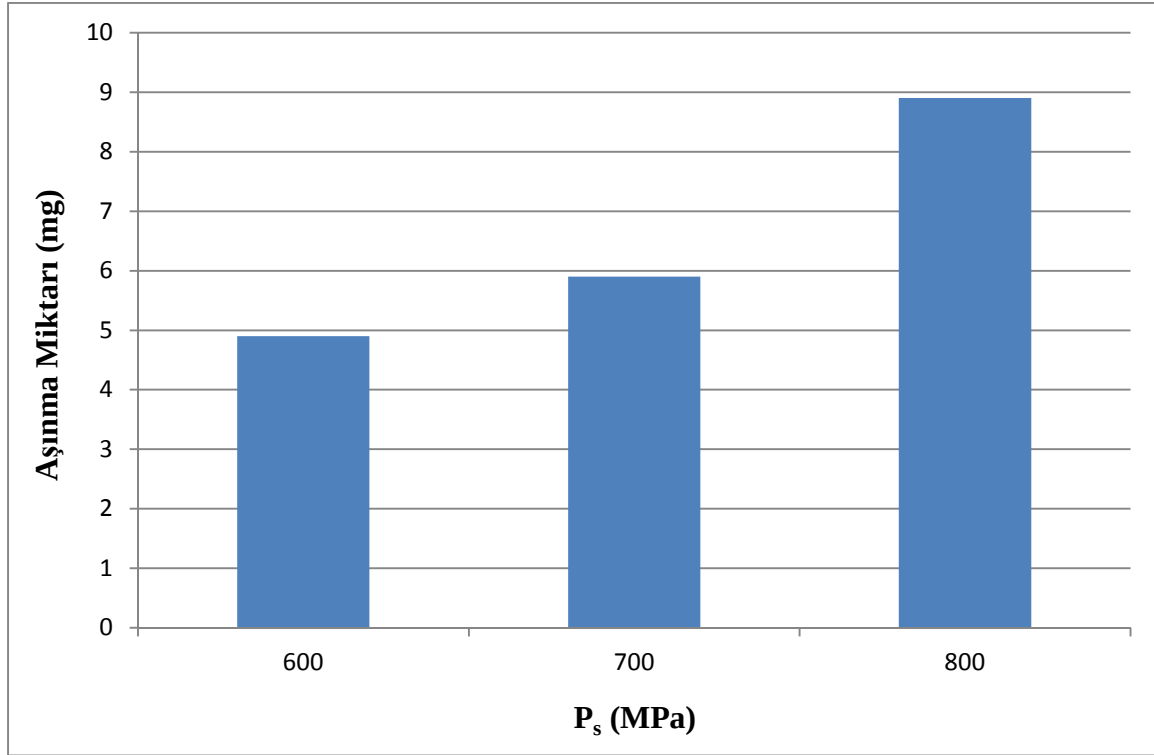
Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen aşınma değerleri Çizelge 5.15'te gösterilmiştir.

Şekil 5.55'te Cu tozuna ilave edilen Cr tozu miktarının aşınma direncine etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Cr oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %18 artmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %19 azalmıştır. %65 Cu-%35 Cr elektrot en düşük aşınma miktarı dolayısıyla en yüksek aşınma direncine, T/M Cu elektrot ise en yüksek aşınma miktarı dolayısıyla en düşük aşınma direncine yol açmıştır. T/M Cu elektrot, elektrolitik Cu elektrota göre daha yüksek aşınma miktarı dolayısıyla daha düşük aşınma direnci değeri vermiştir. İşlenmemiş parçanın aşınma miktarı 12,4 mg olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, işlenmemiş parça ile karşılaştırıldığında, iş parçası yüzeyinin aşınma direnci elektrolitik Cu elektrot kullanıldığında 2,3 kat, T/M Cu elektrot kullanıldığında 1,6 kat ve Cr-Cu T/M elektrotlar kullanıldığında ise 1,4-2,6 kat artmıştır.

Çizelge 5.15. Aşınma direnci değerleri (Cr katkıli elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Aşınma (mg)
CuCr1	119,2413	119,2363	5,0
CuCr2	126,0232	126,0184	4,8
CuCr3	118,3346	118,3287	5,9
CuCr4	128,7909	128,7856	5,3
CuCr5	126,5022	126,4968	5,4
CuCr6	116,9283	116,9194	8,9
CuCr7	126,8259	126,8210	4,9
E-Cu	121,7798	121,7745	5,3
T/M Cu	116,3168	116,3094	7,4

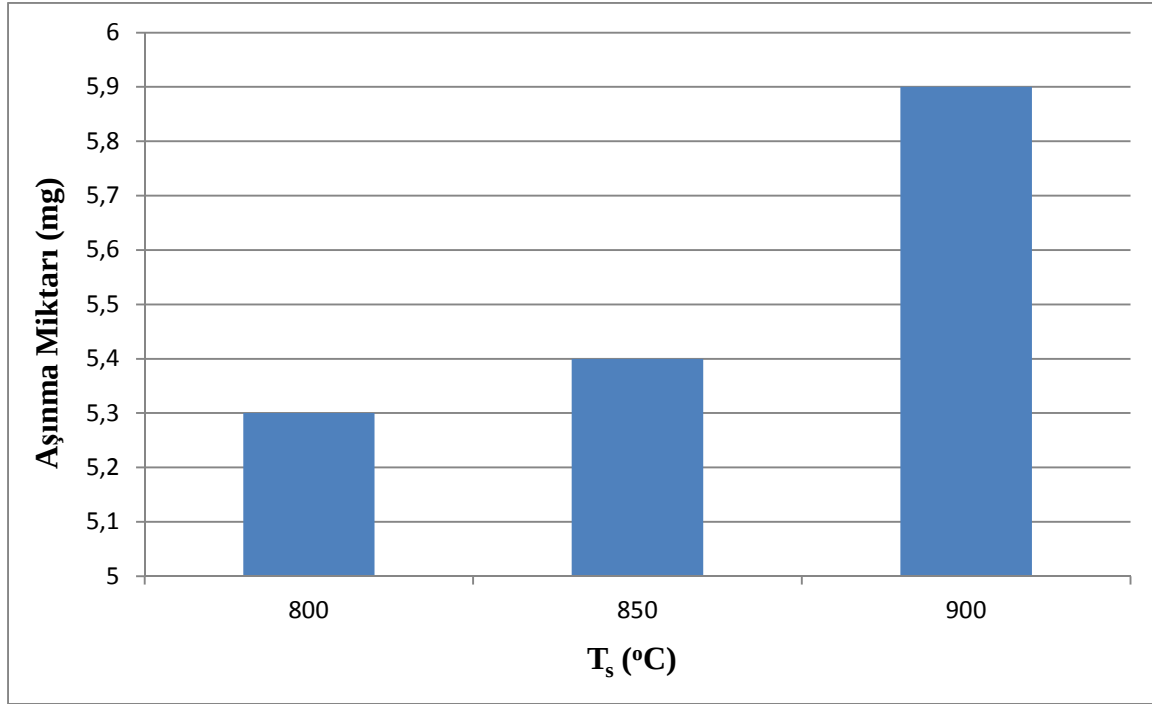
Şekil 5.55. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için aşınma direnci sonuçları



Şekil 5.56. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

Şekil 5.56'da Cr-Cu tozlarının P_s değerlerinin aşınma direnci üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça aşınma miktarı artmakta dolayısıyla aşınma direnci azalmaktadır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %20 artmış, 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %50 artmıştır.

T_s 'nin aşınma direnci üzerindeki etkisi Şekil 5.57'de gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça aşınma miktarı artmakta dolayısıyla aşınma direnci azalmaktadır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %2 artarken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında yaklaşık %9 artmıştır.



Şekil 5.57. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri (Cr katkılı elektrotlar)

Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvısı kullanıldığında, EDM ile işlenmiş çelik iş parçasının işlenmiş yüzeyindeki C miktarı, ana metalden daha fazla olmaktadır. Bu da yüzeyin aşınma direncini artırmaktadır [74]. Literatürde, Shunmugam ve ark. (1994) %40 WC ve %60 Fe T/M elektrotlar kullanarak çelik iş parçasının aşınma direncini %25-60 oranında arttırmışlardır. Yazarlar aşınma direncindeki bu artışı yüzeyde oluşan WC, W_2C , FeC, $(Fe_3C)H$ ve Fe_3C fazlarına bağlamışlardır [75]. Wang ve ark. (2002) karbon çeliğini Ti T/M elektrotlar yardımı ile işlemişler ve yüzeyde oluşan TiC tabakası sayesinde yüzeyin aşınma direncini 3-7 kat arttırmışlardır [76].

5.4. Mo Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlar ile Yapılan İşleme Sonuçları

Mo tozları, Cu tozları ile ağırlıkça üç farklı K_t 'de (%85Cu-%15Mo, %75Cu-%25Mo, %65Cu-%35Mo) karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar 700 MPa basınçta basılmıştır. P_s 'nin etkisini görebilmek için %75Cu-%25Mo karışimli tozlar 600 ve 800 MPa'da da basılmıştır. Elde edilen ham elektrotlar, elektro erozyon tezgâhında kullanılacak seviyeye gelmeleri için 900 °C'de sinterlenmişlerdir. T_s 'nin etkisini görebilmek için 700 MPa'da sıkıştırılan %75Cu-%25Mo karışimli tozlar, ayrıca 850 ve 800 °C'de de sinterlenmiştir. Her bir elektrottan yedek olması açısından üçer adet, toplamda yirmi bir adet elektrot

üretimiştir. Elde edilen elektrotlar elektro erozyonla işleme tezgâhında denenmiş ve toplamda yedi adet deney yapılmıştır. Çizelge 5.16’da her bir deneyde kullanılan elektrotlar ve özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.16. Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan deney değişkenleri

Elektrot No	Malzeme	K _t (%)	P _s (MPa)	T _s (°C)
CuMo1	Cu-Mo	85-15	700	900
CuMo 2	Cu-Mo	65-35	700	900
CuMo 3	Cu-Mo	75-25	700	900
CuMo 4	Cu-Mo	75-25	700	800
CuMo 5	Cu-Mo	75-25	700	850
CuMo 6	Cu-Mo	75-25	800	900
CuMo 7	Cu-Mo	75-25	600	900
E-Cu	Elektrolitik Cu	-	-	-
TM-Cu	T/M Cu	100-0	700	900

5.4.1. Elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

Elde edilen yedi farklı Mo-Cu kompozit T/M elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları Çizelge 5.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.17. Mo tozu katkılı elektrotların elektrik iletkenlik ölçüm sonuçları

Elektrot No	R (ohm)	L (mm)	A (mm ²)	σ (1/ohm.mm)
CuMo1	0,0041x10 ³	9,1	203,836	10,889 x10 ³
CuMo 2	0,0068x10 ³	7,87	204,089	5,671 x10 ³
CuMo 3	0,0041x10 ³	8,5	206,374	10,047 x10 ³
CuMo 4	0,0052x10 ³	8,06	206,884	7,492 x10 ³
CuMo 5	0,0059 x10 ³	7,7	206,12	6,332 x10 ³
CuMo 6	0,0039 x10 ³	8,35	207,139	10,336 x10 ³
CuMo 7	0,0093 x10 ³	8,6	204,85	4,514 x10 ³

Çizelge 5.17’den de anlaşılabileceği gibi elektrot içindeki Mo miktarı arttıkça elektrik iletkenlik azalmaktadır (Elektrot No CuMo1, CuMo3, CuMo2). Bunun sebebi Cu’nun Mo’ya

göre daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır. P_s arttıkça elektrik iletkenlik artmaktadır (Elektrot No CuMo7, CuMo3, CuMo6). Bunun sebebi, P_s 'nin artmasıyla elektrot içerisinde bulunan tozların birbirlerine daha fazla mekanik alaşımlanmaları ve aralarında elektrik iletken bir köprü oluşturmalarıdır. T_s 'nin artmasıyla elektrik iletkenlik önce azalmış sonra artmıştır (Elektrot No CuMo4, CuMo5, CuMo3).

5.4.2. İİH sonuçları

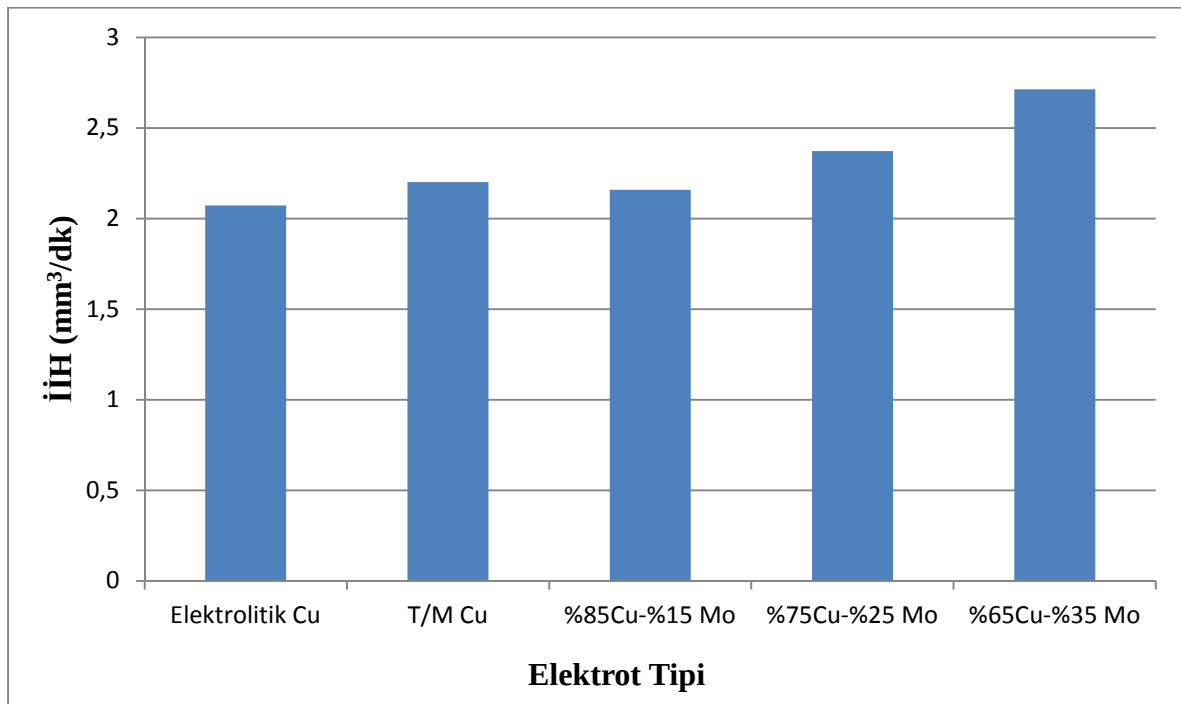
Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen İİH değerleri Çizelge 5.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.18. İİH değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi İş Parçası Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası İş Parçası Ağırlıkları (g)	İş Parçası Yoğunluğu (g/cm ³)	İİH (mm ³ /dk)
CuMo1	260,86	259,85	7,8	2,16
CuMo2	258,38	257,11	7,8	2,71
CuMo3	261,06	259,95	7,8	2,37
CuMo4	257,99	256,67	7,8	2,82
CuMo5	265,06	263,73	7,8	2,84
CuMo6	259,83	258,72	7,8	2,37
CuMo7	264,81	264,32	7,8	1,05
E-Cu	262,96	261,99	7,8	2,07
TM-Cu	262,27	261,24	7,8	2,20

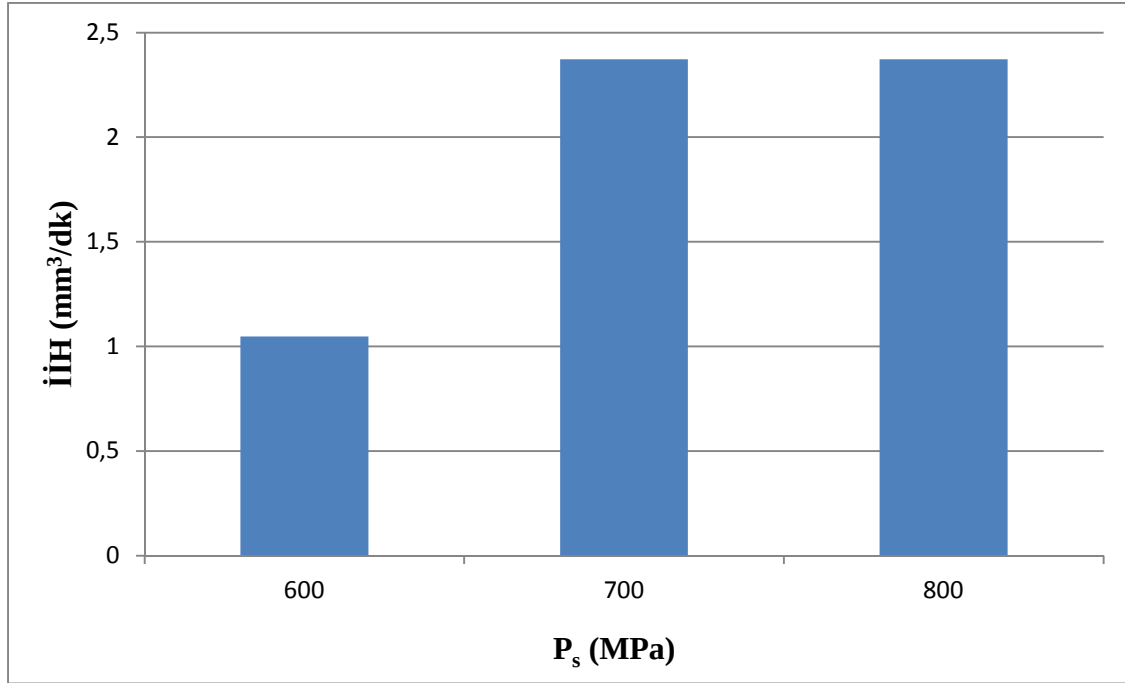
Şekil 5.58'de Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının İİH üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Mo miktarı arttıkça İİH artmaktadır. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında İİH yaklaşık %10 artmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %14 artmıştır. Grafik incelendiğinde dört T/M elektrotun, elektrolitik Cu'ya göre daha yüksek İİH'na sebep olduğu görülmüştür. Bu da uygun koşullar ve parametreler kullanıldığında kompozit T/M elektrotların, geleneksel olarak elektro erozyonla işlemede en çok kullanılan elektrot malzemesi olan elektrolitik Cu'ya göre daha hızlı işleme gerçekleştirebileceğini göstermektedir.

Literatürde, T/M elektrotların İİH değerleri elektrolitik Cu elektrotları ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha yüksek İİH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 4, 5, 18, 21]. Kompozit T/M elektrot içindeki Cu miktarının artması ile İİH'nın artacağı ZrB₂-Cu elektrotların kullanıldığı [36] numaralı referansta belirtilmiş ve Cu ile ZrB₂ arasındaki düşük bağlanma kuvvetinden dolayı, akım uygulandığında Cu ile ZrB₂ arasında kıvılcım oluşmayabileceği ifade edilmiştir. Diğer taraftan, [2] numaralı referansta artan Cu oranı ile birlikte İİH'nın önce arttığı sonra azaldığı belirtilmiştir.

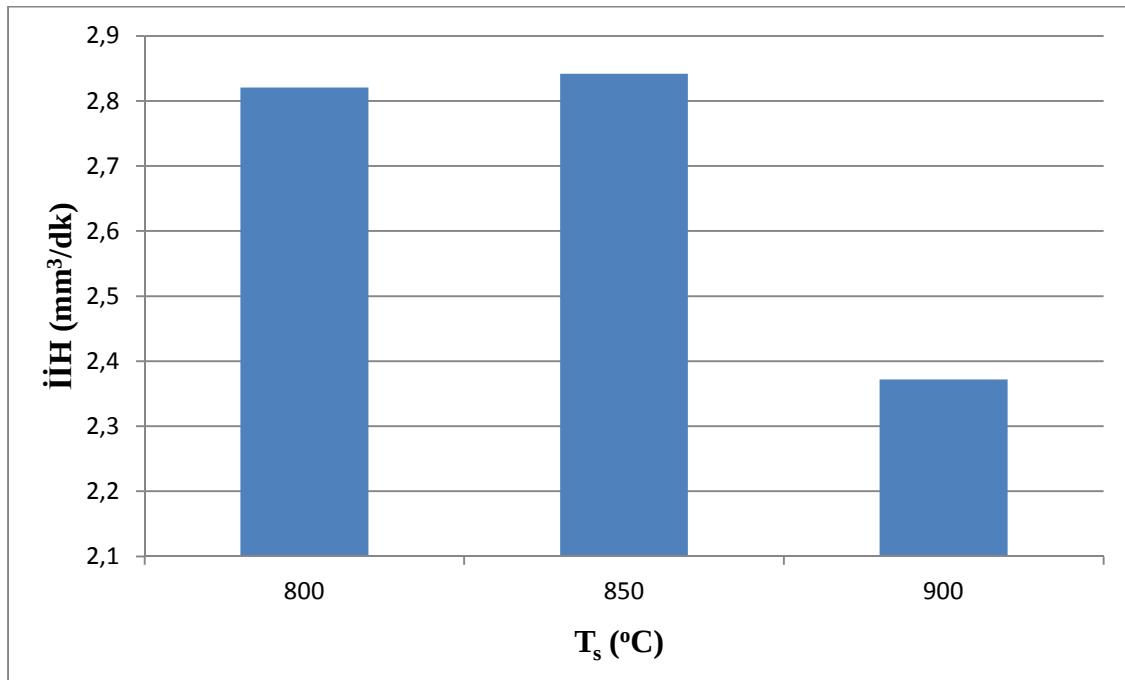


Şekil 5.58. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için İİH sonuçları

Şekil 5.59'da Mo-Cu tozlarının P_s değerlerinin İİH üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça İİH önce artmış, sonra sabit kalmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında İİH yaklaşık %127 artmıştır. P_s 700 ve 800 MPa'a çıkartıldığında elde edilen İİH değeri (2.37 mm³/dk), elektrolitik Cu ile yapılan işlemede elde edilen değerden (2.07 mm³/dk) fazladır. Bu da yukarıda belirtildiği gibi uygun koşullar ve parametreler kullanıldığında kompozit T/M elektrotlar yardımıyla, işleme hızının, elektrolitik Cu ile yapılan işlemlere göre, artırılabilceğini göstermektedir.



Şekil 5.59. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların $\dot{I}I\dot{H}$ değerleri (Mo katkılı elektrotlar)



Şekil 5.60. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların $\dot{I}I\dot{H}$ değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

T_s 'nin $\dot{I}I\dot{H}$ üzerindeki etkisi Şekil 5.60'ta gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça $\dot{I}I\dot{H}$ önce artmış sonra azalmıştır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında $\dot{I}I\dot{H}$ yaklaşık %1 artarken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında $\dot{I}I\dot{H}$ yaklaşık %17 azalmıştır.

Her üç sıcaklıkta elde edilen İİH değerleri, elektrolitik Cu ile yapılan işlemekten elde edilen değere göre yüksek çıkmıştır.

Literatürde, İİH üzerindeki P_s ve T_s etkisi [5, 7, 10, 12, 21, 29, 36] numaralı referanslarda da incelenmiş ve P_s ve/veya T_s 'nin artmasıyla daha yüksek İİH değerleri elde edildiği belirtilmiştir.

