

**METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENME PERFORMANSLARININ
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Oğuz POYRAZOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2008
ANKARA**

Oğuz POYRAZOĞLU tarafından hazırlanan METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENME PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

Tez Danışmanı, Makina Eğitimi Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Makina Mühendisliği AD, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

Makina Eğitimi AD, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Makina Eğitimi AD, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Adnan SÖZEN

Makina Eğitimi AD, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

Makina Eğitimi AD, Gazi Üniversitesi

Tarih: 23/01/2008

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

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Oğuz POYRAZOĞLU

**METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENME PERFORMANSLARININ
DENEYSEL İNCELENMESİ
(Doktora tezi)**

Oğuz POYRAZOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2008**

ÖZET

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin geleneksel olmayan işleme yöntemleriyle işlenebilirliği, araştırmacıların ve malzeme geliştiricilerin yoğun ilgisi altındadır. Bu tez çalışması kapsamında Al₄₂7915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 Al-MMK malzeme ve AlMg₁SiO₆TiH₂0,8 MMK malzeme olmak üzere üç farklı MMK ve referans değerlendirmeleri için ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve 1.2210 115CrV3 kodlu malzemenin elektro erozyonda işlenebilirliği, deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, elektro erozyon ile işlemede, farklı boşalım akımı ve vurum süreleri olan değişken işleme parametreleri, tüm malzemeler için aynı değerde ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Elektrot takımında meydana gelen aşınma; elektrot aşınma hızı (EAH), işparçasında meydana gelen aşınma; işparçası işleme hızı (İİH) ve malzeme çiftindeki aşınma ilişkisi; bağlı aşınma (BA) gibi temel performans çıktıları, üç farklı girdi değişkenlerine bağlı olarak, deneysel çalışmayla elde edilmiştir. Yapay sinir ağları kullanılarak beş ayrı malzeme için boşalım akımı, vurum süresi ve işleme süresine bağlı, (EAH), (İİH) ve (BA) performans çıktılarının matematiksel modelleri türetilmiştir. Ayrıca her malzemedan aynı şartlarda elde edilen numunelerin bir serisinin tarama elektron mikroskopunda (SEM), yüzey oluşumu, mikro yapıları ve elektriksel iletkenlikle ilişkili malzeme difüzyonu

incelenmiştir. Üç farklı MMK malzemedeki BA performansını iyileştirecek işleme parametreleri belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme (EEİ), metal matrisli kompozit (MMK), elektrot aşınma hızı (EAH), işparçası işleme hızı (İİH), bağlı aşınma (BA), işlenebilirlik, boşalım akımı, vurum süresi, elektriksel iletkenlik, tarama elektron mikroskobu (SEM), mikroyapı, beyaz tabaka kalınlığı (BTK), difüzyon
Sayfa Adedi : 128
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELECTRIC DISCHARGE
MACHINING PERFORMANCE ON METAL MATRIX COMPOSITES**

(Ph.D. Thesis)

Oğuz POYRAZOĞLU

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2008

ABSTRACT

The non-traditional machining of the metal matrix composite (MMC) is under the intensive interest of the scientists and the material developers. In this thesis, three different SiC particle reinforced metal matrix composite (Al427915 Al/Cu, AE109 Al and AlMg1SiO,6TiH₂0,8) and two different materials (ETIAL 20 and 1.2210 115CrV3) were experimentally studied with the die-sinking EDM method. EDM experiments were carried out changing the machining parameters such as pulse duration and discharge current with the constant values in each experiment. The main performance outputs such as tool wear rate (TWR), material removal rate (MRR), relative electrode wear rate (REWR) and relative wear between electrode and tool, were experimentally investigated for the three main input parameters. Mathematical models by using Artificial Neural Networks were derived for TWR, MRR, REWR outputs according to the discharge current, the pulse time and the machining time. The surface formation, the micro structures and the material diffusion depended on the electrical conductivity were studied on a set of materials which are manufactured at the same conditions. The machining parameters that make better the relative wear performance were determined.