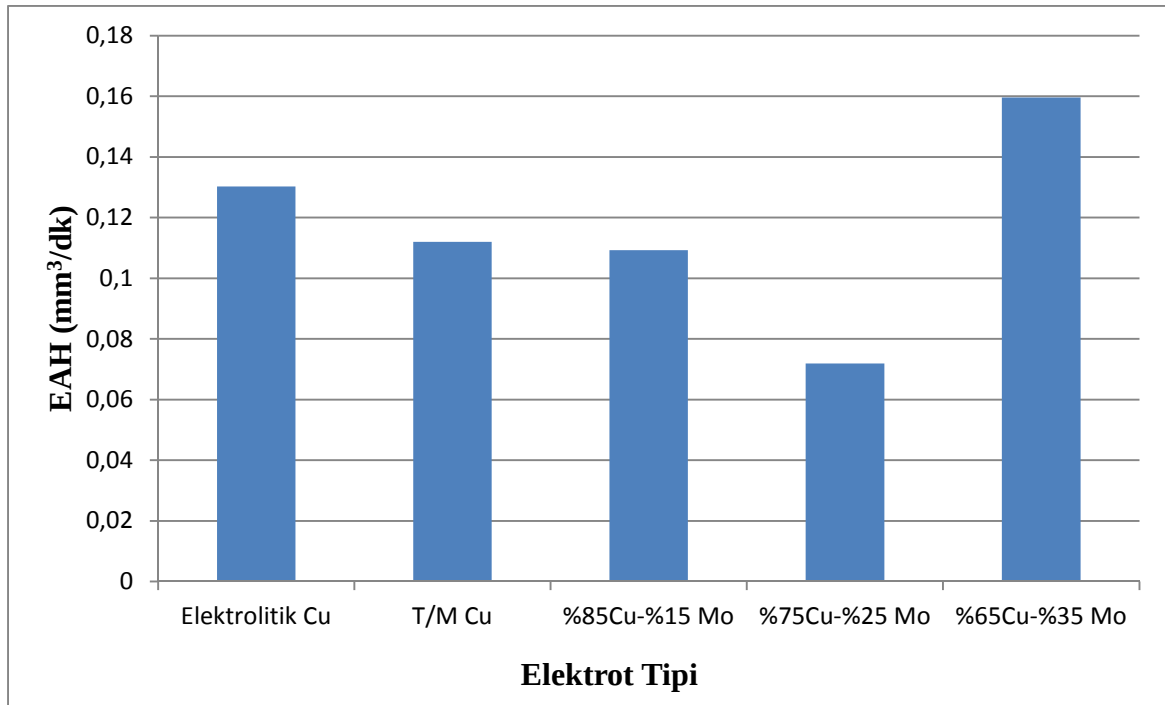
5.4.3. EAH sonuçları

Deneylerden önce ve sonra ölçülen elektrot ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen EAH değerleri Çizelge 5.19'da gösterilmiştir.

Şekil 5.61'de Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının EAH üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi Mo miktarı arttıkça EAH önce azalmış, sonra artmıştır. Mo katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Mo miktarı arttıkça gözenek miktarı artmış, gözenek miktarı artınca da yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır. Elektrot yüzeyinde biriken Fe miktarının artması ile EAH azalmıştır, fakat tozların arasındaki bağlanma kuvveti azaldığı için EAH artmıştır. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında EAH yaklaşık %34 azalmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %122 artmıştır. Dikkat çekici bir şekilde %15 ve %25 Mo katkılı elektrotlar, elektrolitik Cu'ya göre hem daha iyi İİH'na sebep olurken, hem de elektrot aşınmaları daha az olmuştur. Dolayısıyla uygun K_t , P_s ve T_s değerlerinde, Mo katkılı kompozit T/M elektrotlar, elektrolitik Cu'ya göre daha verimli bir şekilde kullanılabilir. [2] numaralı referansta kompozit T/M elektrot içindeki Cu oranı arttıkça EAH'nın artacağı belirtilmiştir. Diğer taraftan, Cu oranı arttıkça EAH'nın azalacağı [36] numaralı referansta belirtilmiştir. Literatürde, T/M elektrotların EAH değerleri elektrolitik Cu elektrotlarındaki ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha düşük EAH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 3, 5, 18, 36].

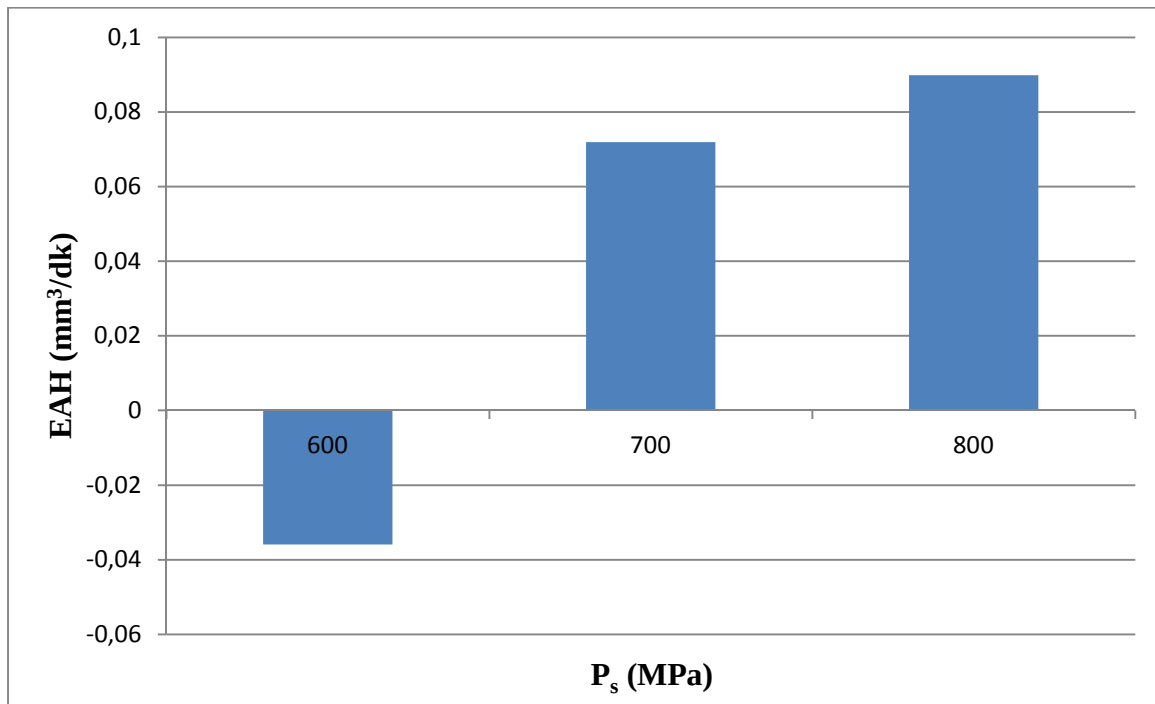
Çizelge 5.19. EAH değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Elektrot Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası Elektrot Ağırlıkları (g)	Elektrot Yoğunluğu (g/cm ³)	EAH (mm ³ /dk)
CuMo1	15,01	14,95	9,149	0,11
CuMo 2	12,89	12,80	9,401	0,16
CuMo 3	13,88	13,84	9,275	0,07
CuMo 4	13,16	13,01	9,275	0,27
CuMo 5	12,67	12,54	9,275	0,23
CuMo 6	13,89	13,84	9,275	0,09
CuMo 7	13,89	13,91	9,275	-0,04
E-Cu	14,25	14,18	8,960	0,13
TM-Cu	14,12	14,06	8,960	0,11

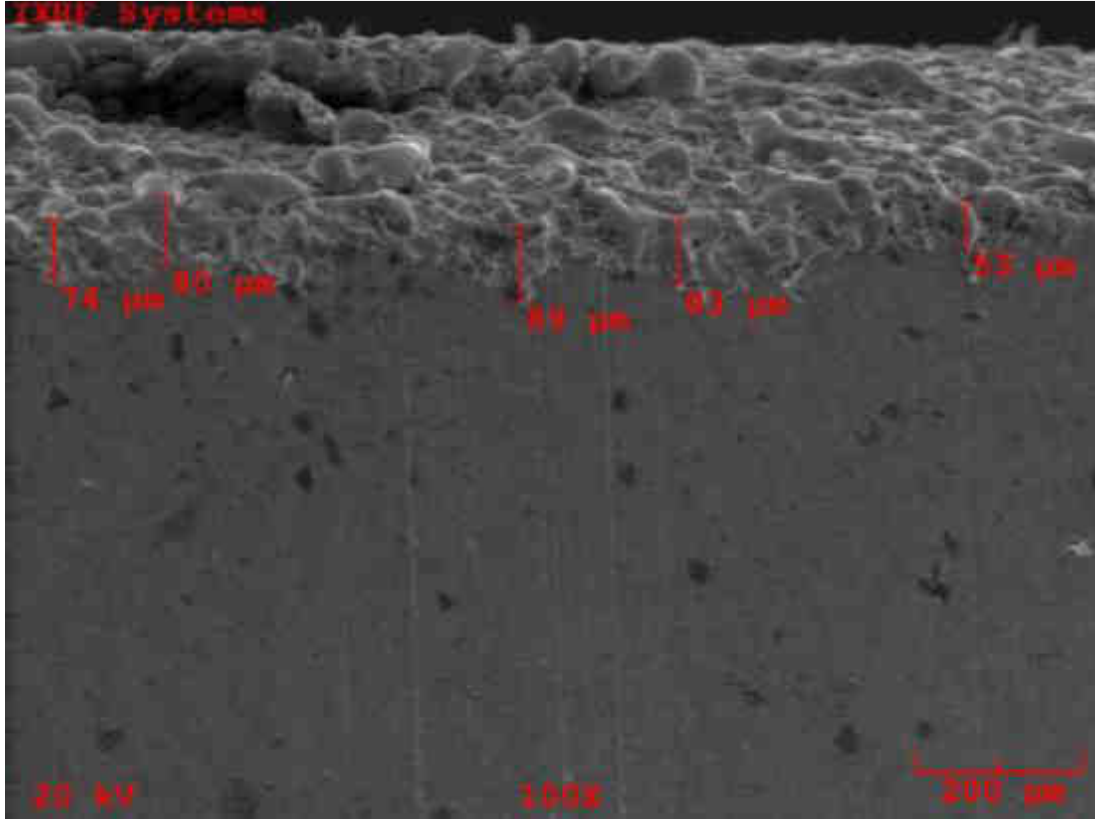
Şekil 5.61. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları

Şekil 5.62'de Mo-Cu tozlarının P_s değerlerinin EAH üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça EAH artmıştır. P_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır. Gözenek miktarının azalması ile elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu sayede de İİH ve EAH artmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında EAH yaklaşık %300

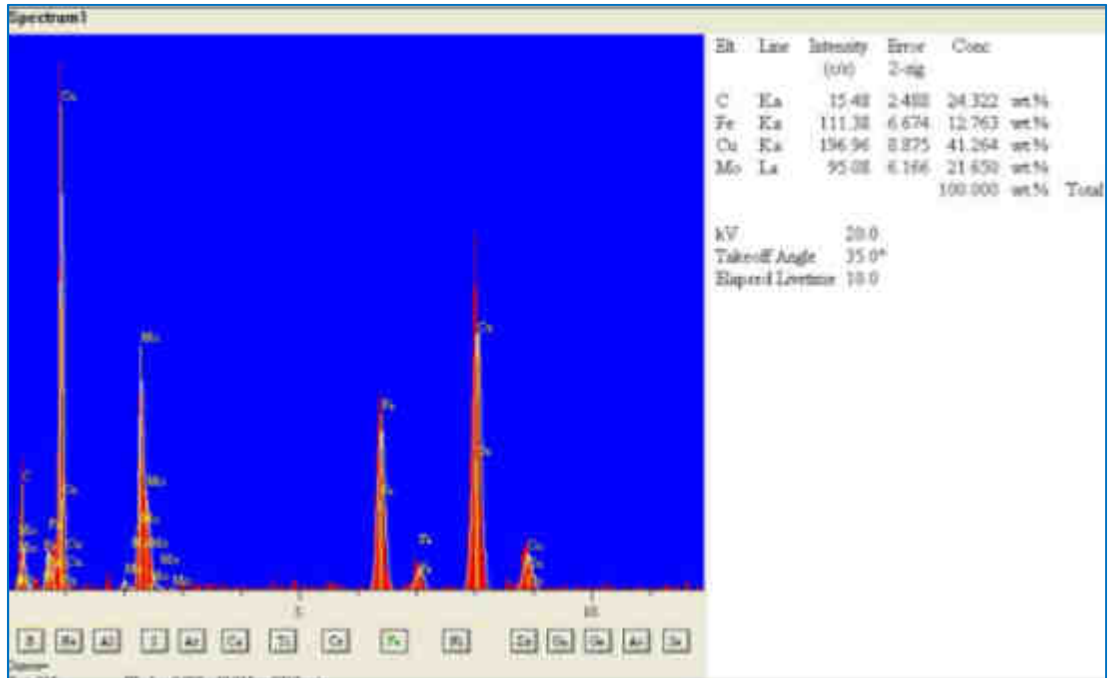
artmış, 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %25 artmıştır. Dikkat edilirse, 600 MPa'da sıkıştırılan elektrotlar için EAH negatif çıkmıştır. Yani elektrottan malzeme aşınmamış, elektrot üzerine malzeme birikmiştir. 600 MPa'da sıkıştırılan elektrotun SEM analizi (Şekil 5.63), yüzeyde ergimiş-katılaşmış bir katman oluştuğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ergimiş-katılaşmış katman kalınlığının 89 μm 'ye kadar çıktığı ilgili şekillerden görülmektedir. EDS analizleri ise (Şekil 5.64) ergimiş-katılaşmış katmanda yaklaşık % 24 C, % 22 Mo, % 13 Fe ve % 41 Cu olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.62. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri (Mo katkılı elektrotlar)



Şekil 5.63. CuMo7 elektrot yüzeyinde oluşan ergimiş-katılaşmış katmanın SEM görüntüsü

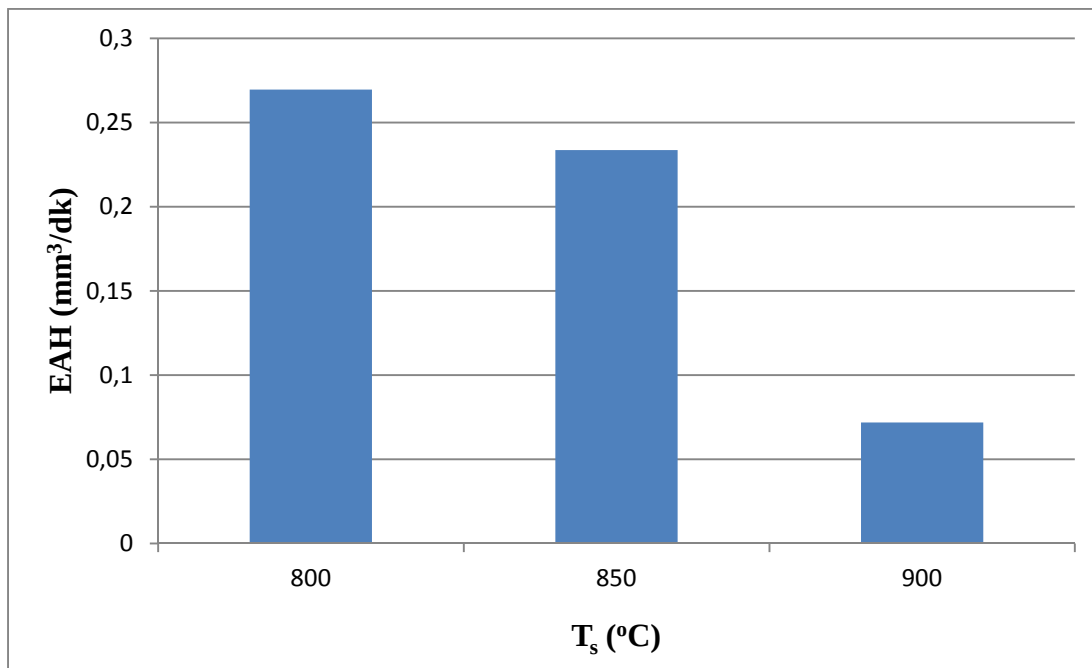


Şekil 5.64. CuMo7 elektrot yüzeyinde oluşan ergimiş-katılaşmış katmanın EDS analizi

T_s 'nin EAH üzerindeki etkisi Şekil 5.65'te gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça tozlar birbirine daha fazla kenetlenmekte ve EAH azalmaktadır. Bir diğer sebep

ise; T_s arttıkça elektrottaki gözenek miktarı azalmış, elektrot yüzeyinde biriken C miktarı düzenli olarak artmış ve bu sayede EAH azalmıştır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında EAH yaklaşık %13 azalmışken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %69 azalmıştır.

Yüksek P_s ve T_s değerleri ile daha düşük EAH elde edileceği [7, 10, 12, 29] numaralı referanslarda da belirtilmiştir. Bu çalışmalarda, yüksek P_s ve/veya T_s değerlerinde toz taneciklerinin birbirlerine daha kuvvetli bir şekilde bağlanacağı ve bu sayede elektrottan iş parçasına malzeme transferinin azalacağı ve iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarının azalacağı belirtilmiştir. Fakat Samuel ve Philip'in de [5] belirttiği gibi T/M elektrotların EAH değerleri sadece P_s ve T_s 'ye değil, aynı zamanda tozların ergime sıcaklıkları ve birbirleri arasındaki bağlanma kuvvetine de bağlıdır.



Şekil 5.65. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların EAH değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

5.4.4. Bağıl aşınma (BA) sonuçları

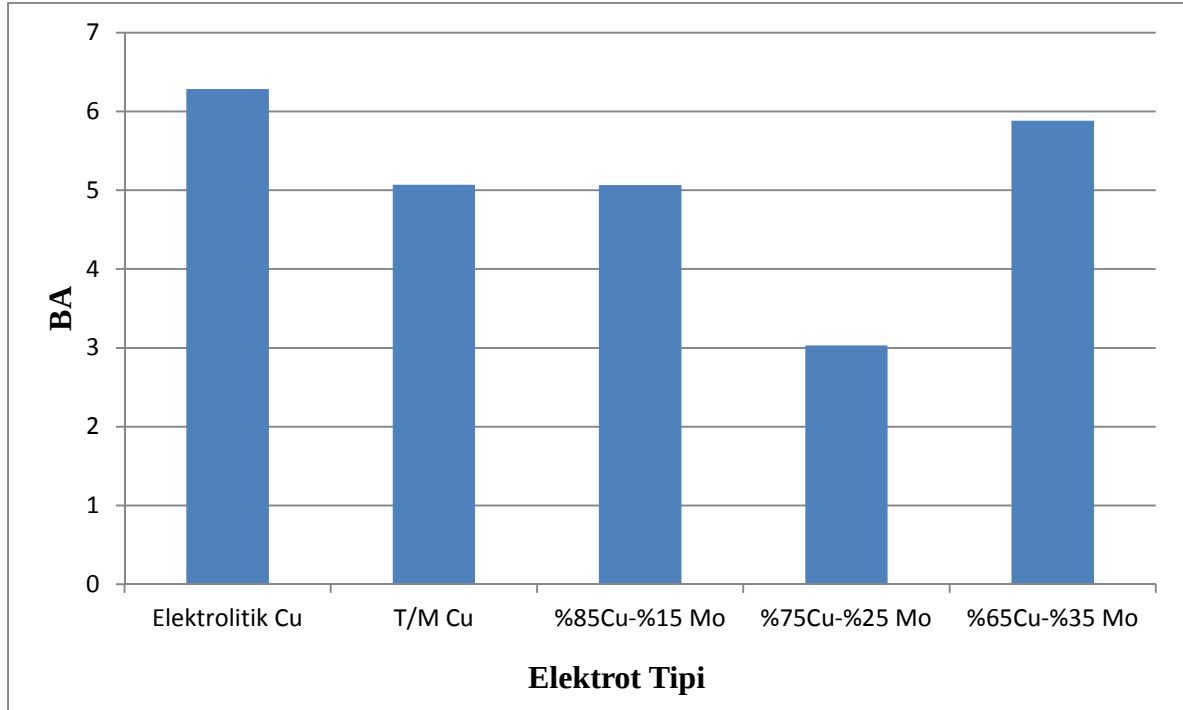
EAH değerlerinin İİH değerlerine bölünüp 100 ile çarpılması neticesinde elde edilen bağıl aşınma değerleri Çizelge 5.20'de gösterilmiştir. Birim İİH'ya göre elektrot ne kadar az aşınırsa (EAH, dolayısıyla BA, ne kadar az olursa) işlemenin o kadar verimli olduğu söylenebilir.

Şekil 5.66'da Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının BA üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında BA yaklaşık %40 azalmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %94 artmıştır.

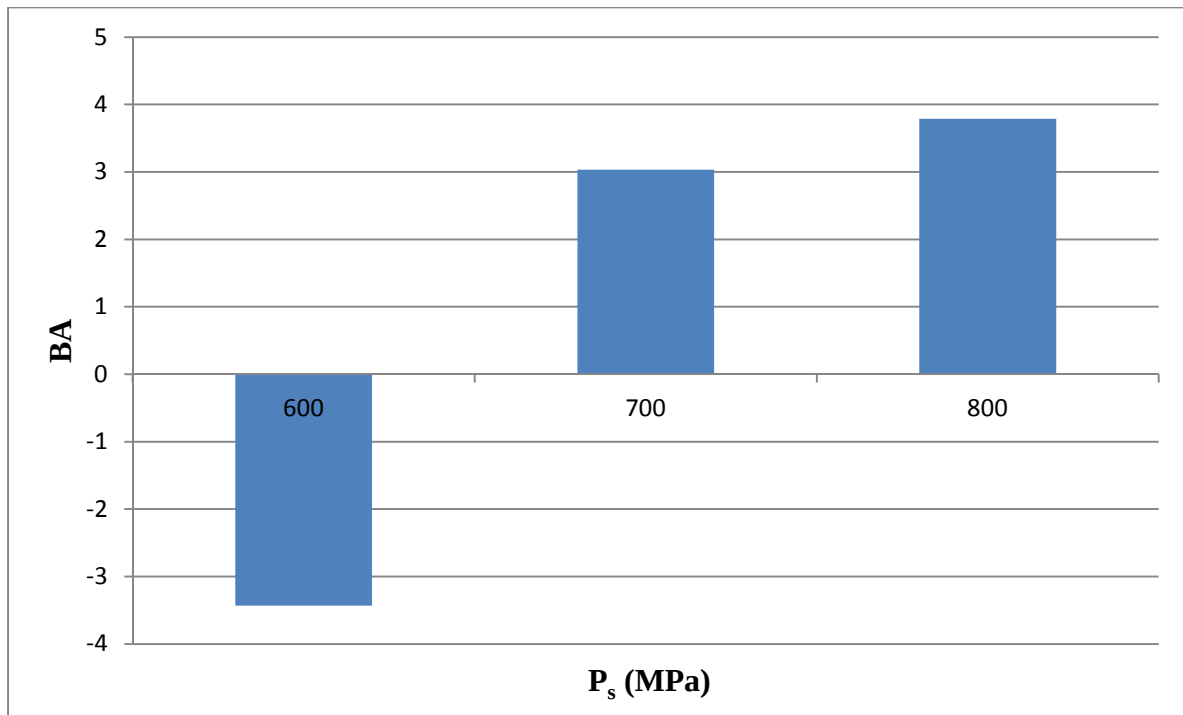
Şekil 5.67'de Mo-Cu tozlarının P_s değerlerinin BA üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça BA artmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında BA yaklaşık %188 artmış, 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %25 artmıştır. Dikkat edilirse, 600 MPa'da sıkıştırılan elektrotlar için BA negatif çıkmıştır. Bunun sebebi bu basınçta elde edilen EAH'nın negatif olmasıdır.

Çizelge 5.20. BA değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	EAH (mm ³ /dk)	İİH (mm ³ /dk)	BA
CuMo1	0,11	2,16	5,07
CuMo 2	0,16	2,71	5,88
CuMo 3	0,07	2,37	3,03
CuMo 4	0,27	2,82	9,56
CuMo 5	0,23	2,84	8,22
CuMo 6	0,09	2,37	3,79
CuMo 7	-0,04	1,05	-3,43
E-Cu	0,13	2,07	6,28
TM-Cu	0,11	2,20	5,07

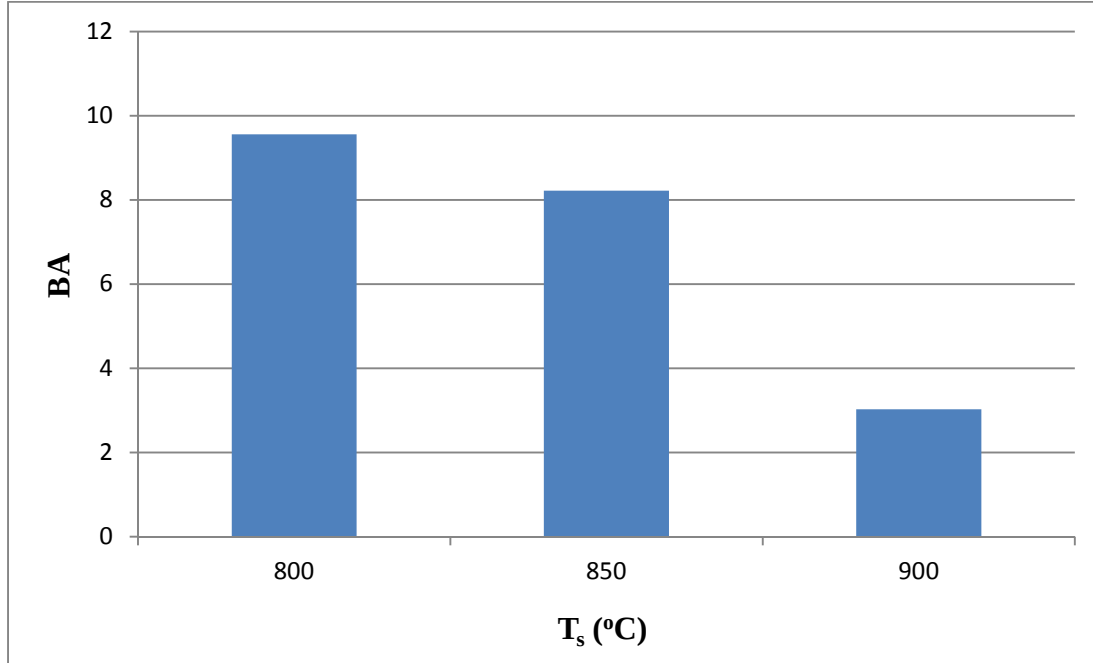


Şekil 5.66. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları



Şekil 5.67. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

T_s 'nin BA üzerindeki etkisi Şekil 5.68'de gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça BA azalmaktadır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında BA yaklaşık %14 azalırken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %63 azalmıştır.



Şekil 5.68. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların BA değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

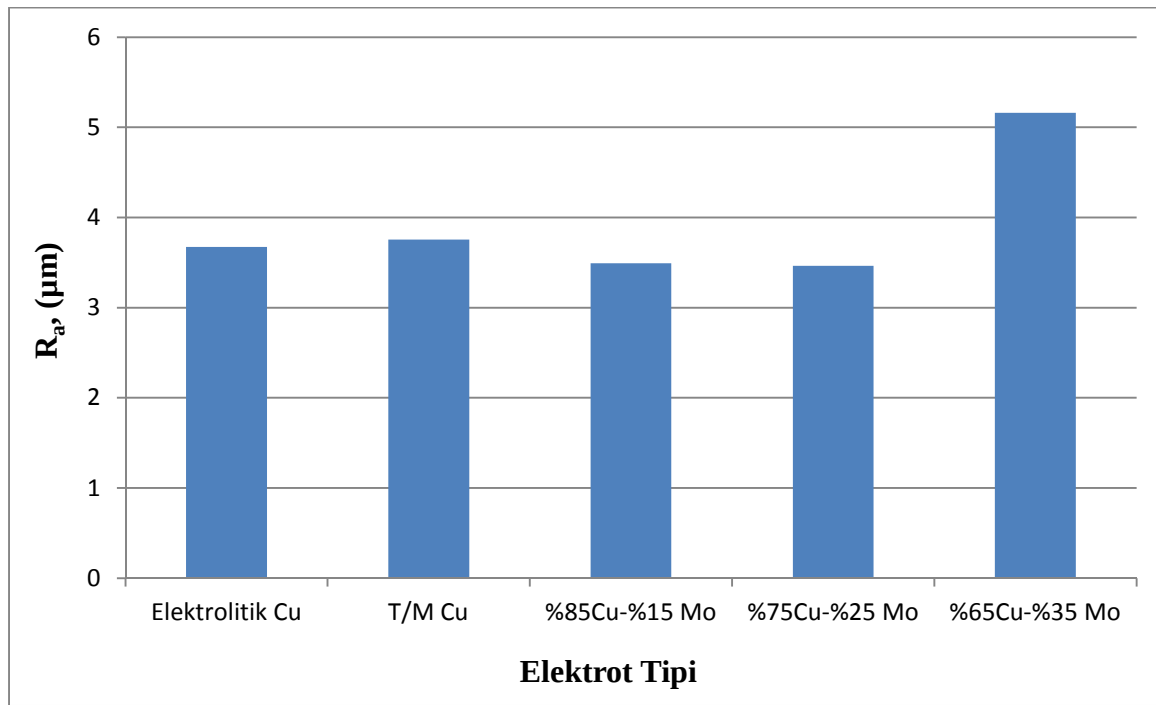
5.4.5. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

İş parçalarının işlenmiş yüzeylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları R_a ve R_z cinsinden Çizelge 5.21'de gösterilmiştir.

Şekil 5.69'da R_a cinsinden, Şekil 5.70'te ise R_z cinsinden, Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi Mo miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden önce azalmış, sonra artmış, R_z cinsinden ise önce artmış, sonra azalmıştır. Kompozit T/M elektrot içindeki TiC [7] ve Zr_2B [36] oranının artması ile R_a 'nın arttığı literatürde belirtilmiştir. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %1 azalmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %49 artmıştır. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %50 artmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %14 azalmıştır.

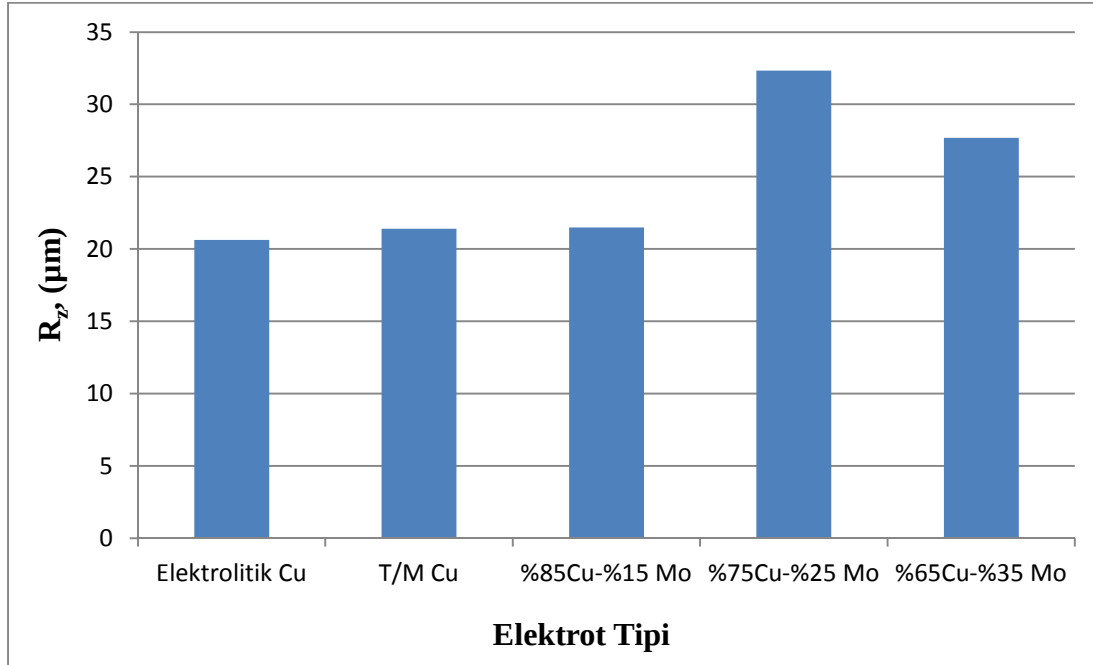
Çizelge 5.21. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü, R_z (μm)
CuMo1	3,49	21,49
CuMo2	5,16	27,69
CuMo3	3,47	32,34
CuMo4	3,60	20,10
CuMo5	3,51	22,83
CuMo6	3,45	19,90
CuMo7	3,46	21,63
E-Cu	3,67	20,63
TM-Cu	3,76	21,39

Şekil 5.69. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_a değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

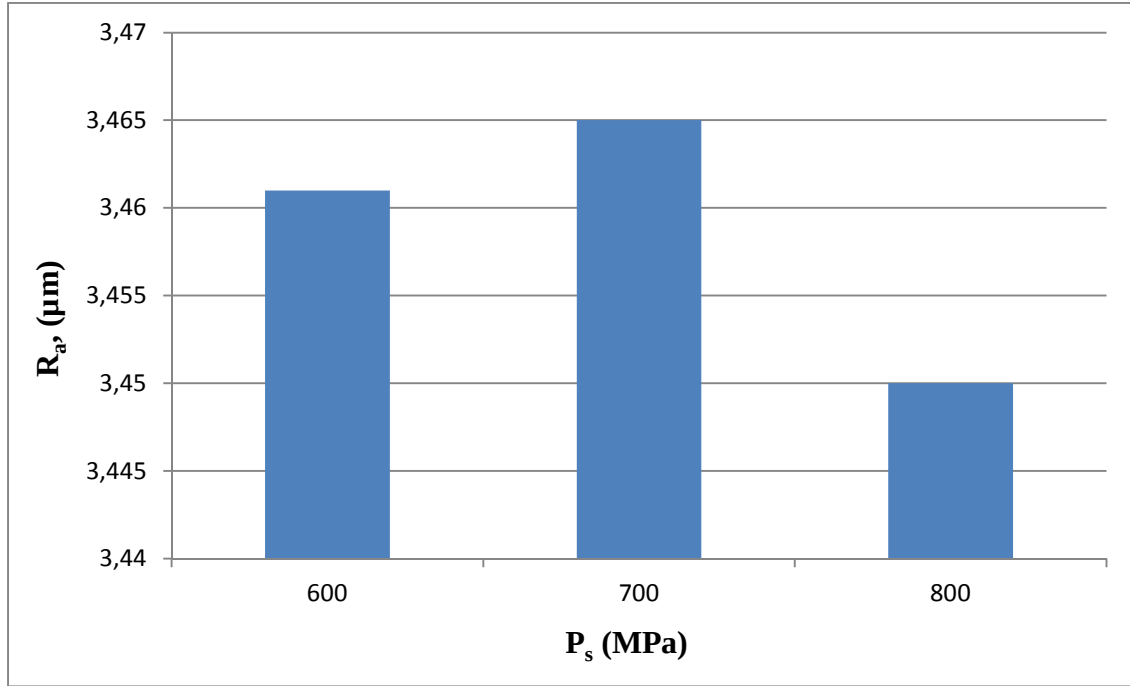
Literatürde T/M elektrotlar ile elde edilen R_a değerleri 2,5-15 μm arasında değişmektedir [10, 12, 25, 26]. Katı Cu elektrota göre T/M elektrotların daha düşük R_a değerleri verdiği [4] numaralı referansta da belirtilmiştir. Bu çalışmada, yazarlar, elektrottan kopan tozların işparçası yüzeyinde birikmesi ile yüzey çatlaklarının azaldığını ve böylece yüzey pürüzlülüğünün de azaldığını belirtmişlerdir. Benzer bir yorum T/M Al-Mo elektrotlar için de yapılmıştır [25]. Diğer taraftan, işparçası yüzeyine yapışan yüksek miktardaki tozdan

dolay T/M elektrotlar ile yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek çıkacağı da literatürde belirtilmiştir [25]

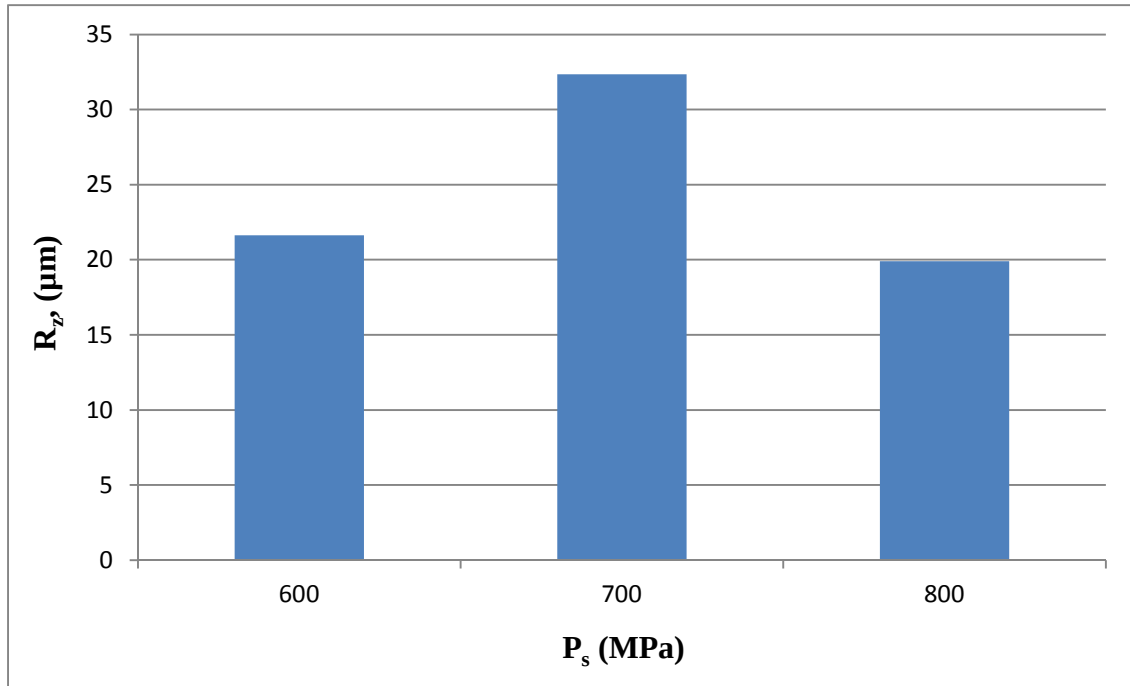


Şekil 5.70. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_z değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

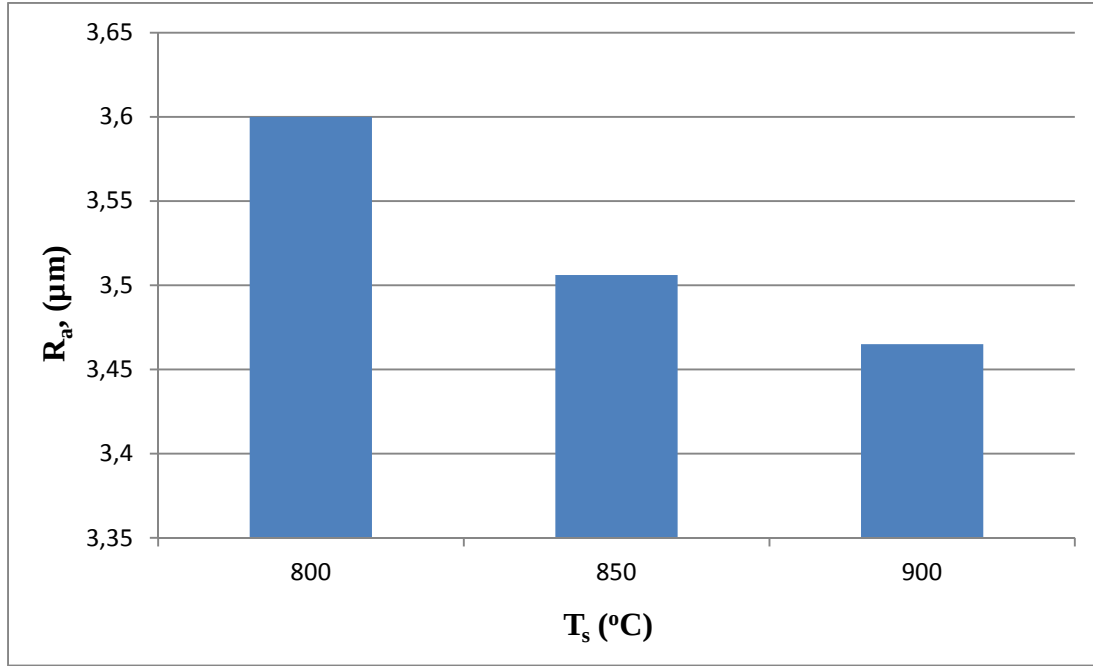
Şekil 5.71'de R_a cinsinden, Şekil 5.72'de R_z cinsinden Mo-Cu tozlarının P_s değerlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça önce yüzey pürüzlülüğü artmış, daha sonra azalmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %0.1 artmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %0.4 azalmıştır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %50 artmış, fakat 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %39 azalmıştır. P_s arttıkça elektrik iletkenlik artar ve böylece düzensiz kıvılcım oluşumu azalar, daha düzgün, pürüzsüz yüzeyler elde edilir [21]. Das ve Misra [7], TiC-Cu ham elektrotları 200, 300 ve 400 MPa'da sıkıştırmış ve P_s - R_a ilişkisi ile alakalı benzer yorumu yapmışlardır.



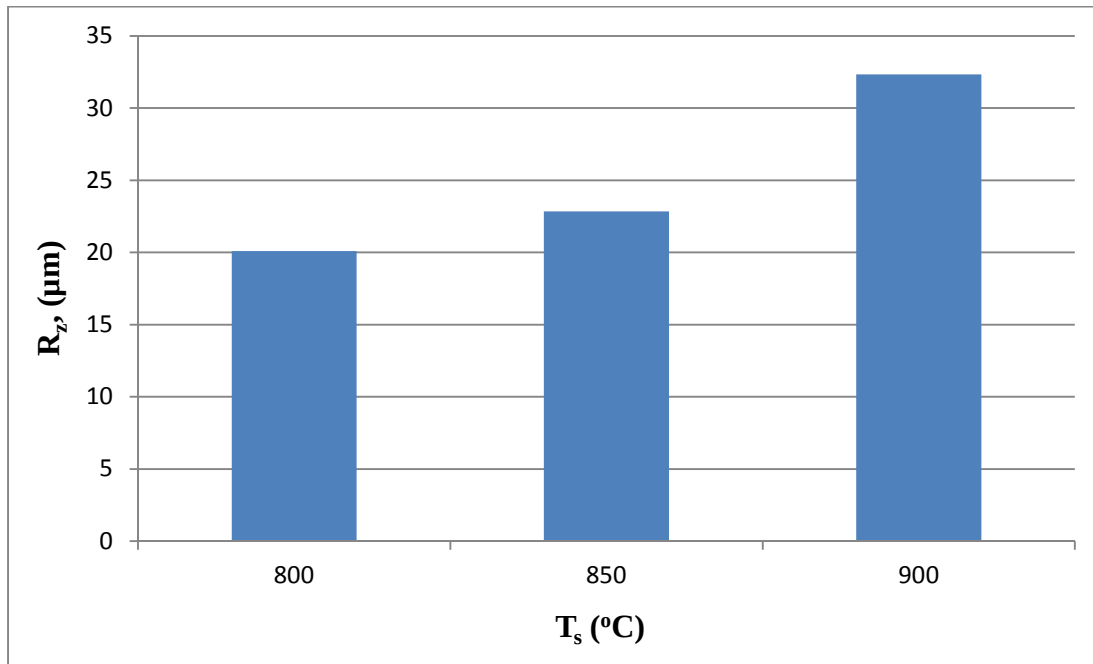
Şekil 5.71. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri (Mo katkılı elektrotlar)



Şekil 5.72. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri (Mo katkılı elektrotlar)



Şekil 5.73. Farklı T_s ’lerde üretilen T/M elektrotların R_a değerleri (Mo katkılı elektrotlar)



Şekil 5.74. Farklı T_s ’lerde üretilen T/M elektrotların R_z değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

T_s ’nin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi Şekil 5.73’te R_a cinsinden, Şekil 5.74’te ise R_z cinsinden gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi T_s arttıkça yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden sürekli azalmış, R_z cinsinden ise sürekli artmıştır. T_s 800 °C’den 850 °C’ye çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %2.6 azalmış, 850 °C’den 900

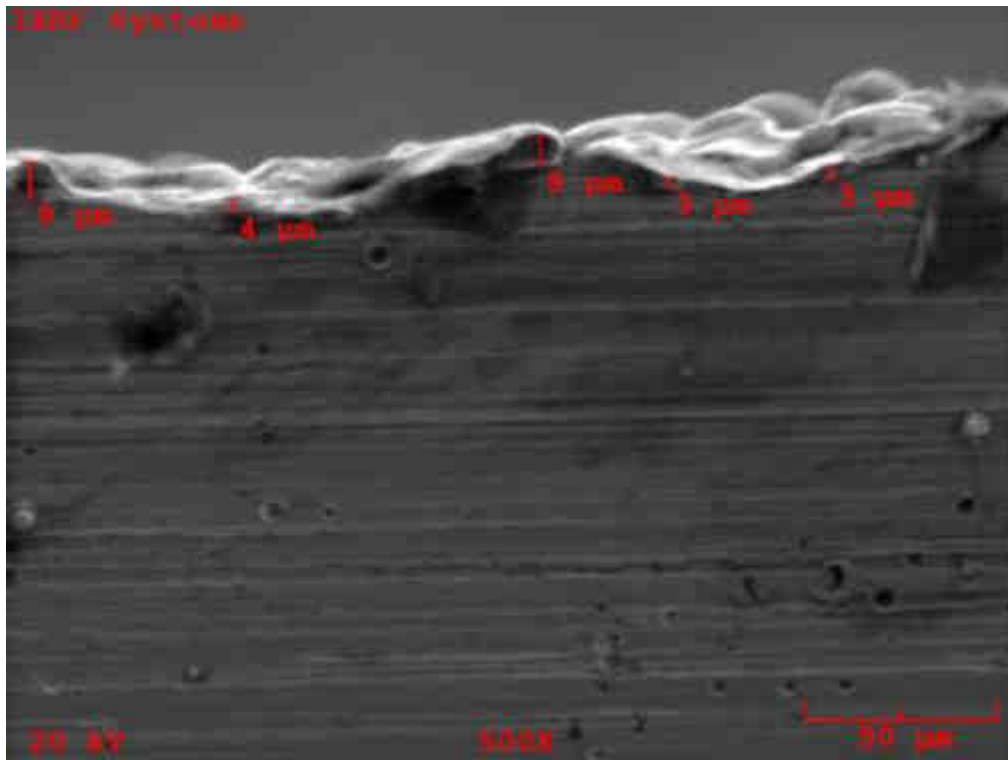
$^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %1.2 azalmıştır. T_s 800 $^{\circ}\text{C}$ 'den 850 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %14 artmış, 850 $^{\circ}\text{C}$ 'den 900 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkartıldığında ise yaklaşık %42 artmıştır.

5.4.6. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)

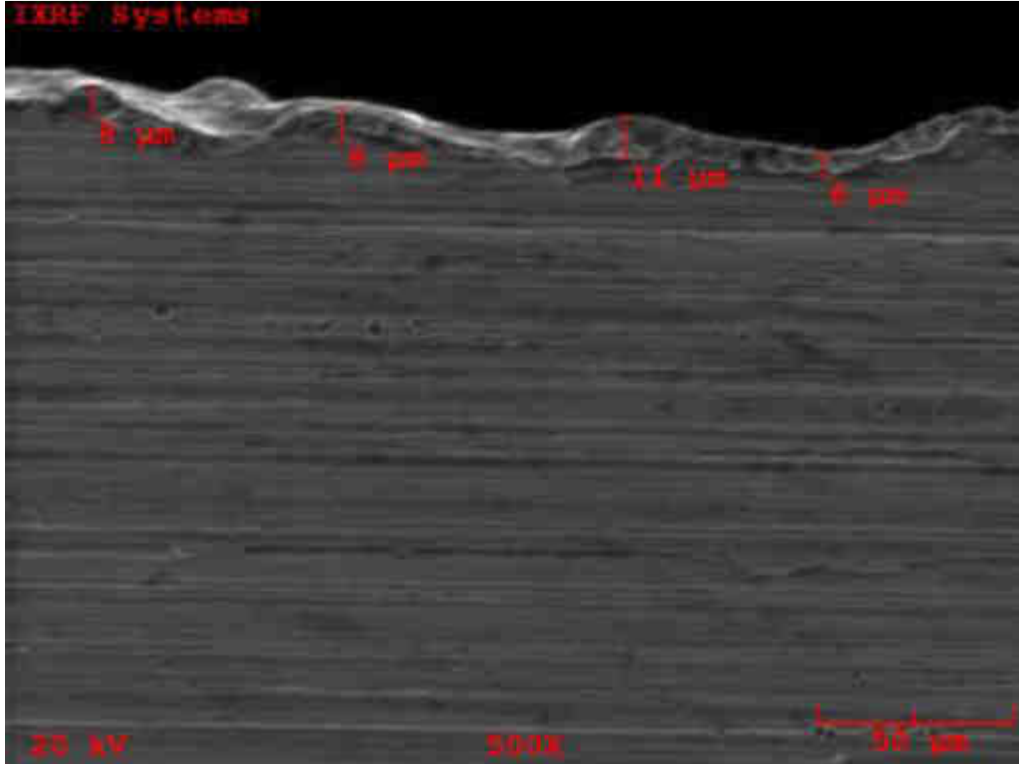
Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığı, SEM analizleri yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 5.75 ve 5.76'da CuMo T/M elektrotlarla yapılan işleme neticesinde elde edilen yüzeyde oluşan katman kalınlığı gösterilmiştir. %85 Cu - %15 Mo oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 29 μm 'ye kadar; %65 Cu - %35 Mo oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 34 μm 'ye kadar; %75 Cu - %25 Mo oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 19 μm 'ye kadar; %75 Cu - %25 Mo oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 800 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 21 μm 'ye kadar; %75 Cu - %25 Mo oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 850 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 9 μm 'ye kadar; %75 Cu - %25 Mo oranında karıştırılmış, 800 MPa'da sıkıştırılmış, 900 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 11 μm 'ye kadar; %75 Cu - %25 Mo oranında karıştırılmış, 600 MPa'da sıkıştırılmış, 900 $^{\circ}\text{C}$ 'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 41 μm 'ye kadar çıktığı görülmüştür. İlgili şekiller detaylı incelendiğinde, T_s 'nin ve elektrot içerisindeki Mo miktarının değişiminin yüzeyde oluşan katman kalınlığı değişimi ile orantılı olmadığı görülmüştür. Fakat P_s arttıkça yüzeyde oluşan katman kalınlığı azalmıştır. Bunun muhtemel sebebi olarak şu söylenebilir. P_s arttıkça elektrot içerisindeki tozlar birbirlerine daha iyi kenetlenir ve elektrotun elektrik iletkenliği artar. Bu sayede elektrot daha iyi kıvılcım oluşmasını sağlar ve dielektrik sıvısı da zamanında iş parçası yüzeyinden ergiyen malzemeleri ortamdan uzaklaştırdığı için, yüzeyde oluşan katman kalınlığı azalır. Genel olarak Cr tozlarıyla karşılaştırıldığında, Mo katkılı T/M elektrotların Cr katkılı olanlara göre daha az yüzeyde oluşan katman kalınlığına yol açtığı söylenebilir. Bunun muhtemel sebebi ise Mo'nun Cr'ye göre daha fazla ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır [17].