Science code : 708.3.028
Key words : Electrical discharge machining (EDM), metal matrix composite (MMC), machinability, electrode tool wear (ETW), metal removal rate (MRR), relative electrode wear rate (REWR), white layer thickness (WLT), discharge current, puls on-time, SEM, diffusion
Page number : 128
Adviser : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince yardım ve zamanlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yönlendiren çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e ve Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a, çalışmamın akışının değişimine vesile olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Kasım HABALI'ya, çalışmalarımnda desteklerini esirgemeyen Öğr. Grv. Dr. Abdülmecit GÜLDAŞ'a, ayrıca yıllar boyu Kalıp Eğitimi Anabilim Dalı'nda birlikte çalışmaktan büyük zevk aldığım arkadaşlarıma en kalbi teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmada kullanılan deney numunelerin hazırlanmasında kurumsal desteğini esirgemeyen KALIPSAN firmasının değerli yöneticisi aziz dostum Abdurrahman KELEŞ ve diğer çalışanlarına, elektrot takımının işlenmesine destek veren KAL-TES Makine San. ve Tic. Ltd. firmasını temsilen değerli arkadaşım Latif KARA'ya, deneylerin bilimsel şekilde yapılması için her türlü desteği veren MAKİM Makine İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. (Furkan Mühendislik) yöneticileri Ahmet GÖNÜLLÜ ve Tacettin İLERİ ile birim sorumlusu Zekai SAVRAN'a ve diğer çalışanlarına, deney numunelerinin analizlerinin yapılmasında büyük destek veren Prof. Dr. Süleyman TEKELİ, Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL ve Bülent BEKTAŞ'a, çalışmamız süresince karşılaşılan zorlukların aşılmasında çözüm ortağımız olan kıymetli dostum GÜRTAŞ İnşaat yöneticisi Metin BAŞALMA ile adını yazamadığım diğer değerli arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımda çok önemli ve ayrı bir yeri olan ve hiçbir zaman desteğini benden esirgemeyen rahmetli anneme ve babam ile kardeşlerime, bunun yanında, akademik çalışmalarım sürecinde destek ve yardımlarıyla daima yanımda olan kayınbiraderim Doç. Dr. Hilmi NAMLI'ya ve ayrıca yapılan bu çalışmamın her aşamasında, sabır ve desteğiyle her an yanı başımda var olan feragat ve fedakarlık timsali sevgili eşim Firdevs ve evlatlarım Elektrik - Elektronik Mühendisi Göktürk ile Oğuzhan Göktuğ'a en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	3
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT (MMK) MALZEME	11
2.1. MMK Malzemelerin Sınıflandırılması	13
2.2. MMK Malzemeler İçin Matris Malzemeleri	14
2.3. MMK Malzemeler İçin Takviye Elemanları	14
2.4. Parçacık Takviyeli MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri	14
2.5. MMK Malzemelerde Dayanım Artırıcı Mekanizmalar	15
2.6. MMK Malzemelerin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri	15
3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PRENSİPLERİ	17
3.1. EEİ Tekniği	18
3.1.1. EEİ tekniğinin değişimi ve gelişimi	20
3.2. EEİ Uygulamaları	21
3.2.1. Isıl işlem uygulanmış malzemelerin işlenmesi	21
3.2.2. Mikro-EEİ uygulamaları	21
3.2.3. Seramik türü malzemeleri işleme uygulamaları.....	24
3.2.4. Kompozit malzemeleri işleme uygulamaları	24
3.3. EEİ Araştırmalarının Temel Alanları	24
3.3.1. EEİ performans ölçümleri	25
3.3.2. EEİ işlem (<i>süreç</i>) parametreleri ve etkileri	28
4. DENEYSEL YÖNTEM VE ÇALIŞMALAR	31
4.1. Elektro Erozyon İle İşleme Tezgahı.....	31

	Sayfa
4.2. Dielektrik Sıvısı	32
4.3. İşparçası ve Elektrot Takımı Malzemesi.....	33
4.4. İşleme Parametreleri ve Değişen Değerlerin Karşılıkları	37
4.5. Karşılık Değerlerin (İİH, EAH ve BA) Değerlendirilmesi	39
4.6. Deneylerin Uygulanışı	39
4.7. İşparçası İşleme Hızı Performans Ölçüm Değerlerinin Analizi	41
4.8. Elektrot Aşınma Hızı Performans Ölçüm Değerlerinin Analizi	42
4.9. Yüzey Pürüzlülüğü	42
4.10. Elektriksel İletkenliğin Ölçülmesi	43
4.11. Metalografik İncelemeler	44
4.12. Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Değerlendirme ve Matematiksel Modelleme	45
4.13. Yapay Sinir Ağlarının Öğrenmesinde Sürecinde İstatistiksel Hatalar	45
4.14. Uygulama	46
4.14.1. Matematiksel modelleme	47
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	48
5.1. Deney Sonuçları Performans Çıktılarının Değerlendirilmesi	48
5.2. İşparçası İşleme Hızının (İİH), Elektrot Aşınma Hızının (EAH) ve Bağlı Aşınmanın (BA) Boşalım Akımı Değişimi (I_d) İtibariyle Değerlendirilmesi	48
5.2.1. İşparçası işleme hızının boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi	48
5.2.2. Elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi	56
5.2.3. Bağlı aşınmanın boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi	63
5.3. İşparçası İşleme Hızının (İİH), Elektrot Aşınma Hızının (EAH) ve Bağlı Aşınmanın (BA) Vurum Süresi (t_s) Değişimi İtibariyle Değerlendirilmesi	69