Yüzeyde oluşan katman kalınlığının kompozit T/M elektrot içindeki TiC oranının artması ile arttığı [7] numaralı referansta belirtilmiştir. P_s'nin artması ile yüzeyde oluşan katman kalınlığının azalacağı [7, 10, 12] numaralı referanslarda belirtilmiştir.

Literatürde; düşük karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 12-100 μm [18], C-40 karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 3-785 μm [10, 12], Ti-6Al-4V işparçasının Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 4-11 μm [21], AISI 1045 işparçasının Cu-Cr T/M elektrotlar ile işlenmesi ile <10 μm [3], AISI H13 işparçasının WC-Co T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30 μm [29], Ni esaslı Haynes 230 süperalaşımı işparçasının Al-Mo T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30-50 μm [25, 26], alüminyum işparçasının TiC-Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30-160 μm [7] katman kalınlığı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.75. CuMo5 nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.76. CuMo6 nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü

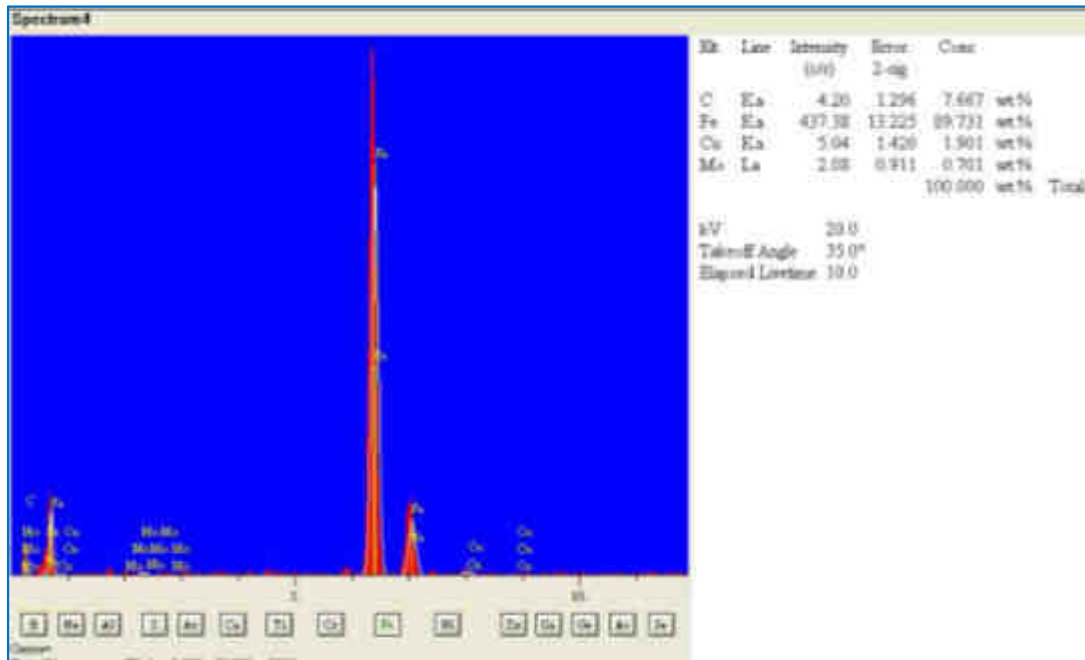
5.4.7. EDS analizleri

Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi, EDS analizleri yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 5.77’de örnek bir EDS analizi gösterilmiştir. Çizelge 5.22’de Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.22 incelendiğinde, iş parçası yüzeyinde Mo ve Cu tozlarının biriktiği görülmüştür. Bunun sebebi, işleme sırasında elektrottan kopan Mo ve Cu tozlarının iş parçası yüzeyine yapışmasıdır. Çizelge incelendiğinde, elektrot içerisinde bulunan Mo miktarı ve P_s ile iş parçası yüzeyinde biriken Mo ve Cu malzeme miktarının doğru orantılı olmadığı görülmüştür. T_s arttıkça, iş parçası yüzeyinde biriken Mo ve Cu malzeme miktarları azalmıştır. Bunun muhtemel sebebi, T_s ’nin artmasıyla elektrot yoğunluğunun artması ve bu sebeple işleme sırasında elektrottan daha az malzeme kopmasıdır [7, 10, 12].

Çizelge 5.22. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	C (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mo (%)
CuMo1	7,67	89,73	1,90	0,70
CuMo 2	13,15	84,13	1,79	0,93
CuMo 3	12,29	84,94	2,69	0,09
CuMo 4	10,24	84,59	3,94	1,24
CuMo 5	10,31	85,72	3,16	0,82
CuMo 6	5,24	91,10	2,68	0,99
CuMo 7	17,37	80,47	1,87	0,29



Şekil 5.77. CuMo1 nolu elektrot için, iş parçası EDS analizi

5.4.8. Mikrosertlik ölçümleri

Mo tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında ölçülen iş parçası yüzeyinin mikrosertlik değerleri Çizelge 5.23'te verilmiştir. Yüzeyde beş farklı yerden ölçüm alınmış ve tabloda bu ölçümlerin ortalamaları gösterilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi Mo katkılı elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzeyinin mikrosertliği, ana metalin sertliğinden (593,5 HV) daha yüksek çıkmıştır. En yüksek mikrosertlik elektrolitik Cu elektrotla yapılan işlemede çıkmıştır (1637,6 HV). [3] numaralı referansta da elektrolitik Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği Cu-Cr T/M elektrot ile işlenenden daha

yüksek çıkmıştır. Fakat [6] numaralı referansta TaC-Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği elektrolitik Cu ile işlenenden daha yüksek çıkmıştır. En düşük mikrosertlik ise en düşük sıcaklıkta sinterlenen elektrot ile işlenen yüzeyde çıkmıştır (682,5 HV). Kompozit T/M elektrot içindeki Mo miktarı arttıkça, iş parçası yüzeyinin mikrosertliği önce azalmış sonra artmıştır (Elektrot No CuMo1, CuMo3, CuMo2). Das ve Misra [7], TiC-Cu T/M elektrot içindeki Cu oranını azalttıkça, işlenmiş yüzeyin mikrosertliğinin arttığını belirtmişlerdir. P_s arttıkça iş parçası yüzeyinin mikrosertliği sürekli azalmıştır (Elektrot No CuMo7, CuMo3, CuMo6). Çünkü P_s 'nin artmasıyla, iş parçasının yüzeyinde biriken karbon da azalmıştır. Benzer sonuç [7] numaralı referansta da bulunmuştur T_s 'nin artmasıyla iş parçası yüzeyinin mikrosertliği sürekli artmıştır. (Elektrot No CuMo4, CuMo5, CuMo3). Çünkü T_s 'nin artmasıyla, iş parçasının yüzeyinde biriken karbon da artmıştır.

Çizelge 5.23. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (Mo katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Mikrosertlik (HV)
CuMo1	1075,2
CuMo 2	1106,8
CuMo 3	847,1
CuMo 4	682,5
CuMo 5	714,5
CuMo 6	813,2
CuMo 7	850,6
E-Cu	1637,6
TM-Cu	786,5

5.4.9. Korozyon direnci ölçümleri

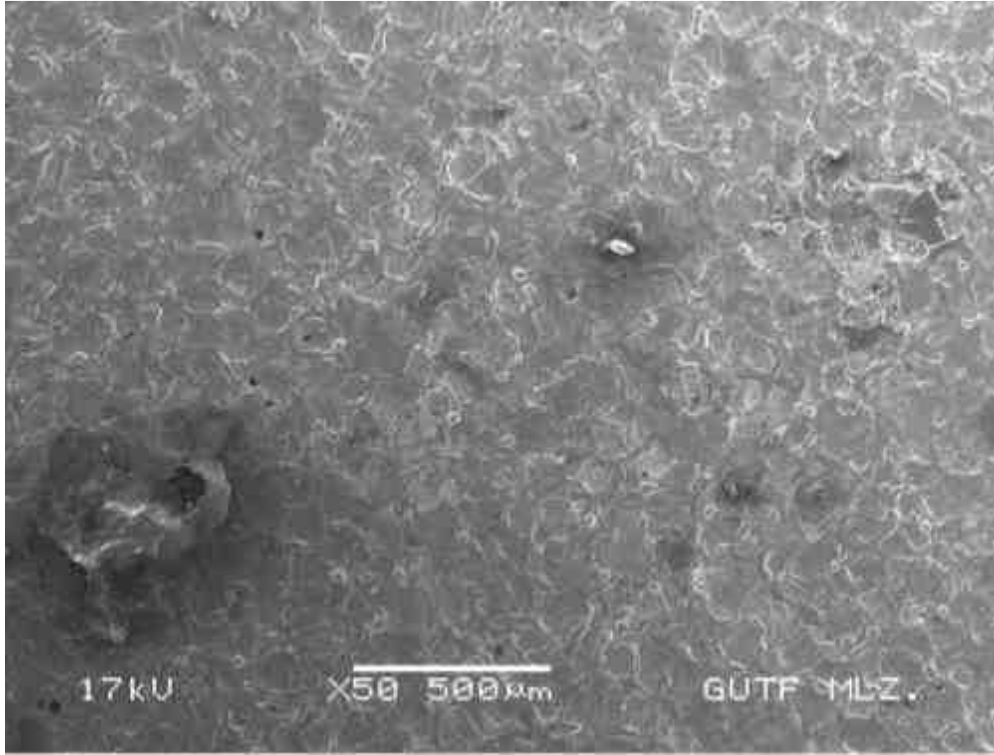
Korozyona tabi tutulmuş numunelerin yüzey görüntüleri SEM yardımıyla alınmıştır. Yüzeyde dört farklı bölgeden görüntü alınmış ve korozyonun yüzeyin % kaçına nüfuz ettiği dört farklı görüntüden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Çizelge 5.24'te elde edilen sonuçlar listelenmiştir.

Çizelge 5.24. Korozyon direnci sonuçları (Mo katkıli elektrotlar)

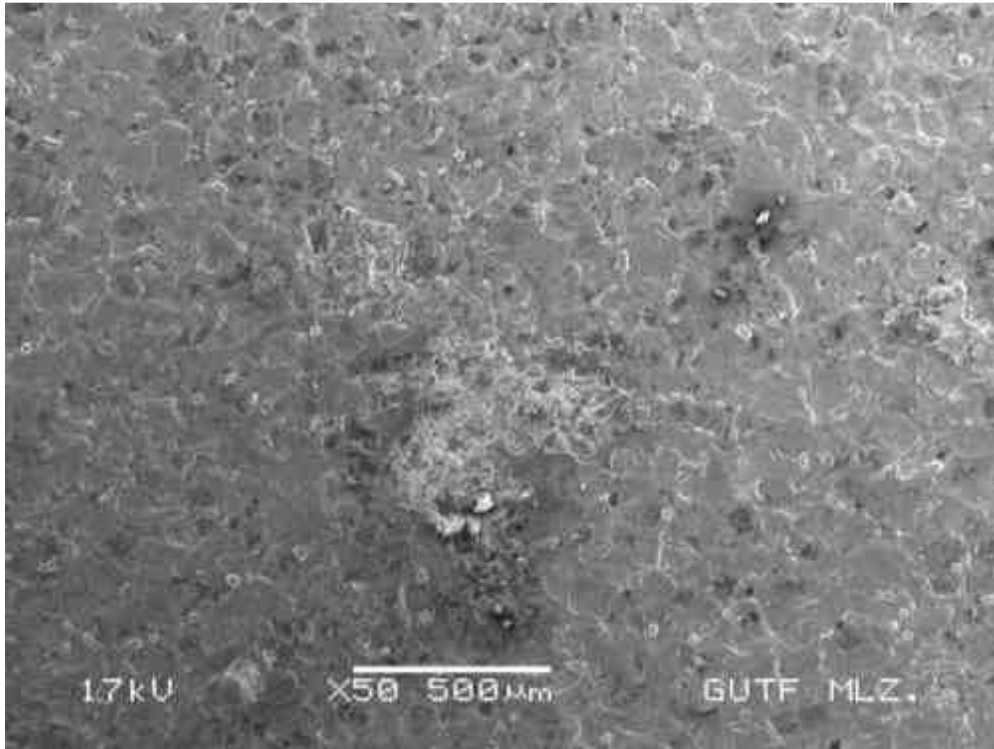
Elektrot No	Korozyon Yayılımı (%)
CuMo1	10
CuMo 2	15
CuMo 3	26
CuMo 4	32
CuMo 5	21
CuMo 6	3
CuMo 7	6

Şekil 5.78-5.84 arasında korozyona tabi tutulmuş numunelerin yüzey görüntüleri gösterilmiştir. İlgili çizelge ve şekiller incelendiğinde ve iş parçasının korozyon direnci ile karşılaştırıldığında, bütün numunelerin korozyon direnci, iş parçasının direncinden yüksek çıkmıştır. Bu da, Mo katkıli T/M elektrotlar kullanıldığında, iş parçası yüzeyinde Mo içeren bir tabaka oluşturulabileceğini ve bu tabaka sayesinde iş parçasının korozyon direncinin arttırılabileceğini göstermektedir.

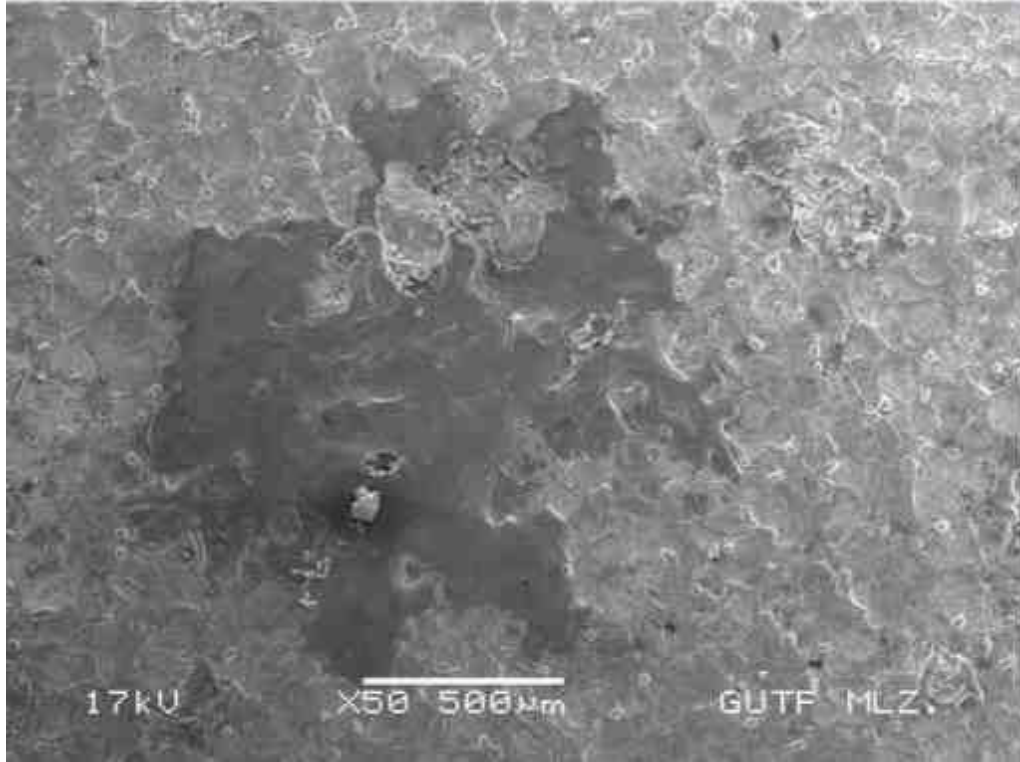
Literatürde, EEİ ile işlenmiş işparçası yüzeylerinin korozyon dirençlerinin arttığı, Cu-W elektrotlar (düşük karbon çeliği işparçası) [18], Cu-Cr elektrotlar (AISI 1045 işparçası) [3], Al-Mo elektrotlar (Ni esaslı süperalaşım Haynes 230 işparçası) [25, 26] ve SiFe elektrotlar (5083 Al işparçası) [8] kullanılarak belirtilmiştir.



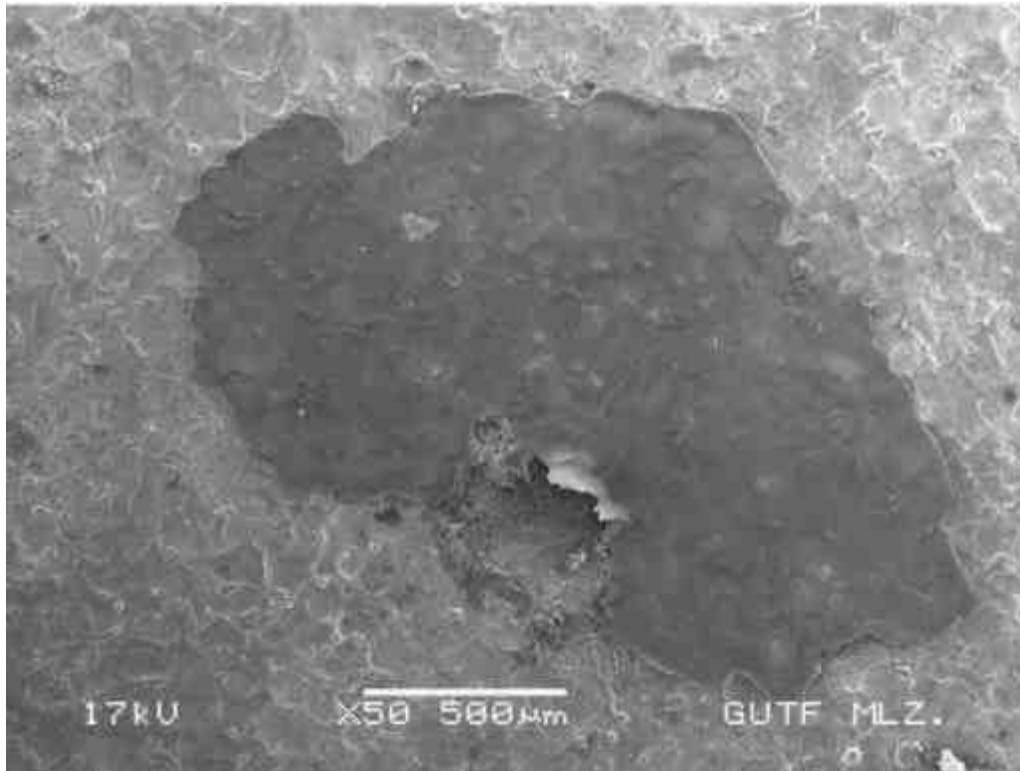
Şekil 5.78. CuMo1 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



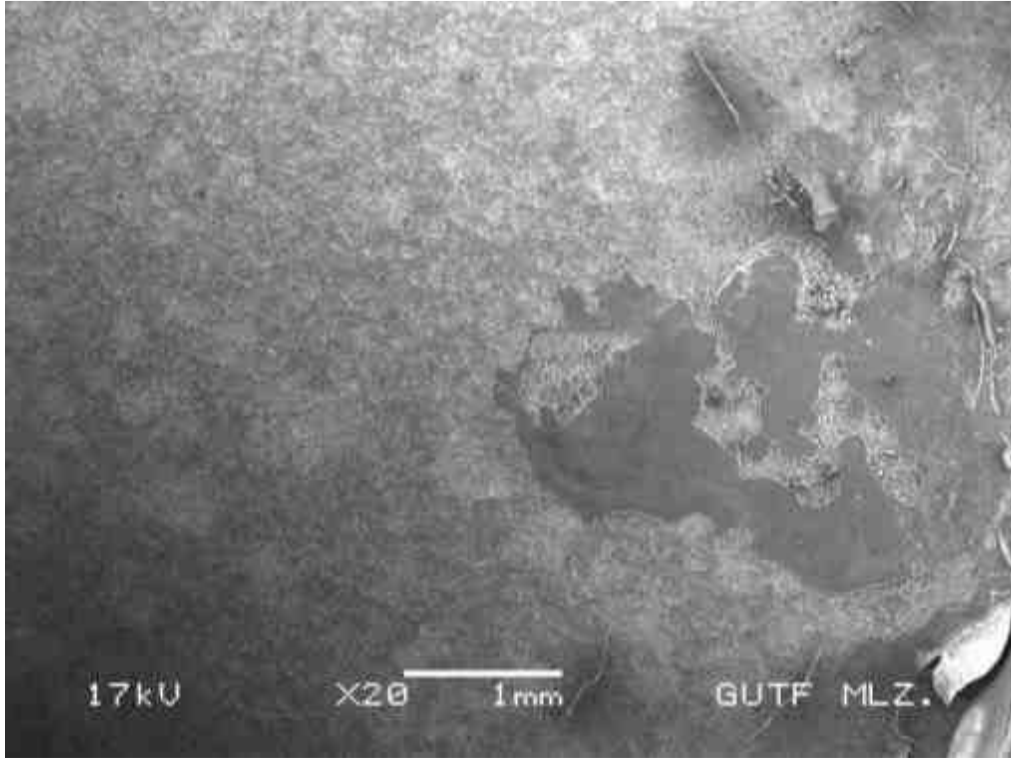
Şekil 5.79. CuMo2 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



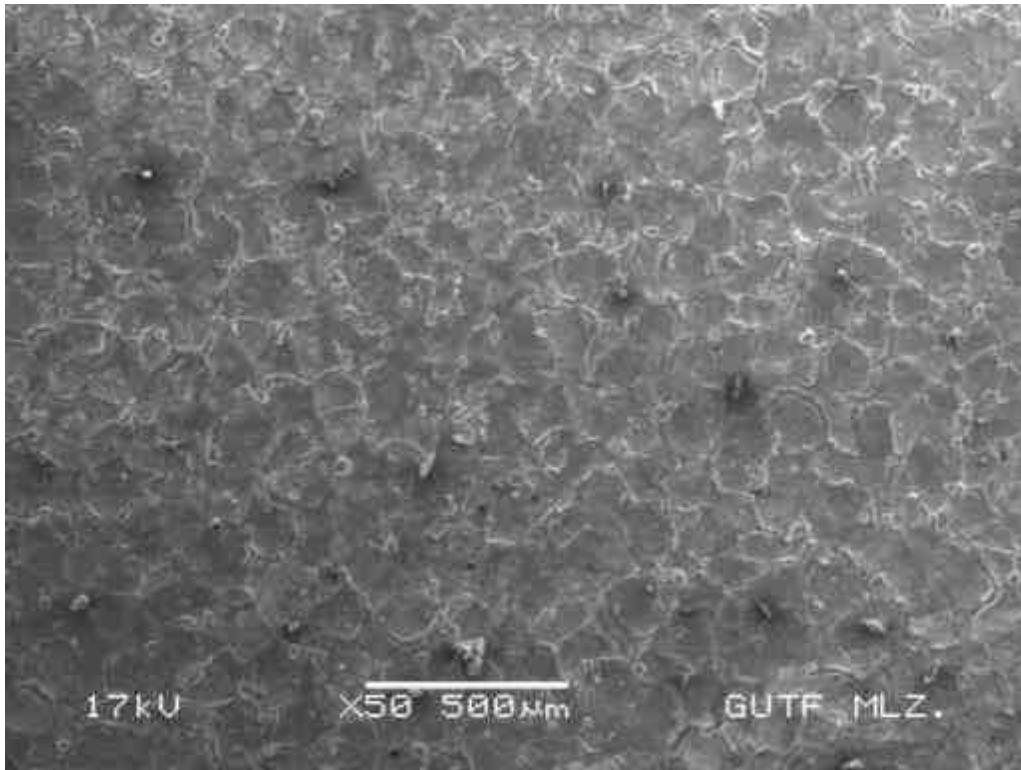
Şekil 5.80. CuMo3 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



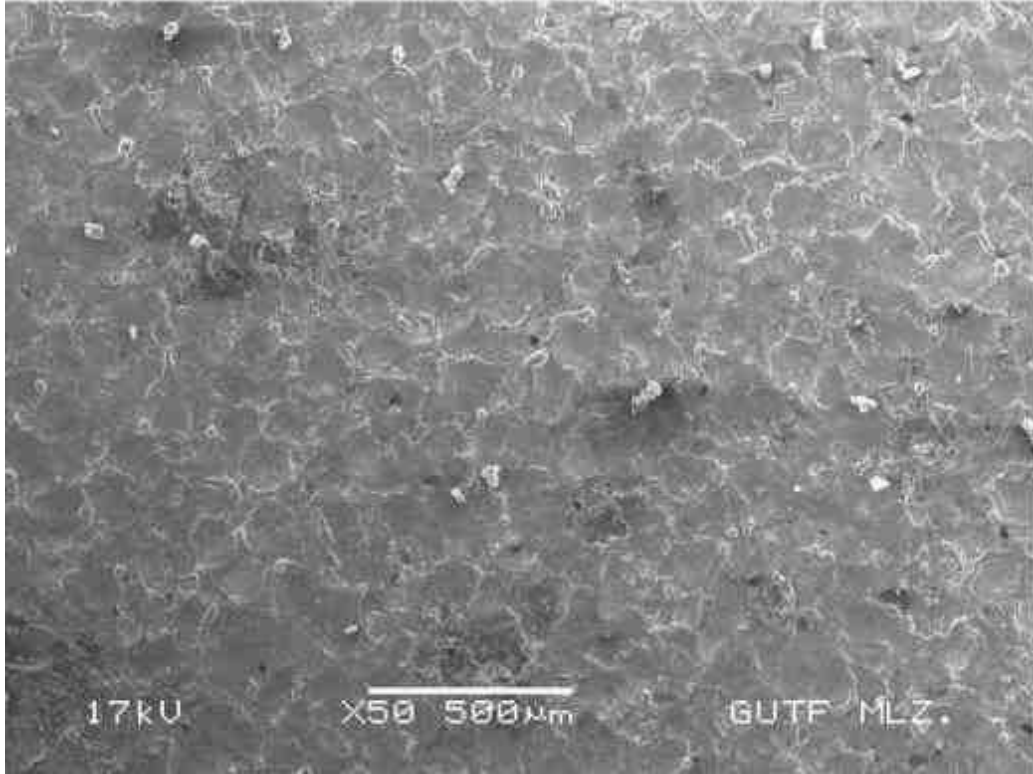
Şekil 5.81. CuMo4 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.82. CuMo5 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.83. CuMo6 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü



Şekil 5.84. CuMo7 nolu elektrot için korozyona tabi tutulmuş işparçasının SEM yüzey görüntüsü

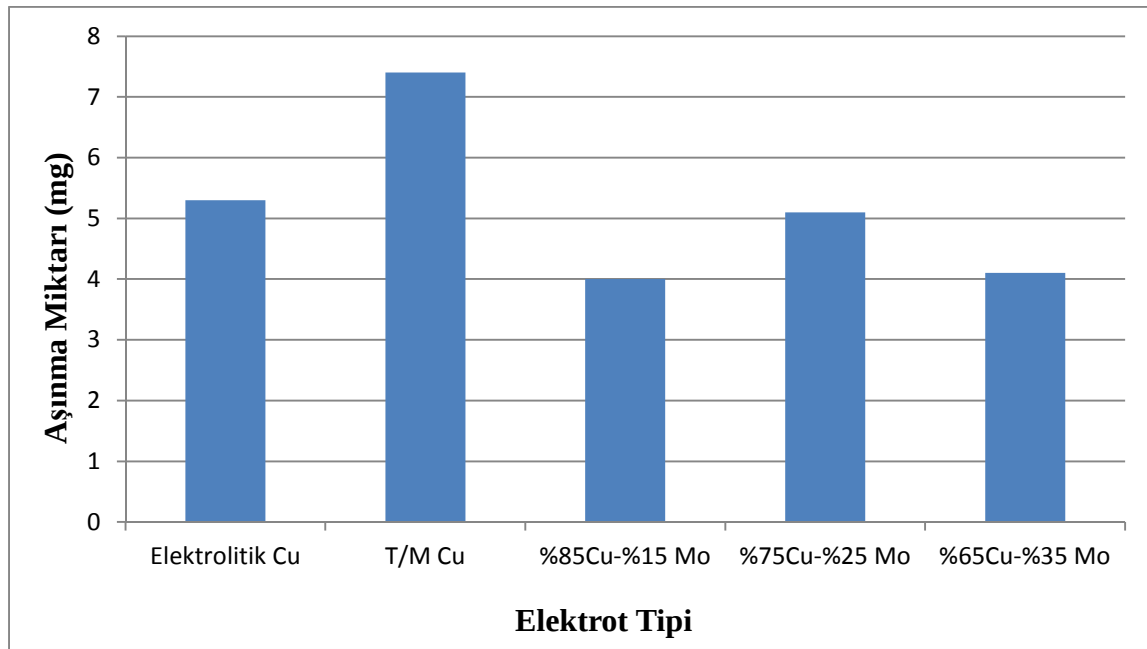
5.4.10. Aşınma direnci ölçümleri

Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen aşınma değerleri Çizelge 5.25'te gösterilmiştir.

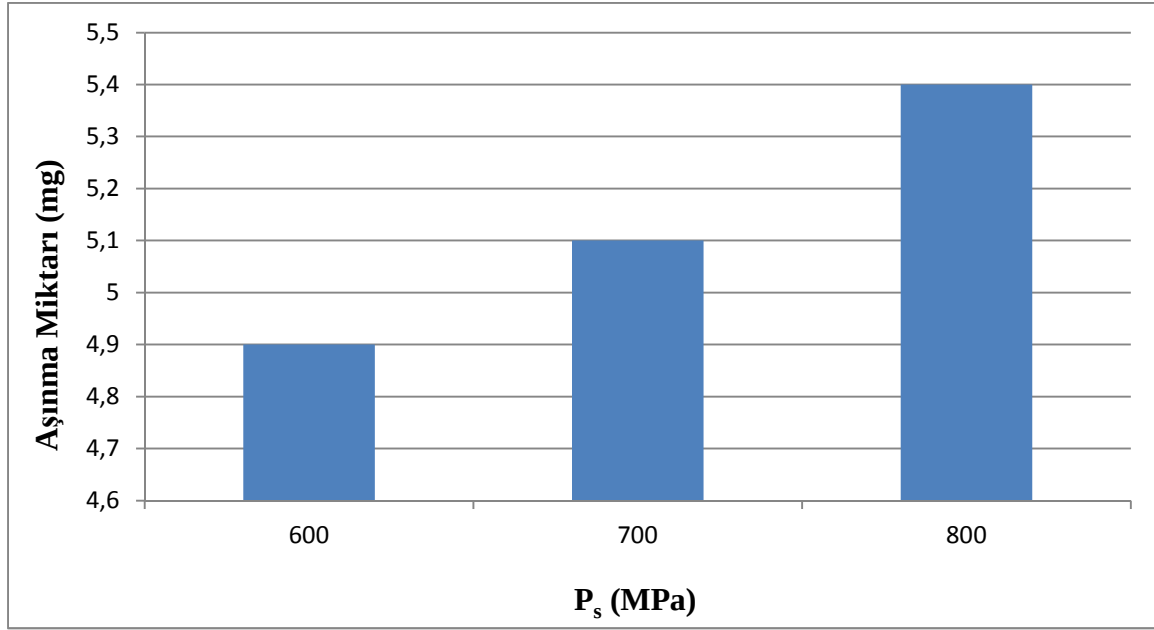
Şekil 5.85'te Cu tozuna ilave edilen Mo tozu miktarının aşınma direncine etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Mo oranı %15'ten %25'e çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %24 artmış, %25'ten %35'e çıkartıldığında ise yaklaşık %20 azalmıştır. %85 Cu-%15 Mo elektrot en düşük aşınma miktarı dolayısıyla en yüksek aşınma direncine, T/M Cu elektrot ise en yüksek aşınma miktarı dolayısıyla en düşük aşınma direncine yol açmıştır. T/M Cu elektrot, elektrolitik Cu elektrota göre daha yüksek aşınma miktarı dolayısıyla daha düşük aşınma direnci değeri vermiştir. İşlenmemiş parçanın aşınma miktarı 12,4 mg olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, işlenmemiş parça ile karşılaştırıldığında, iş parçası yüzeyinin aşınma direnci elektrolitik Cu elektrot kullanıldığında 2,3 kat, T/M Cu elektrot kullanıldığında 1,6 kat ve Mo-Cu T/M elektrotlar kullanıldığında ise 1,5-3,1 kat artmıştır.

Çizelge 5.25. Aşınma direnci değerleri (Mo katkıli elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Aşınma (mg)
CuMo1	119,0164	119,0124	4,0
CuMo 2	115,3810	115,3769	4,1
CuMo 3	115,1200	115,1149	5,1
CuMo 4	115,1180	115,1096	8,4
CuMo 5	119,9322	119,9244	7,8
CuMo 6	115,9545	115,9491	5,4
CuMo 7	124,4932	124,4883	4,9
E-Cu	121,7798	121,7745	5,3
TM-Cu	116,3168	116,3094	7,4

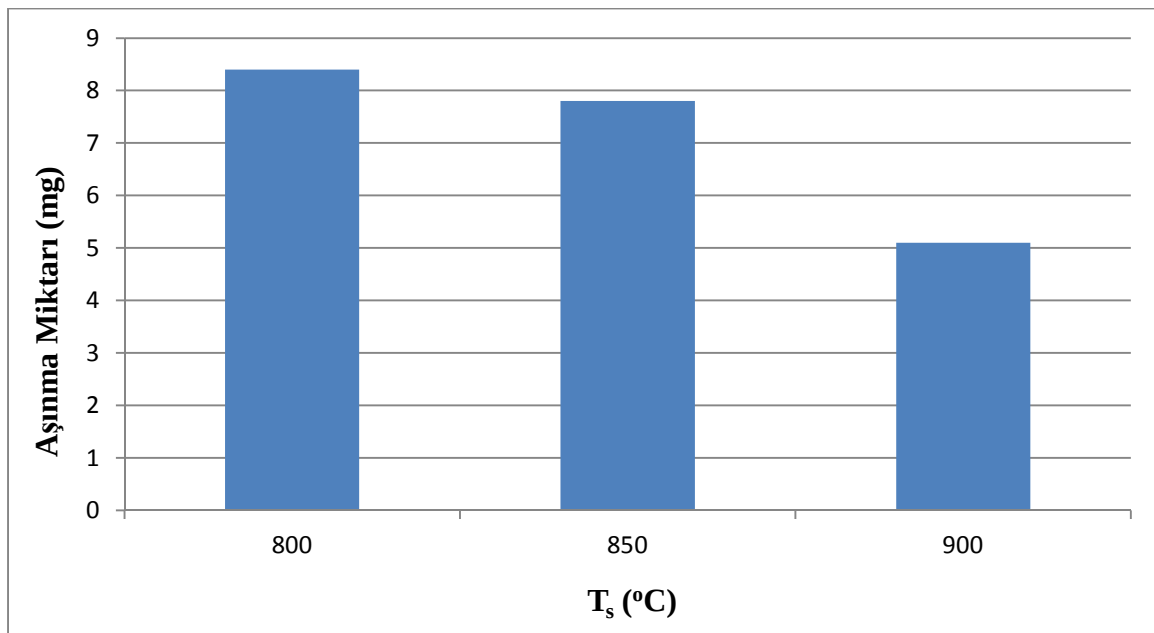
Şekil 5.85. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için aşınma direnci sonuçları

Şekil 5.86'da Mo-Cu tozlarının P_s değerlerinin aşınma direnci üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi P_s arttıkça aşınma miktarı artmakta dolayısıyla aşınma direnci azalmaktadır. P_s 600 MPa'dan 700 MPa'a çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %4 artmış, 700 MPa'dan 800 MPa'a çıkartıldığında ise yaklaşık %6 artmıştır.



Şekil 5.86. Farklı P_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

T_s 'nin aşınma direnci üzerindeki etkisi Şekil 5.87'de gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi T_s arttıkça aşınma miktarı azalmakta dolayısıyla aşınma direnci artmaktadır. T_s 800 °C'den 850 °C'ye çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %7 azalırken, 850 °C'den 900 °C'ye çıkartıldığında yaklaşık %35 azalmıştır.



Şekil 5.87. Farklı T_s 'lerde üretilen T/M elektrotların aşınma direnci değerleri (Mo katkılı elektrotlar)

Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvısı kullanıldığında, EDM ile işlenmiş çelik iş parçasının işlenmiş yüzeyindeki C miktarı, ana metalden daha fazla olmaktadır. Bu da yüzeyin aşınma direncini artırmaktadır [74]. Literatürde, Shunmugam ve ark. (1994) %40 WC ve %60 Fe T/M elektrotlar kullanarak çelik iş parçasının aşınma direncini %25-60 oranında arttırmışlardır. Yazarlar aşınma direncindeki bu artışı yüzeyde oluşan WC, W_2C , FeC, $(Fe_3C)H$ ve Fe_3C fazlarına bağlamışlardır [75]. Wang ve ark. (2002) karbon çeliğini Ti T/M elektrotlar yardımı ile işlemişler ve yüzeyde oluşan TiC tabakası sayesinde yüzeyin aşınma direncini 3-7 kat arttırmışlardır [76].

5.5. B_4C Tozu Katkılı Kompozit T/M Elektrotlar ile Yapılan İşleme Sonuçları

B_4C tozları, Cu tozları ile ağırlıkça beş farklı K_t 'de (%65Cu-%35 B_4C , %75Cu-%25 B_4C , %85Cu-%15 B_4C , %90Cu-%10 B_4C , %95Cu-%5 B_4C) karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar 700 MPa basınçta basılmıştır. %65Cu-%35 B_4C ve %75Cu-%25 B_4C karışımli tozlar sıkıştırma sonucunda kalıptan çıkarken dağılmıştır. Onun için diğer üç farklı K_t 'deki karışımlar kullanılmıştır. Her bir elektrottan yedek olması açısından üçer adet, toplamda dokuz adet elektrot üretilmiştir. Elde edilen elektrotlar elektro erozyonla işleme tezgâhında denenmiş ve toplamda üç adet deney yapılmıştır. Çizelge 5.26'da her bir deneyde kullanılan elektrotlar ve özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.26. B_4C tozu katkıli elektrotlarla yapılan deney değişkenleri

Elektrot No	Malzeme	K_t (%)	P_s (MPa)	T_s ($^{\circ}C$)
Cu B_4C 1	Cu- B_4C	85-15	700	900
Cu B_4C 2	Cu- B_4C	90-10	700	900
Cu B_4C 3	Cu- B_4C	95-5	700	900
E-Cu	Elektrolitik Cu	-	-	-
TM-Cu	T/M Cu	100-0	700	900

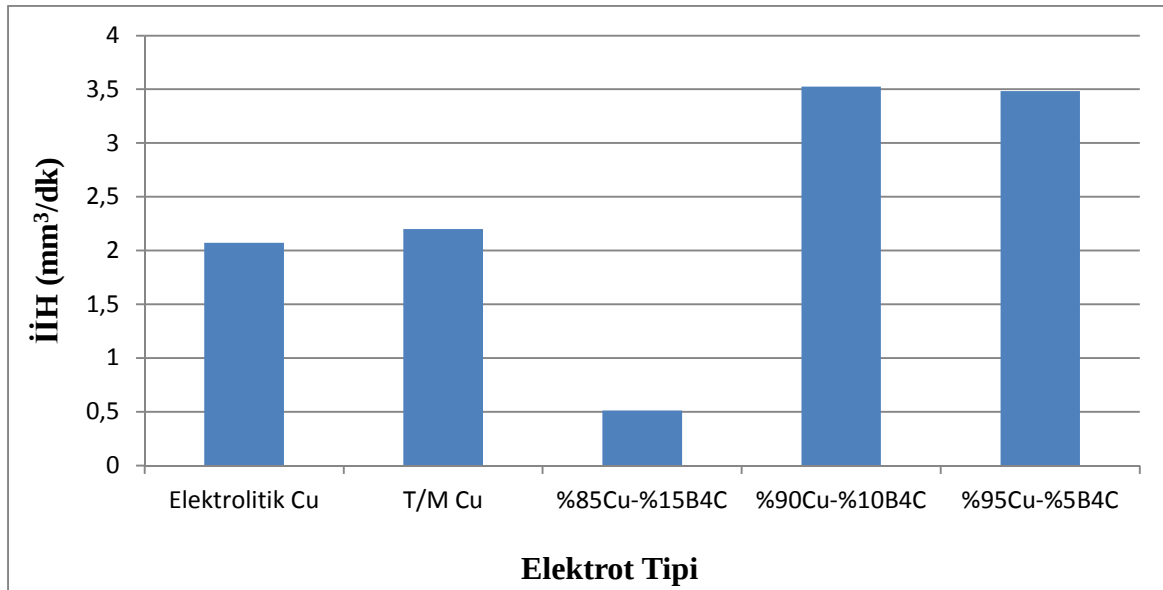
5.5.1. İİH sonuçları

Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen İİH değerleri Çizelge 5.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.27. İİH değerleri (B₄C katkıli elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi İş Parçası Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası İş Parçası Ağırlıkları (g)	İş Parçası Yoğunluğu (g/cm ³)	İİH (mm ³ /dk)
CuB ₄ C1	270,22	269,98	7,8	0,51
CuB ₄ C2	257,00	255,35	7,8	3,53
CuB ₄ C3	260,72	259,09	7,8	3,48
E-Cu	262,96	261,99	7,8	2,07
TM-Cu	262,27	261,24	7,8	2,20

Şekil 5.88’de Cu tozuna ilave edilen B₄C tozu miktarının İİH üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. B₄C miktarı arttıkça İİH önce artmış sonra ciddi oranda azalmıştır. B₄C oranı %5’ten %10’a çıkartıldığında İİH yaklaşık %1 artmış, %10’dan %15’e çıkartıldığında ise yaklaşık %85 azalmıştır. Grafik incelendiğinde %90Cu-%10B₄C ve %95Cu-%5B₄C karışımli elektrotların, elektrolitik Cu ve T/M Cu’ya göre daha yüksek İİH’na sebep olduğu görülmüştür. Bu da uygun koşullar ve parametreler kullanıldığında kompozit T/M elektrotların, geleneksel olarak elektro erozyonla işlemeye en çok kullanılan elektrot malzemesi olan elektrolitik Cu’ya göre daha hızlı işleme gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Literatürde, T/M elektrotların İİH değerleri elektrolitik Cu elektrotları ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha yüksek İİH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 4, 5, 18, 21]. Kompozit T/M elektrot içindeki Cu miktarının artması ile İİH’nın artacağı [36] numaralı referansta belirtilmiştir. Bu çalışmada ZrB₂-Cu elektrotlar kullanılmış ve Cu ile ZrB₂ arasındaki düşük bağlanma kuvvetinden dolayı, akım uygulandığında Cu ile ZrB₂ arasında kıvılcım oluşmayabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan, [2] numaralı referansta artan Cu oranı ile birlikte İİH’nın önce arttığı sonra azaldığı belirtilmiştir.



Şekil 5.88. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için İİH sonuçları

5.5.2. EAH sonuçları

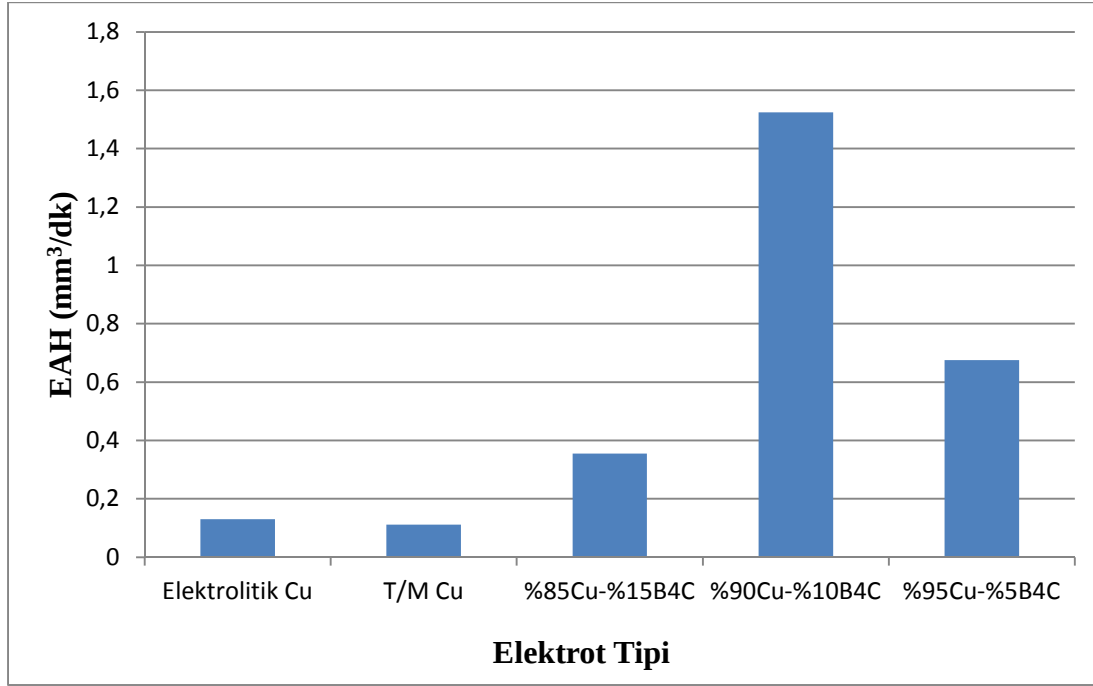
Deneylerden önce ve sonra ölçülen elektrot ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen EAH değerleri Çizelge 5.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.28. EAH değerleri (B₄C katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Elektrot Ağırlıkları (g)	Deney Sonrası Elektrot Ağırlıkları (g)	Elektrot Yoğunluğu (gr/cm ³)	EAH (mm ³ /dk)
CuB ₄ C1	8,89	8,72	7,99	0,36
CuB ₄ C2	12,28	11,52	8,31	1,52
CuB ₄ C3	13,68	13,33	8,64	0,68
E-Cu	14,25	14,18	8,96	0,13
TM-Cu	14,12	14,06	8,96	0,11

Şekil 5.89'da Cu tozuna ilave edilen B₄C tozu miktarının EAH üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi B₄C miktarı arttıkça EAH önce artmış, sonra azalmıştır. B₄C oranı %5'ten %10'a çıkartıldığında EAH yaklaşık %126 artmış, %10'dan %15'e çıkartıldığında ise yaklaşık %77 azalmıştır. Her üç K_t'de de EAH değerleri elektrolitik Cu ve T/M Cu

elektrotlara göre yüksek çıkmıştır. [2] numaralı referansta kompozit T/M elektrot içindeki Cu oranı arttıkça EAH'nın artacağı belirtilmiştir. Diğer taraftan, Cu oranı arttıkça EAH'nın azalacağı [36] numaralı referansta belirtilmiştir. Literatürde, T/M elektrotların EAH değerleri elektrolitik Cu elektrotları ile karşılaştırılmış ve elektrolitik Cu ile daha düşük EAH değerleri elde edildiği belirtilmiştir [2, 3, 5, 18, 36].



Şekil 5.89. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı Kt'lerdeki T/M elektrotlar için EAH sonuçları

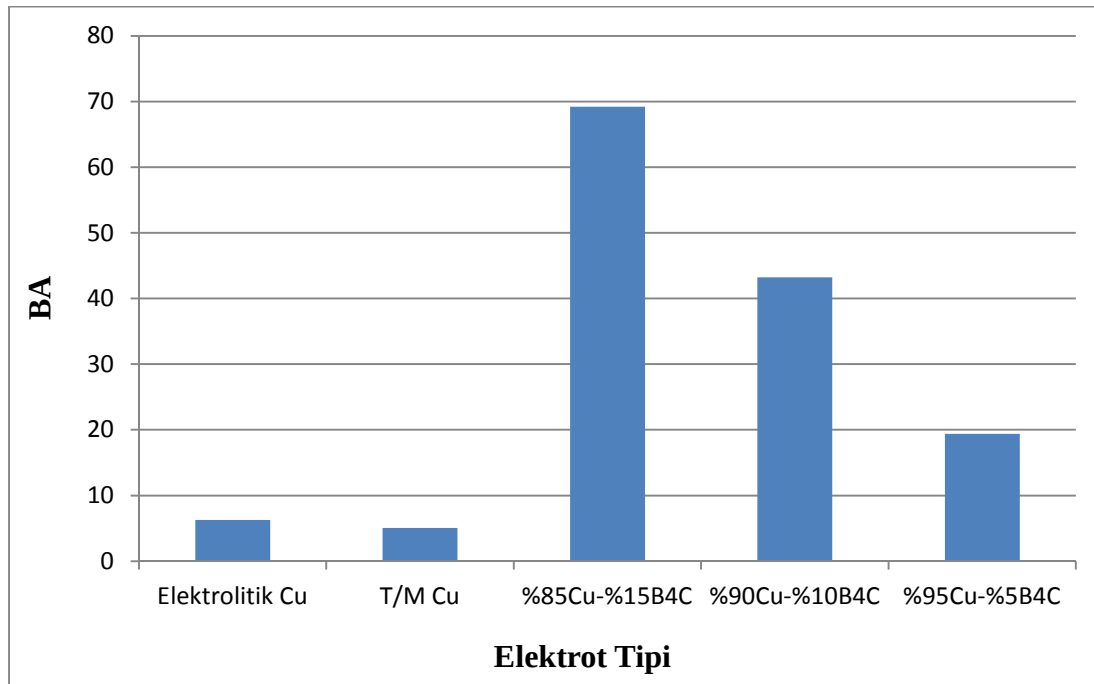
5.5.3. Bağlı aşınma (BA) sonuçları

EAH değerlerinin İİH değerlerine bölünüp 100 ile çarpılması neticesinde elde edilen bağlı aşınma değerleri Çizelge 5.29'da gösterilmiştir.

Şekil 5.90'da Cu tozuna ilave edilen B₄C tozu miktarının BA üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. B₄C oranı %5'ten %10'a çıkartıldığında BA yaklaşık %123 artmış, %10'dan %15'e çıkartıldığında ise yaklaşık %60 artmıştır.

Çizelge 5.29. BA değerleri (B₄C katkıli elektrotlar)

Elektrot No	EAH (mm ³ /dk)	İİH (mm ³ /dk)	BA
CuB ₄ C1	0,36	0,51	69,20
CuB ₄ C2	1,52	3,53	43,22
CuB ₄ C3	0,68	3,48	19,38
E-Cu	0,13	2,07	6,28
TM-Cu	0,11	2,20	5,07

Şekil 5.90. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için BA sonuçları

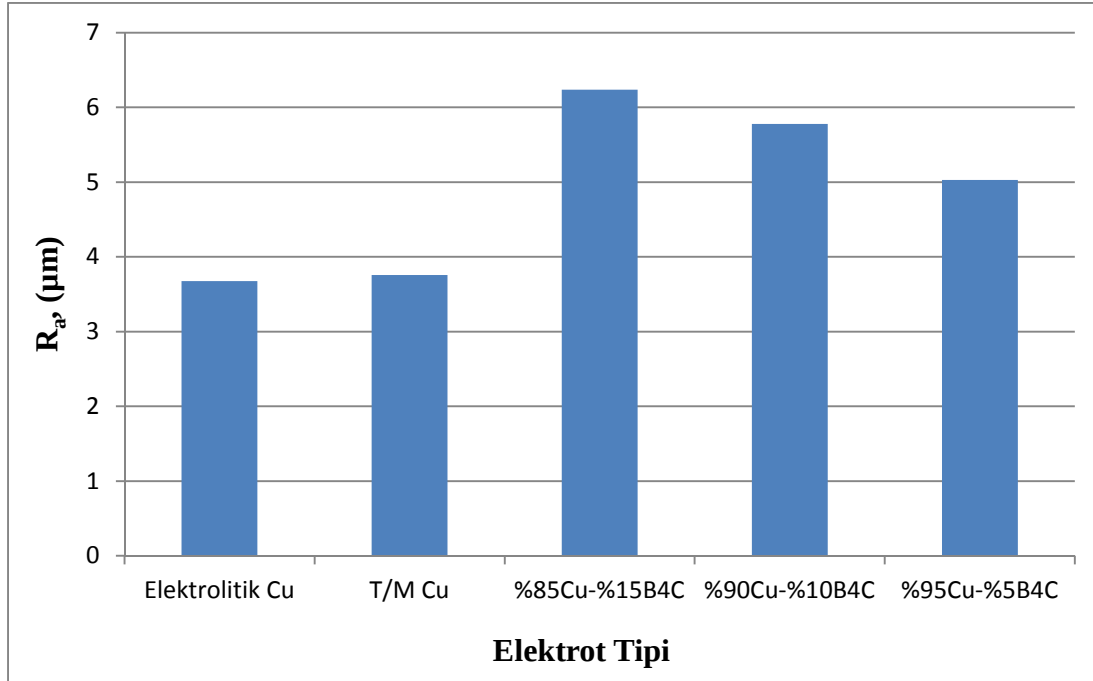
5.5.4. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları

İş parçalarının işlenmiş yüzeylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları R_a ve R_z cinsinden Çizelge 5.30'da gösterilmiştir.

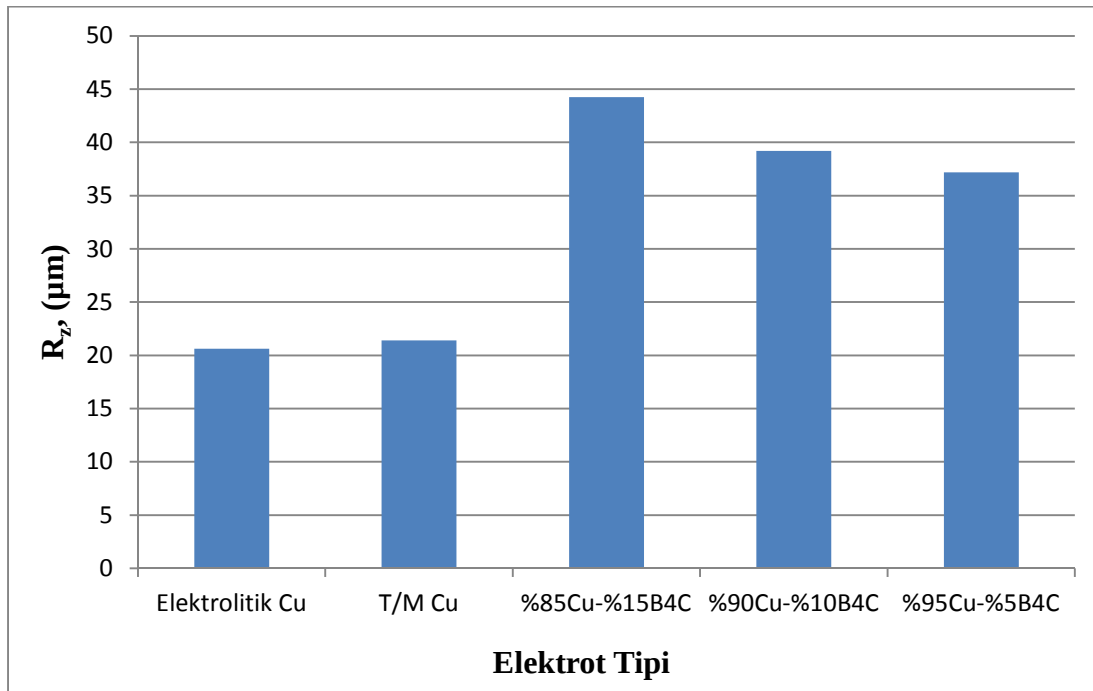
Çizelge 5.30. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (B₄C katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Yüzey Pürüzlülüğü, R _a (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü, R _z (μm)
CuB ₄ C1	6,23	44,25
CuB ₄ C2	5,78	39,21
CuB ₄ C3	5,03	37,19
E-Cu	3,67	20,63
TM-Cu	3,76	21,39

Şekil 5.91’de R_a cinsinden, Şekil 5.92’de ise R_z cinsinden, Cu tozuna ilave edilen B₄C tozu miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi B₄C miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü hem R_a hem de R_z cinsinden artmıştır. Elektrolitik Cu ve T/M Cu’ya göre yüzey pürüzlülükleri yüksek çıkmıştır. B₄C oranı %5’ten %10’a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_a cinsinden yaklaşık %15 artmış, %10’dan %15’e çıkartıldığında ise yaklaşık %8 artmıştır. B₄C oranı %5’ten %10’a çıkartıldığında yüzey pürüzlülüğü R_z cinsinden yaklaşık %5 artmış, %10’dan %15’e çıkartıldığında ise yaklaşık %13 artmıştır. Kompozit T/M elektrot içindeki TiC [7] ve ZrB₂ [36] oranının artması ile R_a’nın arttığı literatürde belirtilmiştir. Literatürde T/M elektrotlar ile elde edilen R_a değerleri 2,5-15 μm arasında değişmektedir [10, 12, 25, 26]. Katı Cu elektrota göre T/M elektrotların daha düşük R_a değerleri verdiği [4] numaralı referansta da belirtilmiştir. Bu çalışmada, yazarlar, elektrottan kopan tozların işparçası yüzeyinde birikmesi ile yüzey çatlaklarının azaldığını ve böylece yüzey pürüzlülüğünün de azaldığını belirtmişlerdir. Benzer bir yorum T/M Al-Mo elektrotlar için de yapılmıştır [25]. Diğer taraftan, işparçası yüzeyine yapışan yüksek miktardaki tozdan dolayı T/M elektrotlar ile yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek çıkacağı da literatürde belirtilmiştir [25]



Şekil 5.91. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_a değerleri (B_4C katkılı elektrotlar)



Şekil 5.92. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t 'lerdeki T/M elektrotlar için R_z değerleri (B_4C katkılı elektrotlar)

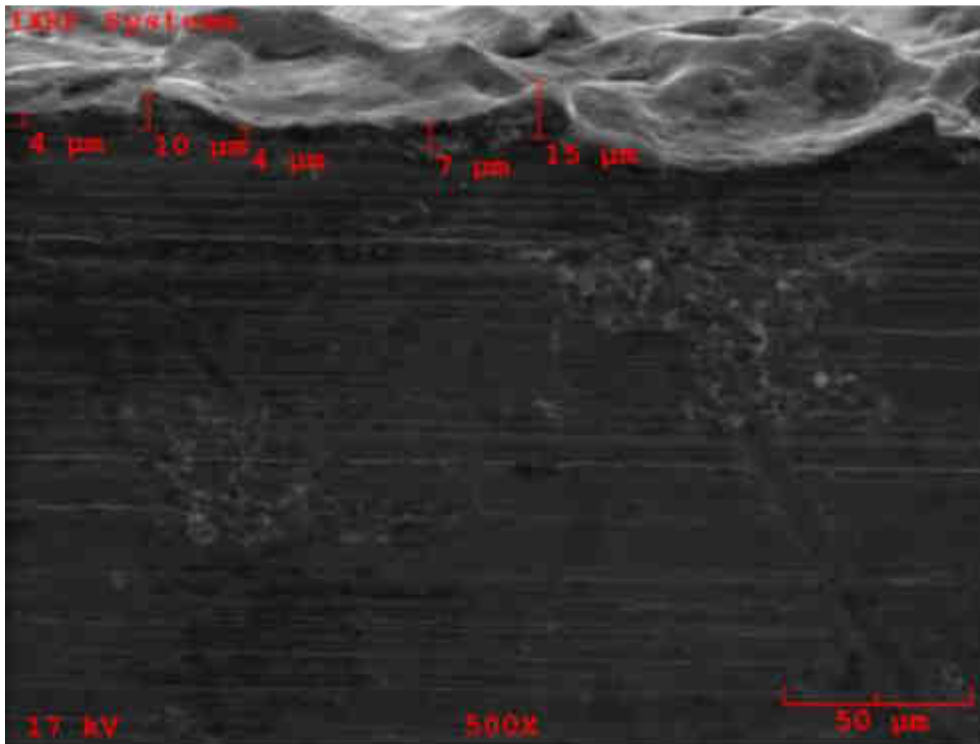
5.5.5. SEM analizleri (yüzeyde oluşan katman kalınlığı)

B₄C tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığı, SEM analizleri yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 5.93-5.95 arasında ilgili görüntüler gösterilmiştir. İlgili şekiller incelendiğinde %85 Cu - %15 B₄C oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 °C'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 13 µm'ye kadar; %90 Cu - %10 B₄C oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 °C'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının 15 µm'ye kadar; %95 Cu - %5 B₄C oranında karıştırılmış, 700 MPa'da sıkıştırılmış, 900 °C'de sinterlenmiş elektrot için yüzeyde oluşan katman kalınlığının ise 12 µm'ye kadar çıktığı görülmüştür.

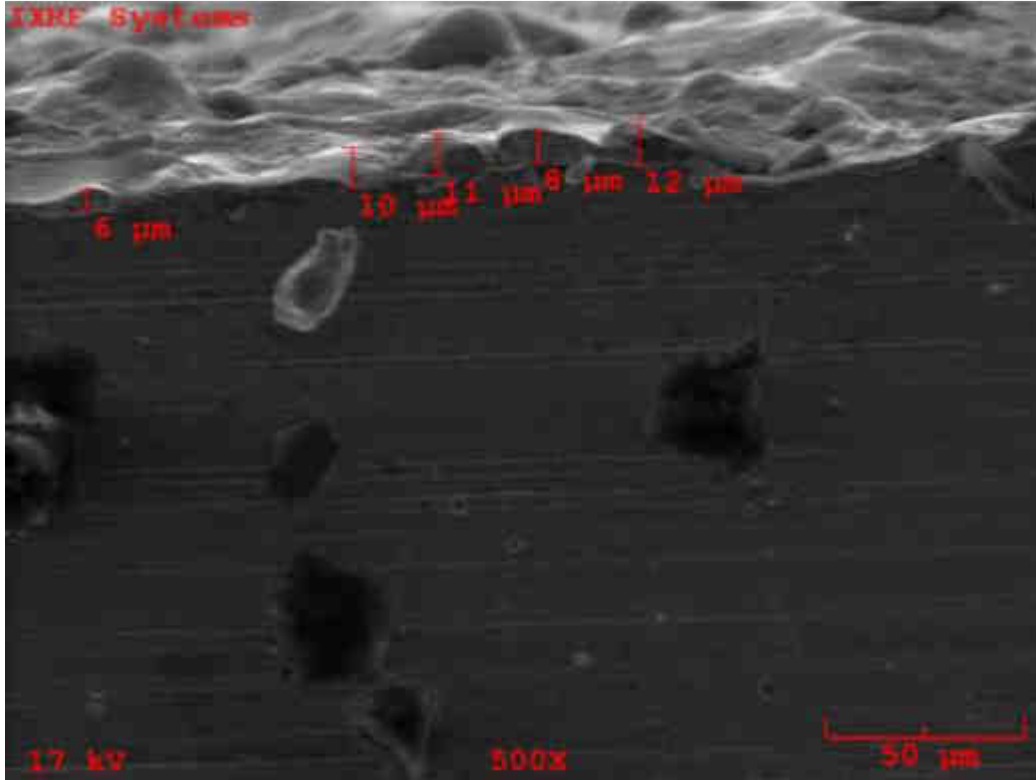
Yüzeyde oluşan katman kalınlığının kompozit T/M elektrot içindeki TiC oranının artması ile arttığı [7] numaralı referansta belirtilmiştir. Literatürde; düşük karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 12-100 µm [18], C-40 karbon çeliği işparçasının Cu-W T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 3-785 µm [10, 12], Ti-6Al-4V işparçasının Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 4-11 µm [21], AISI 1045 işparçasının Cu-Cr T/M elektrotlar ile işlenmesi ile <10 µm [3], AISI H13 işparçasının WC-Co T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30 µm [29], Ni esaslı Haynes 230 süperalaşımı işparçasının Al-Mo T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30-50 µm [25, 26], alüminyum işparçasının TiC-Cu T/M elektrotlar ile işlenmesi ile 30-160 µm [7] katman kalınlığı oluştuğu belirtilmiştir.



Şekil 5.93. CuB₄C₁ nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.94. CuB₄C₂ nolu elektrot için işparçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü



Şekil 5.95. CuB_4C_3 nolu elektrot için iş parçası yüzeyinde oluşan katman kalınlığının SEM görüntüsü

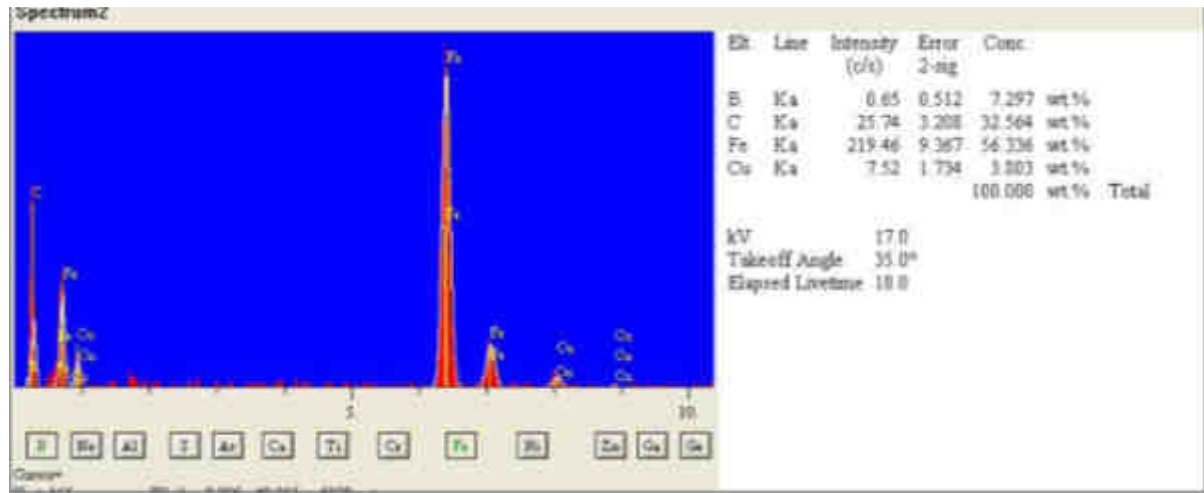
5.5.6. EDS analizleri

B_4C tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi, EDS analizleri yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 5.96’da örnek bir EDS analizi gösterilmiştir. Çizelge 5.31’de B_4C tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında iş parçası yüzeyinde biriken malzeme miktarı ve cinsi tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.31 incelendiğinde, iş parçası yüzeyinde B_4C ve Cu tozlarının biriktiği görülmüştür. Bunun sebebi, işleme sırasında elektrottan kopan B_4C ve Cu tozlarının iş parçası yüzeyine yapışmasıdır. Çizelge incelendiğinde, elektrot içerisinde bulunan B_4C miktarı arttıkça, iş parçası yüzeyinde biriken B malzeme miktarı artmıştır.

Çizelge 5.31. Yüzeyde biriken malzeme miktarı ve cinsi (B₄C katkılı elektrotlar)

Elektrot No	C (%)	Fe (%)	Cu (%)	B (%)
CuB ₄ C1	32,56	56,34	3,80	7,30
CuB ₄ C2	8,76	69,68	16,02	5,55
CuB ₄ C3	12,18	76,76	6,69	4,38

Şekil 5.96. CuB₄C1nolu elektrot için işparçası EDS analizi

5.5.7. Mikrosertlik ölçümleri

B₄C tozu katkılı elektrotlarla yapılan işlemler sonrasında ölçülen iş parçası yüzeyinin mikrosertlik değerleri Çizelge 5.32’de verilmiştir. Yüzeyde beş farklı yerden ölçüm alınmış ve tabloda bu ölçümlerin ortalamaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.32. İş parçası yüzeyinin mikrosertliği (B₄C katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Mikrosertlik (HV)
CuB ₄ C1	1036,1
CuB ₄ C2	904,3
CuB ₄ C3	822,7
E-Cu	1637,6
TM-Cu	786,5

Çizelgeden de görülebileceği gibi B₄C katkılı elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzeyinin mikrosertliği, ana metalin sertliğinden (593,5 HV) daha yüksek çıkmıştır. En

yüksek mikrosertlik elektrolitik Cu elektrotla yapılan işlemede çıkmıştır (1637,6 HV). [3] numaralı referansta da elektrolitik Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği Cu-Cr T/M elektrot ile işlenenden daha yüksek çıkmıştır. Fakat [6] numaralı referansta TaC-Cu elektrot ile işlenen yüzeyin mikrosertliği elektrolitik Cu ile işlenenden daha yüksek çıkmıştır. En düşük mikrosertlik ise T/M Cu elektrot ile işlenen yüzeyde çıkmıştır (786,5 HV). Kompozit T/M elektrot içindeki B_4C miktarı arttıkça, iş parçası yüzeyinin mikrosertliği sürekli artmıştır (Elektrot No CuB_4C_3 , CuB_4C_2 , CuB_4C_1). Das ve Misra [7], TiC-Cu T/M elektrot içindeki Cu oranını azalttıkça, işlenmiş yüzeyin mikrosertliğinin arttığını belirtmişlerdir.

5.5.8. Aşınma direnci ölçümleri

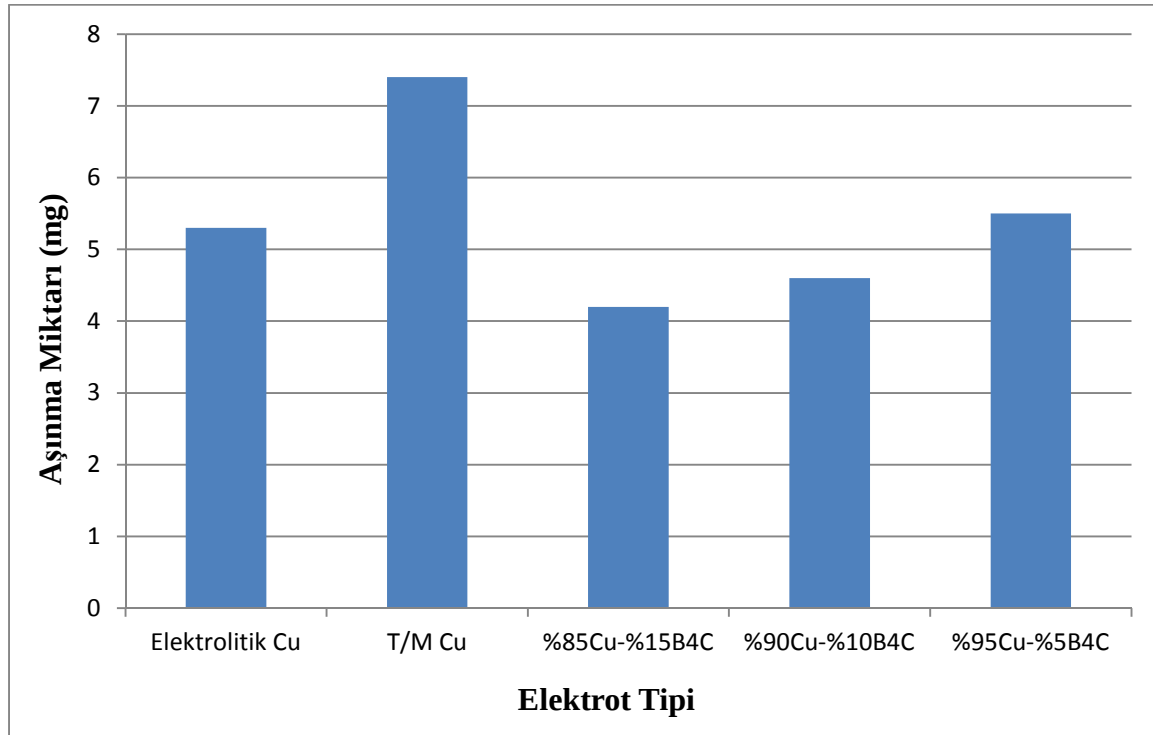
Deneylerden önce ve sonra ölçülen iş parçası ağırlıkları ve bu ağırlıklar neticesinde elde edilen aşınma değerleri Çizelge 5.33'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.33. Aşınma direnci değerleri (B_4C katkılı elektrotlar)

Elektrot No	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Aşınma (mg)
CuB_4C_1	132,2918	132,2876	4,2
CuB_4C_2	109,7852	109,7806	4,6
CuB_4C_3	111,0183	111,0128	5,5
E-Cu	121,7798	121,7745	5,3
TM-Cu	116,3168	116,3094	7,4

Şekil 5.97'de Cu tozuna ilave edilen B_4C tozu miktarının aşınma direncine etkisi ve elektrolitik Cu ve T/M Cu ile yapılan işlemeye göre farklılıkları gösterilmiştir. B_4C oranı %5'ten %10'a çıkartıldığında aşınma miktarı yaklaşık %16 azalmış, %10'dan %15'e çıkartıldığında ise yaklaşık %9 azalmıştır. %85 Cu-%15 B_4C elektrot en düşük aşınma miktarı dolayısıyla en yüksek aşınma direncine, T/M Cu elektrot ise en yüksek aşınma miktarı dolayısıyla en düşük aşınma direncine yol açmıştır. T/M Cu elektrot, elektrolitik Cu elektrota göre daha yüksek aşınma miktarı dolayısıyla daha düşük aşınma direnci değeri vermiştir. İşlenmemiş parçanın aşınma miktarı 12,4 mg olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, işlenmemiş parça ile karşılaştırıldığında, iş parçası yüzeyinin aşınma direnci

elektrolitik Cu elektrot kullanıldığında 2,3 kat, T/M Cu elektrot kullanıldığında 1,6 kat ve Cu- B₄C T/M elektrotlar kullanıldığında ise 2,3-3 kat artmıştır.



Şekil 5.97. Elektrolitik Cu elektrot ve farklı K_t'lerdeki T/M elektrotlar için aşınma direnci sonuçları

Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvısı kullanıldığında, EDM ile işlenmiş çelik iş parçasının işlenmiş yüzeyindeki C miktarı, ana metalden daha fazla olmaktadır. Bu da yüzeyin aşınma direncini artırmaktadır [74]. Literatürde, Shunmugam ve ark. (1994) %40 WC ve %60 Fe T/M elektrotlar kullanarak çelik iş parçasının aşınma direncini %25-60 oranında arttırmışlardır. Yazarlar aşınma direncindeki bu artışı yüzeyde oluşan WC, W₂C, FeC, (Fe₃C)H ve Fe₃C fazlarına bağlamışlardır [75]. Wang ve ark. (2002) karbon çeliğini Ti T/M elektrotlar yardımı ile işlemişler ve yüzeyde oluşan TiC tabakası sayesinde yüzeyin aşınma direncini 3-7 kat arttırmışlardır [76].

5.6. Toz Metal Elektrotların Karşılaştırması

Çizelge 5.34'te Cr, Mo ve B₄C tozu katkılı elektrotların İİH, EAH, R_a, R_z, mikrosertlik, korozyon ve aşınma direnci değerleri toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.34. T/M elektrotların karşılaştırılması

Elektrot No	İİH (mm ³ /dk)	EAH (mm ³ /dk)	R _a (μm)	R _z (μm)	Mikrosertlik (HV)	Aşınma (mg)	Korozyon yayılımı (%)
CuCr1	3,01	0,50	4,16	24,43	975,4	5,0	24
CuCr2	0,40	0,02	4,88	25,36	1057,2	48	2
CuCr3	1,03	0,31	4,27	24,95	806,4	5,9	27
CuCr4	0,13	-0,27	5,66	30,75	871,5	5,3	3
CuCr5	0,36	0,06	3,80	22,93	851,8	5,4	5
CuCr6	3,06	0,22	5,00	34,40	622,1	8,9	30
CuCr7	0,90	-0,18	5,69	31,18	1062,4	4,9	10
CuMo1	2,16	0,11	3,49	21,49	1075,2	4,0	10
CuMo2	2,71	0,16	5,16	27,69	1106,8	4,1	15
CuMo3	2,37	0,07	3,47	32,34	847,1	5,1	26
CuMo4	2,82	0,27	3,60	20,10	682,5	8,4	32
CuMo5	2,84	0,23	3,51	22,83	714,5	7,8	21
CuMo6	2,37	0,09	3,45	19,90	813,2	5,4	3
CuMo7	1,05	-0,04	3,46	21,63	850,6	4,9	6
CuB ₄ C1	0,51	0,36	6,23	44,25	1036,1	4,2	-
CuB ₄ C2	3,53	1,52	5,78	39,21	904,3	4,6	-
CuB ₄ C3	3,48	0,68	5,03	37,19	822,7	5,5	-

Buna göre; en yüksek İİH değeri CuB₄C2 nolu elektrotla (%90 Cu-%10 B₄C, P_s=700 MPa, T_s=900 °C), en düşük EAH değeri CuCr4 nolu elektrotla (%75 Cu-%25 Cr, P_s=700 MPa, T_s=800 °C), en düşük R_a ve R_z değeri CuMo6 nolu elektrotla (%75 Cu-%25 Mo, P_s=800 MPa, T_s=900 °C), en yüksek mikrosertlik değeri CuMo2 nolu elektrotla (%65 Cu-%35 Mo, P_s=700 MPa, T_s=900 °C), en düşük aşınma miktarı CuMo1 nolu elektrotla (%85 Cu-%15 Mo, P_s=700 MPa, T_s=900 °C) ve en düşük korozyon yayılımı CuCr2 nolu elektrotla (%65 Cu-%35 Cr, P_s=700 MPa, T_s=900 °C) elde edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, uygun K_t , P_s ve T_s değerleri kullanılarak Cu-Cr, Cu-Mo ve Cu-B₄C elektrotların EEİ'de hem yüzey işlemede hem de yüzey alaşımlamada kullanılabileceğini göstermiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, 5. bölümde literatürle karşılaştırılarak açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde detayları 5. bölümde verilen aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, elektrik iletkenlik, Cr miktarı arttıkça azalmakta, P_s ve T_s arttıkça artmaktadır.
- ✓ T/M elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça İİH düşmekte buna karşın EAH iyileşmektedir (azalmaktadır).
- ✓ Uygun K_t değerlerinde (örneğin %85 Cu-%15 Cr), Cu-Cr T/M elektrotlar, elektrolitik Cu elektrottan daha yüksek İİH değerleri verebilmektedir.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, P_s ve/veya T_s 'nin artmasıyla T/M elektrotun yoğunluğu ve elektrik iletkenliği artmakta (toz taneciklerinin birbirlerine daha kuvvetli bağlanmaları sebebiyle) ve bunun sonucu olarak daha yüksek İİH değerleri elde edilebilmektedir.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, İİH üzerinde P_s , T_s 'den daha etkilidir.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, P_s arttıkça EAH önce artmakta sonra azalmakta, T_s arttıkça artmaktadır.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, 4 (K_t =%75Cu-%25Cr, P_s =700 MPa, T_s =800 °C) ve 7 (K_t =%75Cu-%25Cr, P_s =600 MPa, T_s =900 °C) numaralı elektrotlarda, elektrot yüzeyinde içeriğinde C, Cr, Fe ve Cu bulunan bir katman oluşmuştur. Bu katman sayesinde EAH negatif çıkmış yani elektrotta malzeme kaybı yerine malzeme artışı tespit edilmiştir.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, bağıl aşınma, Cr miktarı arttıkça önce artmakta sonra azalmakta, P_s arttıkça önce artmakta sonra azalmakta ve T_s arttıkça artmaktadır.
- ✓ Elektrolitik Cu elektrot, işparçası yüzeyinde 3,67 μm R_a ve 20,63 μm R_z değeri vermişken, Cu-Cr T/M elektrotlar, 3,80-5,69 μm arasında değişen R_a ve 22,93-34,40 μm arasında değişen R_z değerleri vermiştir. Daha yüksek R_z değerlerinden dolayı, T/M elektrotlarla işlenen yüzeyler, elektrolitik Cu ile işlenen yüzeye göre daha mat bir görünüme sahip olmuştur.

- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, yüzey pürüzlülüğü (hem R_a hem de R_z cinsinden), Cr miktarı arttıkça artmakta, P_s arttıkça önce azalmakta sonra artmakta ve T_s arttıkça önce azalmakta sonra artmaktadır.
- ✓ Cu-Cr T/M elektrotlarla işlenmiş işparçası yüzeylerinde, içeriğinde Cu, Cr, Fe ve C olan ve kalınlığı 270 μm 'ye kadar çıkan bir katman oluşmuştur. Bu katmanın kalınlığı elektrottaki Cr miktarı ile orantılı olarak değişmektedir.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, elektrot içerisinde bulunan Cr miktarı ile iş parçası yüzeyinde biriken Cr ve Cu malzeme miktarı doğru orantılı değildir fakat T_s ve P_s arttıkça azalmaktadır.
- ✓ Cr katkılı T/M elektrotlarda, iş parçası yüzeyinin mikrosertliği, kompozit T/M elektrot içindeki Cr miktarı arttıkça, önce artmış sonra azalmış, P_s arttıkça önce artmış sonra azalmış ve T_s arttıkça sürekli artmıştır.
- ✓ Cr-Cu T/M elektrotlar kullanıldığında iş parçası yüzeyinin aşınma direnci 1,4-2,6 kat artmıştır.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, elektrik iletkenlik, Mo miktarı arttıkça azalmakta, P_s arttıkça artmakta ve T_s 'nin artmasıyla önce azalmakta sonra artmaktadır.
- ✓ Üç farklı K_t değerinde, Cu-Mo T/M elektrotlar, elektrolitik Cu elektrottan daha yüksek İİH değerleri vermiştir.
- ✓ Mo'nun daha yüksek ısı ve elektrik iletkenliğinden dolayı, Mo katkılı elektrotlar, Cr katkılı elektrotlara göre daha yüksek İİH değerleri vermektedir.
- ✓ T/M elektrot içerisindeki Mo miktarı arttıkça İİH artmaktadır.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, P_s 'nin artmasıyla T/M elektrotun yoğunluğu ve elektrik iletkenliği artmakta (toz taneciklerinin birbirlerine daha kuvvetli bağlanmaları sebebiyle) ve bunun sonucu olarak daha yüksek İİH ve EAH değerleri elde edilebilmektedir. T_s 'nin artmasıyla ise daha düşük EAH değerleri elde edilmektedir.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, 7 (K_t =%75Cu-%25Cr, P_s =600 MPa, T_s =900 °C) numaralı elektrotta, elektrot yüzeyinde, kalınlığı ortalama 76 μm olan ve içeriğinde C, Mo, Fe ve Cu bulunan bir katman oluşmuştur. Bu katman sayesinde EAH negatif çıkmış yani elektrotta malzeme kaybı yerine malzeme artışı tespit edilmiştir.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, K_t ve P_s değişimi ile R_a ve R_z değişiminin orantılı olmadığı görülmüştür. T_s 'nin artışı ile R_a azalmış, R_z artmıştır.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, işparçası yüzeyinde, içeriğinde Cu, Mo, Fe ve C olan ve kalınlığı 41 μm 'ye kadar çıkan bir katman oluşmuştur. Bu katmanın kalınlığı, K_t ve T_s değişimi ile orantılı değildir ama P_s değeri arttıkça, azalmıştır.

- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarla işlenmiş işparçası yüzeylerinde oluşan katman kalınlığı, Cr katkılı T/M elektrotlarla işlenmiş işparçası yüzeylerinde olduğundan daha azdır.
- ✓ Mo katkılı T/M elektrotlarda, yüzeyde oluşan katmanın mikrosertliği, ana malzemeden daha yüksek çıkmıştır ve bu değerin K_t değişimi ile orantılı olmadığı, ancak P_s 'in artmasıyla azaldığı, T_s 'in artmasıyla arttığı görülmüştür. En yüksek mikrosertlik ise elektrolitik Cu ile yapılan işlemede elde edilmiştir.
- ✓ Mo-Cu T/M elektrotlar kullanıldığında iş parçası yüzeyinin aşınma direnci 1,5-3,1 kat artmıştır.
- ✓ Cu-Cr ve Cu-Mo T/M elektrotlar ile işlenmiş işparçası yüzeylerinin korozyon direnci ana malzemenin korozyon direncinden yüksek çıkmıştır. P_s , yüzeydeki korozyon direncinin artırılmasında Mo katkılı elektrotlarda, Cr katkılı elektrotlara göre daha etkilidir.
- ✓ %90Cu-%10B₄C ve %95Cu-%5B₄C karışımli elektrotların İHH değerleri, elektrolitik Cu ve T/M Cu'ya göre daha yüksek çıkmıştır
- ✓ B₄C katkılı elektrotlarda, her üç K_t 'de de EAH değerleri elektrolitik Cu ve T/M Cu elektrotlara göre yüksek çıkmıştır.
- ✓ B₄C katkılı elektrotlarda, B₄C miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü hem R_a hem de R_z cinsinden artmıştır. Elektrolitik Cu ve T/M Cu'ya göre yüzey pürüzlülükleri yüksek çıkmıştır.
- ✓ B₄C katkılı elektrotlarda, iş parçası yüzeyinde kalınlığı 15 μm 'ye kadar çıkan ve içeriğinde B olan bir katman oluşmuştur.
- ✓ B₄C katkılı elektrotlarda, elektrot içerisinde bulunan B₄C miktarı arttıkça, iş parçası yüzeyinde biriken B malzeme miktarı artmıştır ve bunun sonucunda işlenmiş yüzeyin mikrosertliği 1036,1 HV'ye kadar çıkmıştır.
- ✓ B₄C-Cu T/M elektrotlar kullanıldığında iş parçası yüzeyinin aşınma direnci 2,3-3 kat artmıştır.
- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Cr miktarı arttıkça gözenek miktarı artmış, gözenek miktarı artınca da yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır. Gözenek miktarının artması ile elektrotun elektrik iletkenliği azalmış ve İİH azalmıştır. Elektrot yüzeyinde biriken Fe miktarının artması ile de EAH azalmıştır.
- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça gözenek miktarı azalmış, gözenek miktarı azalınca da yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır. Gözenek miktarının azalması ile elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu sayede de İİH ve EAH artmıştır.

- ✓ Cr katkılı elektrotlarda; P_s arttıkça gözenek miktarı önce azalmış, sonra hemen hemen değişmemiştir. Gözenek miktarının azalması ile elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu sayede de $\dot{I}H$ artmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; elektrot içerisindeki Mo miktarı arttıkça gözenek miktarı artmış, gözenek miktarı artınca da yüzeyde biriken Fe miktarı düzenli olarak artmıştır. Elektrot yüzeyinde biriken Fe miktarının artması ile EAH azalmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; T_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır, gözenek miktarı azalınca da yüzeyde biriken C miktarı düzenli olarak artmıştır. Elektrot yüzeyinde biriken C miktarının artması ile EAH azalmıştır.
- ✓ Mo katkılı elektrotlarda; P_s arttıkça gözenek miktarı azalmıştır. Gözenek miktarının azalması ile elektrotun elektrik iletkenliği artmış, bu sayede de $\dot{I}H$ ve EAH artmıştır.
- ✓ Genel olarak T/M elektrotlardaki gözenek miktarı ile, işleme sonucunda elektrot yüzeyinde biriken malzeme miktarı arasında doğru bir orantı olmadığı görülmüştür.
- ✓ Cu-Cr, Cu-Mo ve CuB₄C elektrotlar karşılaştırıldığında; en yüksek $\dot{I}H$ ve EAH değeri %90 Cu-%10 B₄C elektrotla, en düşük $\dot{I}H$ ve EAH değeri ise 800 °C’de sinterlenen % 75 Cu-%25 Cr elektrotla elde edilmiştir. En yüksek bağıl aşınma değeri %85 Cu-%15 B₄C elektrotla, en düşük bağıl aşınma değeri ise 800 °C’de sinterlenen % 75 Cu-%25 Cr elektrotla elde edilmiştir. En yüksek R_a ve R_z değeri %85 Cu-%15 B₄C elektrotla, en düşük R_a ve R_z değeri ise 800 MPa basınçta basılan % 75 Cu-%25 Mo elektrotla elde edilmiştir.

Aşağıda belirtilen ilave çalışmaların literatüre katkısı olabileceği düşünülmektedir;

- ✓ Dielektrik sıvısı olarak gazyağı kullanılmıştır. Suyun dielektrik sıvısı olarak kullanılması araştırılabilir.
- ✓ Elektrotların sinterlenmeden yani ham halde kullanımı denenebilir. Bu sayede işparçası yüzeyinde daha kalın bir tabaka oluşturulabilir.
- ✓ Dielektrik sıvısına herhangi bir toz karıştırılmadan deneyler yapılmıştır. T/M elektrot kullanımının yanında dielektrik sıvısına metal tozu ilave edilmesi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Joshi, S. N., Pande, S. S. (2010). Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process. *Journal of Manufacturing Processes*, 12: 45-56.
2. Khanra, A. K., Sarkar, B. R., Bhattacharya, B., Pathak, L. C., Godkhindi, M. M. (2007). Performance of ZrB₂-Cu composite as an EDM electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(1): 122-126.
3. Tsai, H. C., Yan, B. H., Huang, F. Y. (2003). EDM performance of Cr/Cu based composite electrodes. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 43(3): 245-252.
4. Naveen, B., Maheshwari, S., Sharma, C. (2008). Performance evaluation of powder metallurgy electrode in electrical discharge machining of AISI D2 steel using Taguchi method. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 2(3): 167-171.
5. Samuel, M. P., Philips, P. K. (1997). Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(11): 1625-1633.
6. Ndaliman, M. B., Khan, A. A., Ali, M. Y. (2013). Influence of electrical discharge machining process parameters on surface micro-hardness of titanium alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 227 (3): 460-464.
7. Das, A., Misra, J. P. (2012). Experimental investigation on surface modification of aluminum by electric discharge coating process using TiC/Cu green compact tool-electrode. *Machining Science and Technology*, 16 (4): 601-623.
8. Stambekova, K., Lin, H. M., Uan, J. Y. (2012). Surface modification of 5083 Al alloy by electrical discharge alloying processing with a 75 mass% Si-Fe alloy electrode. *Applied Surface Science*, 258 (10): 4483-4488.
9. Khan, A. A., Ndaliman, M. B., Soot, H. B. M., Ishak, N. B. (2012). Influence of thermal conductivity of electrodes on EDM process parameters. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(9): 337-345.
10. Patowari, P. K., Saha, P., Mishra, P. K. (2011). Taguchi analysis of surface modification technique using W-Cu powder metallurgy sintered tools in EDM and characterization of the deposited layer. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 54: 593-604.
11. Ndaliman, M. B., Khan, A. A. (2011). Development of powder metallurgy (PM) compacted Cu-TaC electrodes for EDM. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 1: 385-391.

12. Patowari, P. K., Saha, P., Mishra, P. K. (2010). Artificial neural network model in surface modification by EDM using tungsten copper powder metallurgy sintered electrodes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 51: 627–638.
13. Rahman, M. M., Khan, A. R., Kadirgama, K., Noor, M. M., Bakar, A. (2010). Modeling of material removal on machining of Ti-6Al-4V through EDM using copper tungsten electrode and positive polarity. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 71: 576-581.
14. Kumar, V., Beri, N., Kumar, A., Singh, P. (2010). Some studies on electric discharge machining of hastelloy using powder metallurgy electrode. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 1(2): 16-27.
15. Muttamara, A., Fukuzawa, Y., Mohri, N., Tani, T. (2009). Effect of electrode material on electrical discharge machining of alumina. *Journal of Materials Processing Technveeology*, 209(5): 2545-2552.
16. Tomadi, S. H., Hassan, M. A., Hamedon, Z., Daud, R., Khalid, A. G. (2009). Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, material removal rate and electrode wear of tungsten carbide. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, 1803-1808.
17. Jahan, M. P., Wong, Y. S., Rahman, M. (2009). A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials. *Journal of Material Processing Technology*, 209(8): 3956-3967.
18. Chen, Y. F., Chow, H. M., Lin, Y. C., Lin, C. T. (2008). Surface modification using semi-sintered electrodes on electrical discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 36: 490–500.
19. Uhlmann, E., Roehner, M. (2008). Investigations on reduction of tool electrode wear in micro-EDM using novel electrode materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(2): 92-96.
20. Salman, Ö., Kayacan, M. C. (2008). Evolutionary programming method for modeling the EDM parameters for roughness. *Journal of Material Processing Technology*, 200: 347-355.
21. Ho, S. K., Aspinwall, D. K., Voice, M. (2007). Use of powder metallurgy (PM) compacted electrodes for electrical discharge surface alloying/modification of Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3): 123-126.
22. Dhar, S., Purohit, R., Saini, N., Sharma, A., Kumar, G. H. (2007). Mathematical modelling of electric discharge machining of cast Al-4Cu-6Si alloy-10 wt. % SiC_p composite. *Journal of Material Processing Technology*, 194: 24-29.
23. Kumar, B. V. M., Ramkumar, J., Basu, B., Kang, S. (2007). Electro-discharge machining performance of TiCN-based cermets. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 25(4): 293-299.

24. Marafona, J. (2007). Black layer characterisation and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Processing Technology*, 184: 27-31.
25. Bai, C. Y., Koo, C. H. (2006). Effects of kerosene or distilled water as dielectric on electrical discharge alloying of superalloy Haynes 230 with Al–Mo composite electrode. *Surface & Coatings Technology*, 200:4127-4135.
26. Bai, C. Y. (2007). Effects of electrical discharge surface modification of superalloy Haynes 230 with aluminum and molybdenum on oxidation behavior. *Corrosion Science*, 49: 3889–3904.
27. Lee, H. T., Hsu, F. C., Tai, T. Y. (2004). Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper–tungsten electrode. *Materials Science and Engineering: A*, 364 (1-2): 346–356.
28. Singh, S., Maheshwari, S., Pandey, P. C. (2004). Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3): 272–277.
29. Simao, J., Lee, H. G., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Aspinwall, E. M. (2003). Workpiece surface modification using electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 121-128.
30. Lee, S. H., Li, X. (2003). Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide. *Journal of Material Processing Technology*, 139: 315-321.
31. Simão, J., Aspinwall, D., El-Menshawyb, F., Meadows, K. (2002). Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge texturing hardened AISI D2. *Journal of Materials Processing Technology*, 127: 211–216.
32. Lee, S. H., Li, X. P. (2001). Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. *Journal of Material Processing Technology*, 115: 344-358.
33. Li, L., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Lu, L. (2001). EDM performance of TiC/copper-based sintered electrodes. *Materials & Design*, 22(8): 669-678.
34. Li, L., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Lu, L. (2001). Effect of TiC in copper–tungsten electrodes on EDM performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3): 563-567.
35. Marafona, J., Wykes, C. (2000). A new method of optimising material removal rate using EDM with copper tungsten electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40: 153-164.
36. Zaw, H. M., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., Lu, L. (1999). Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90: 182-186.

37. Poyrazoğlu, O. (2008). Metal matrisli kompozit malzemelerin elektro erozyonla işleme performanslarının deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 17-31.
38. Anıl, D. (2006). Elektro erozyonla işlemede stereolitografi tekniği yardımıyla hızlı elektrot üretimi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 21-37.
39. Özgedik, A. (2009). Elektro erozyonla işlemede iş parçasına uygulanan titreşimlerin işleme performansına etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 32-48.
40. Dursun, K. (2007). Elektro erozyonla işlemede tel demeti elektrotun performansının deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-27.
41. Küçüktürk, G. (2008). Elektro erozyonla iletken olmayan seramiklerin işlenmesi için yöntem geliştirilmesi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 26-41.
42. Puertas, I., Luis, C. J. (2003). A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**, 143-144: 521-526.
43. Sarıkavak, Y. (2009). Elektro erozyonla işlemede iş parçası aşınmasının teorik modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 13-21.
44. Joshi, S. N., Pande, S. S. (2011). Intelligent process modelling and optimization of die-sinking electric discharge machining. **Applied Soft Computing**, 11: 2743-2755.
45. Etaat, M., Emamy, M., Ghambari, M., Fadaei, E. (2009). Surface treatment and nickel plating of iron powder metallurgy parts for corrosion protection. **Materials & Design**, 43: 3560-3565.
46. Marafona, J. D., Araújo, A. (2009). Influence of workpiece hardness on EDM performance. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 49(9): 744-748.
47. Moro, T., Tani, T. (2006). Recent evolution of electrical discharge machining. **Multi-Material Mikro Manufacture**, 23-26.
48. Ho, K. H., Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 37(11): 1287-1300.
49. Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P., Schumacher, B.M. (2005). Advancing EDM through fundamental insight into the process. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, 54 (2) : 64-87.

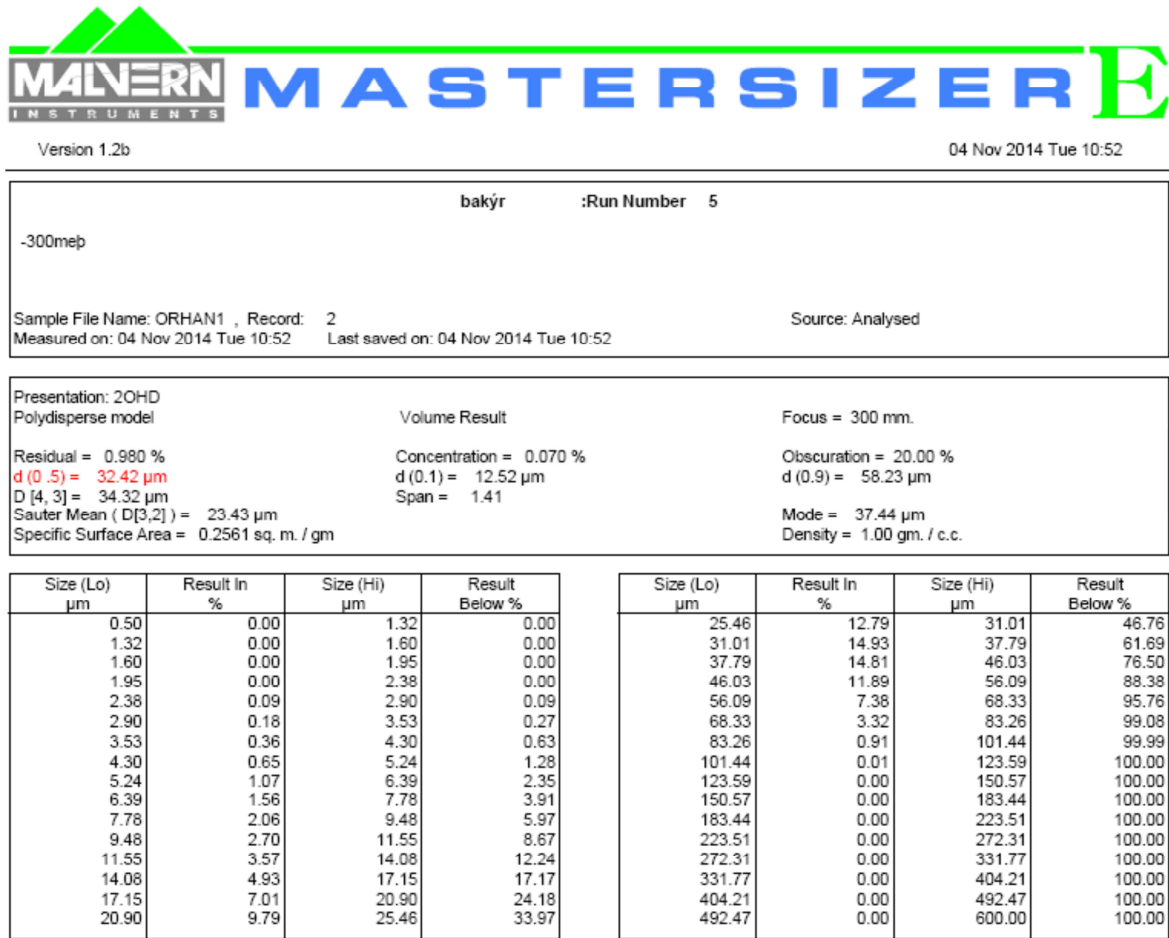
50. Salman, Ö. (2005). Dalma erozyon işlemlerinde yüzey pürüzlülük parametrelerinin genetik programlama ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 18-37.
51. Deniz, T. Ç. (2009). Elektro erozyonla işlemede elektrot aşınmasının telafisinin deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 6-23.
52. Hocheng, H., Lei, W. T., Hsu, H. S. (1997). Preliminary study of material removal in electrical-discharge machining of SiC/Al. **Journal of Materials Processing Technology**, 63: 813-818.
53. Abbas, N. M., Solomon, D. G., Bahari, M. F. (2007). A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 47(7-8): 1214-1228.
54. Yaman, K. (2007). Elektro erozyonla işlemede polimer matrisli iletken toz takviyeli kompozit elektrot ile işlemenin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 31-46.
55. Çaydaş, U. (2008). Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 29-45.
56. Izquierdo, B., Sanchez, J. A., Plaza, S., Pombo, I., Ortega, N. (2009). A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 49: 220–229.
57. Chow, H. M., Yang, L. D., Lin, C. T., Chen, C. F. (2008). The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining. **Journal of Materials Processing Technology**, 195(1-3): 160-170.
58. Leão, F. N., Pashby, I. R. (2004). A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**, 149: 341–346.
59. Mohri, N., Tani, T. (2006). Recent evolution of electrical discharge machining. **Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**, 23-26.
60. Schubert, T., Trindade, B., Weißgärber, T., Kieback, B. (2008). Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. **Materials Science and Engineering: A**, 475(1-2): 39-44.
61. Schubert, T., Ciupiński, L., Zieliński, W., Michalski, A., Weißgärber, T., Kiebac, B. (2008). Interfacial characterization of Cu/diamond composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. **Scripta Materialia**, 58(4): 263-266.
62. Schubert, T., Brendel, A., Schmid, K., Koeck, T., Ciupinski, L., Zielinski, W., Weißgärber, T., Kieback, B. (2007). Interfacial design of Cu/SiC composites prepared

- by powder metallurgy for heat sink applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38: 2398-2403.
63. Wang, C. C., Lin, Y. C. (2009). Feasibility study of electrical discharge machining for W/Cu composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27: 872-882.
 64. Lee, H. G., Simao, J., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Voice, W. (2004). Electrical discharge surface alloying. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 334-340.
 65. Tsai, Y. Y., Masuzawa, T. (2004). An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 149: 304-309.
 66. Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., Sethi, B. L. (2009). Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8): 3675-3687.
 67. Haron, C. H. C., Ghani, J.A., Burhanuddin, Y., Seong, Y. K., Swee, C. Y. (2008). Copper and graphite electrodes performance in electrical-discharge machining of XW42 tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1-3): 570-573.
 68. Lonardo, P. M., Bruzzone, A. A. (1999). Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM. *Annals of the CIRP*, 48(1): 123-126.
 69. Bojorquez, B., Marloth, R. T., Es-Said, O. S. (2002). Formation of a crater in the workpiece on an electrical discharge machine. *Engineering Failure Analysis*, 9: 93-97.
 70. Lee, H. T., Tai, T. Y. (2003). Relationship between EDM parameters and surface crack formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 676-683.
 71. Choudhary, R., Kumar, H., Garg, R. K. (2010). Analysis and evaluation of heat affected zone in electric discharge machining of EN-31 die steel. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 17: 91-98.
 72. Ergün, Z. E., Çoğun, C. (2006). Elektro erozyonla işlemede (EEİ) iş parçası yüzey karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 3: 427-441.
 73. Murray, J., Zdebski, D., Clare, A. T. (2012). Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 212: 1537-1547.
 74. Kruth, J. P., Tonshoff, H. K., Klocke, F. (1998). Surface and sub-surface quality in material removal process for tool making. *Proceedings of the ISEM-12*, 33-64.
 75. Shunmugam, M. S., Philip, P. K., Gangadhar, A. (1994). Improvement of wear resistance by EDM with tungsten carbide powder metallurgy electrode. *Wear*, 171 (1-2): 1-5.

76. Wang, Z. L., Fang, Y., Wu, P. N., Zhao, W. S., Cheng, K. (2002). Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. ***Journal of Material Processing Technology***, 129: 139-142.

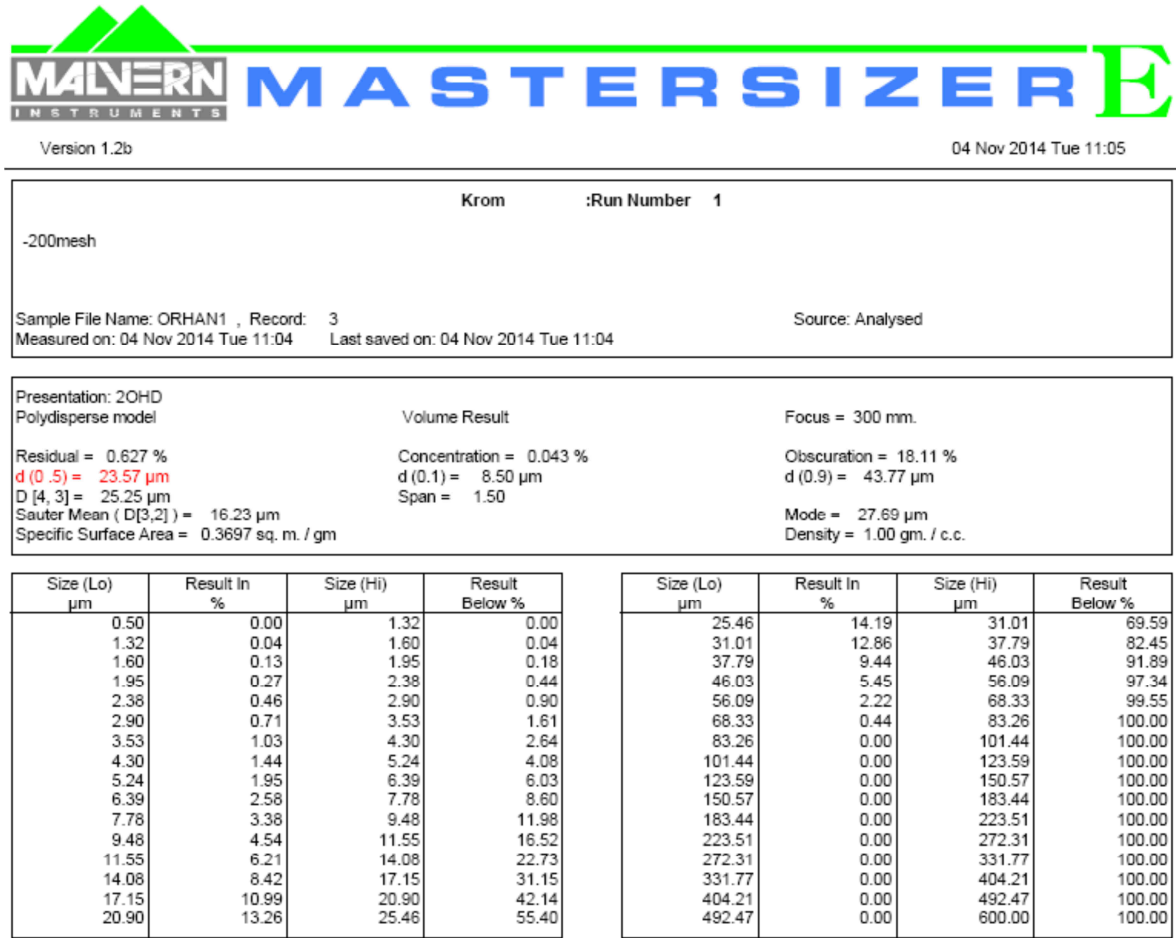
EKLER

EK-1. Cu tozu ölçüm sonuçları



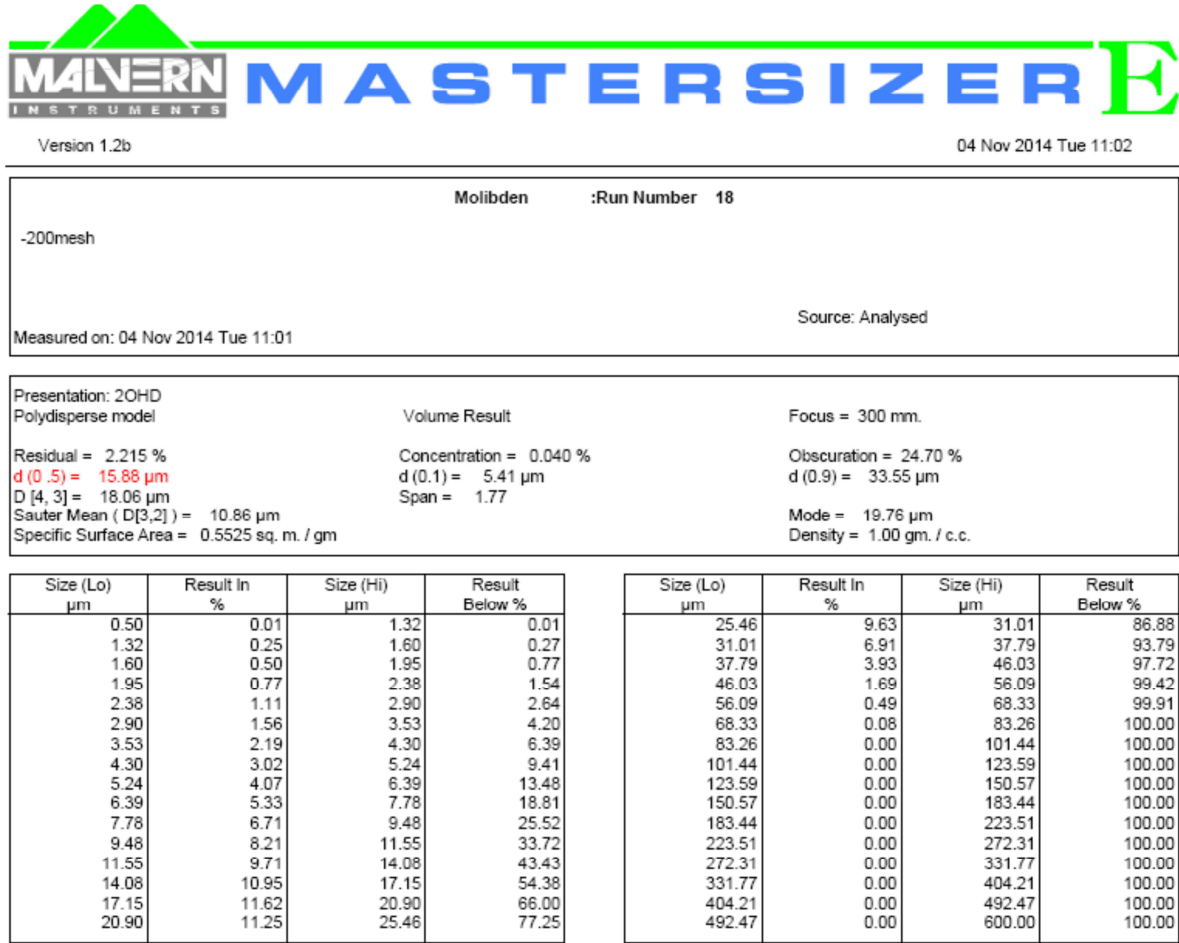
Şekil 1.1. Cu tozu ölçüm sonuçları

EK-2. Cr tozu ölçüm sonuçları

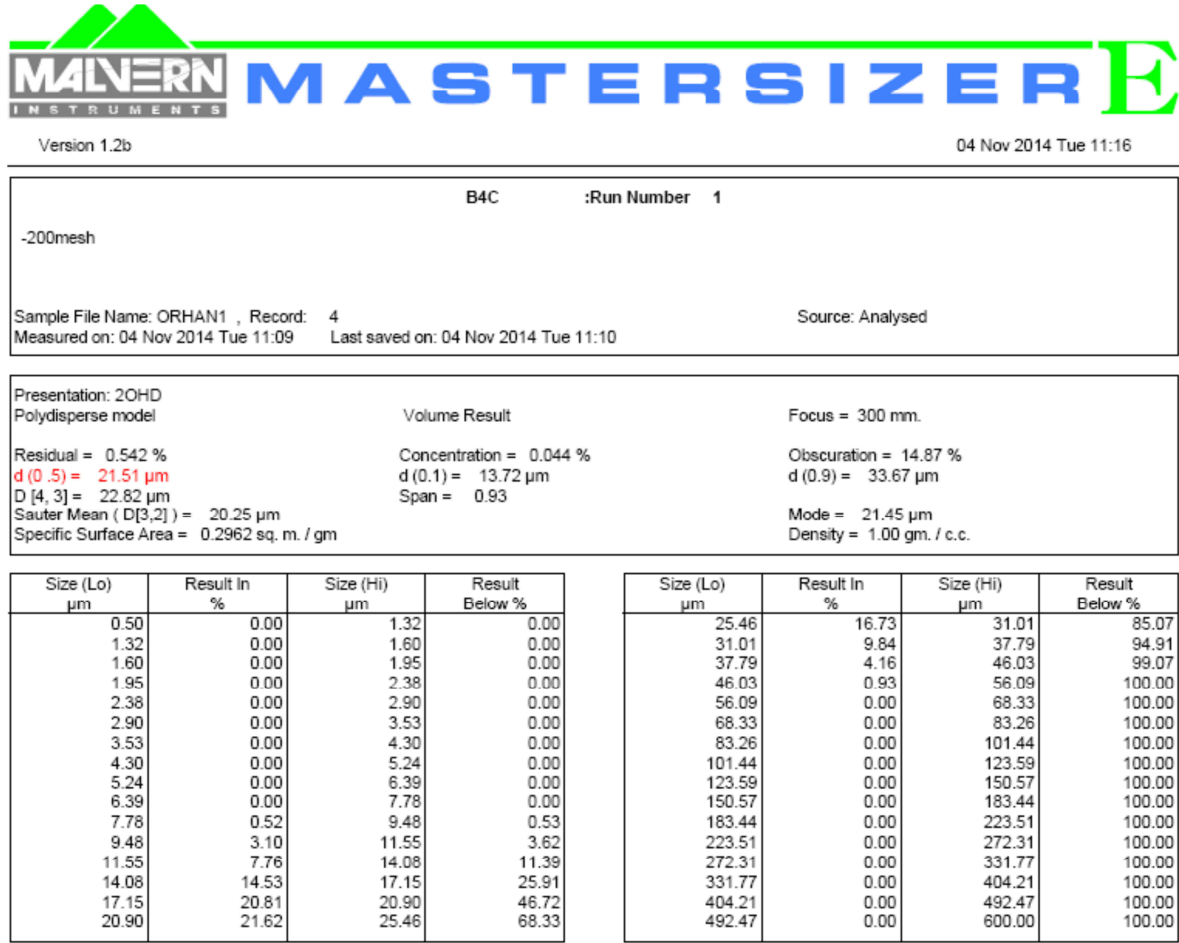


Şekil 2.1. Cr tozu ölçüm sonuçları

EK-3. Mo tozu ölçüm sonuçları



Şekil 3.1. Mo tozu ölçüm sonuçları

EK-4. B₄C tozu ölçüm sonuçlarıŞekil 4.1. B₄C tozu ölçüm sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜLCAN, Orhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.09.1981, Çankırı
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 794 66 05
 Faks : -
 e-mail : ogulcan@tai.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2016
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2010
Lisans	ODTÜ/ Makine Mühendisliği	2003
Lise	Samsun Veteriner Sağlık Meslek Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-Halen	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Tasarım Teknik Uzman Mühendis
2003-2006	Aselsan A.Ş.	İmalat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

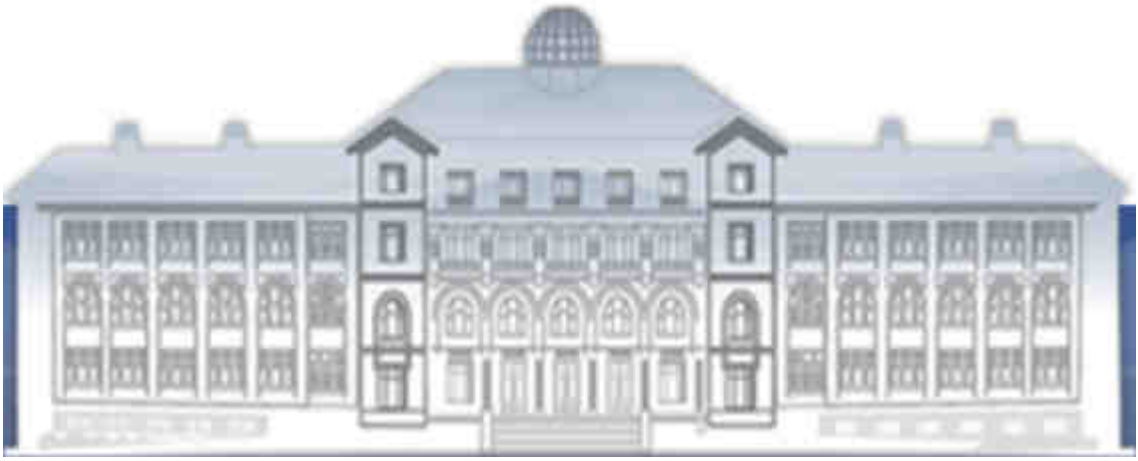
Yayınlar

- Gülcan, O., Uslan, İ., Usta, Y., Çoğun, C. (2015). Elektro erozyonla işlemede Cu-Cr T/M elektrot kullanımının işleme performansına etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3): 381-394.
- Gülcan, O., Uslan, İ., Usta, Y., Çoğun, C. (2015). EDM performance of B4C-Cu-based sintered tool electrodes. *Fifth Conference, Materials Science, Hydro- and Aerodynamics, and National Security*, 23-24 October, Sofia, Bulgaria.

3. Gülcan, O., Uslan, İ., Usta, Y., Çoğun, C. (2014). Electro Discharge Machining Performance of Chromium-Copper Powder Metal Electrodes. **7th. International Powder Metallurgy Conference**, 24-28 June, Ankara.
4. Türköz, G., Uslan, İ., Gülcan, O. (2014). Electro Discharge Machining Performance of Copper Powders of Different Shapes and Sizes. **7th. International Powder Metallurgy Conference**, 24-28 June, Ankara.
5. Gülcan, O. (2014). Saf suda elektro erozyonla işleme. **Mühendis ve Makine dergisi**, 55(648): 28-36.
6. Gülcan, O., Gemalmayan, N. (2013). Patlayıcı yardımı ile form vermede patlayıcı kütlesine etki eden faktörler. **Makinatek dergisi**, 187: 206-216.
7. Taşkiran, C., Türkbaş, S., Gülcan, O. (2013). Kompozit malzemelerin darbe hasarlarını iyileştirmeleri. **Makinatek dergisi**, 185: 180-184.
8. Gülcan, O. (2012). Metallerin elektromanyetik kuvvetle kaynak edilmesi. **Mühendis ve Makine dergisi**, 53(629): 24-33.
9. Gülcan, O. (2012). Metallerin Patlayıcı Yardımı İle Kaynatılması. **Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi**, 24(1): 11-34.
10. Gülcan, O. (2012). Yalıtkan seramiklerin üç boyutlu işlenmesi. **Makinatek dergisi**, 176: 174-182.
11. Gülcan, O. (2012). Dielektrik sıvısına metal tozu katkılı elektro erozyonla işleme. **Mühendis ve Makine dergisi**, 53(625): 54-64.
12. Gülcan, O. (2012). Gaz ortamında elektro erozyonla işleme. **Makinatek dergisi**, 173: 214-222.
13. Gülcan, O., Gemalmayan, N. (2011). Optimization of explosive mass in explosive forming process by using genetic algorithm. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 27(4): 286-291.
14. Gülcan, O., Gemalmayan, N. (2011). Patlayıcı Yardımı ile Form Verme ve Uçak Sanayiinde Kullanımı. **12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu**, Bursa, 13-14 Mayıs.
15. Türköz, G., Dehneliler, S., Gülcan, O. (2011). Uçaklardaki Yatay Dengeleyi Tasarımı Ve Analizi İçin Temel Yaklaşımlar. **Makinatek dergisi**, 163: 174-180.
16. Gülcan, O., Gemalmayan, N. (2010). Patlayıcı Yardımı ile Form Verme. **Makinatek dergisi**, 158: 218-224.

Hobiler

Osmanlı Tarihi, Dinler Tarihi, Gezi



GAZİ GELECEKTİR..