Sayfa

5.3.1. İşparçası işleme hızının vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi	69
5.3.2. Elektrot aşınma hızının vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi	76
5.3.3. Bağlı aşınmanın vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi	83
5.4. Malzeme Çiftlerine Göre Deneysel Olarak Bulunan EAH, İİH ve BA Değişimlerinin YSA ile Elde Edilen Değerlerin Performans Çıktıları	88
5.5. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Metalografik İncelemeler ve Mikroyapı Fotoğrafları	97
5.5.1. Mikroyapı fotoğrafları ve incelemeleri	98
5.6. İşparçası Yüzeyinin ve Enine Kesitlerinin Mikro İncelemesi	102
5.7 Elektriksel İletkenlik Değerinin Etkisinin İncelenmesi	111
5.7.1. EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve I_d değerlerine göre İİH ve EAH değişiminin değerlendirilmesi	111
5.7.2. EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve t_s değerlerine göre İİH ve EAH değişiminin değerlendirilmesi	112
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	118
EKLER	123
EK-1 İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar	124
ÖZGEÇMİŞ	127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları.....	12
Çizelge 4.1. “EDM M 25 A model” tezgâhın bazı teknik özellikleri	31
Çizelge 4.2. Parafinol serisi 5 nolu elektro erozyon sıvısının özellikleri.....	33
Çizelge 4.3. AL427915 Al/Cu MMK malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi	34
Çizelge 4.4. AE109 Al-MMK malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi	35
Çizelge 4.5. Al-MMK (AlMg1SiO,6TiH ₂ 0.8) malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi.....	35
Çizelge 4.6. Ticari Alüminyum ETIAL 20 malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi	35
Çizelge 4.7. 1.2210 115CrV3 malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi	36
Çizelge 4.8. Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi.....	37
Çizelge 4.9. Deney işleme parametreleri	41
Çizelge 4.10. Deneyde kullanılan güç seviyesi ve karşılık değerleri	41
Çizelge 5.1. Eşitlik 5.2, 5.3 ve 5.4’ de bulunan F değerlerine ait katsayılar.....	89
Çizelge 5.2. Eşitlik 5.5, 5.6 ve 5.7 için sabit katsayılar	90
Çizelge 5.3. Eşitlik 5.8, 5.9 ve 5.10 için sabit katsayılar	91
Çizelge 5.4. Eşitlik 5.11, 5.12 ve 5.13 için sabit katsayılar	92
Çizelge 5.5. Eşitlik 5.14, 5.15 ve 5.16 için sabit katsayılar	92
Çizelge 5.6. Deneysel olarak elde edilen değerler ile YSA ile elde edilen değerler arasındaki istatistiksel sonuçlar	97
Çizelge 5.7. Deneysel malzemelerin Cu element kompozisyon değerleri	103

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.8. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 6 A için)	108
Çizelge 5.9. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 9 A için)	108
Çizelge 5.10. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 12,5 A için)	109
Çizelge 5.11. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (t_s , 100 μs , I_d , 9 A için)	110
Çizelge 5.12. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile İİH değerleri	112
Çizelge 5.13. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile EAH değerleri	112
Çizelge 5.14. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile İİH değerleri	113
Çizelge 5.15. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile EAH değerleri	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı takviye elemanına göre MMK malzemesinin gruplandırılmasının şematik gösterilişi	13
Şekil 3.1. Belli bir vurum süresinden sonra EEİ sürecindeki dairesel ısı kaynakları, plazma kanalı ve ergimiş oyukların şematik görünüşü.....	18
Şekil 3.2. EEİ tekniğinde tek bir kıvılcım evriminin fiziksel prensibi	22
Şekil 3.3. Dalma tip EEİ tezgahının sınıflandırılması	23
Şekil 3.4. Temel EEİ araştırma alanlarının sınıflandırılması	26
Şekil 3.5. EEİ’de oluşan vurumların ayrıntılı olarak gösterimi	29
Şekil 4.1. Elektrot donanımı a) Tutucu b) Elektrot c) Montajlı görünüşü.....	38
Şekil 4.2. Bağlama donanımı	38
Şekil 4.3. Modeldeki yapay sinir ağlarının ağ yapısı	47
Şekil 5.1. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	49
Şekil 5.2. AE109 Al-MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	50
Şekil 5.3. AlMg1SiO,6TiH ₂ 0,8 MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	50
Şekil 5.4. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi.....	51
Şekil 5.5. Soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	52
Şekil 5.6. Farklı işparçası malzemeleri için 50 µs’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	53
Şekil 5.7. Farklı işparçası malzemeleri için 100 µs’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	54

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Farklı işparçası malzemeleri için 200 μ s'lik vurum süresinde işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	55
Şekil 5.9. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	56
Şekil 5.10. AE109 al-MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	57
Şekil 5.11. AlMg1SiO,6TiH ₂ 0,8 MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	58
Şekil 5.12. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	59
Şekil 5.13. Cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	60
Şekil 5.14. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 50 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	61
Şekil 5.15. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 100 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	62
Şekil 5.16. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 200 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	63
Şekil 5.17. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	64
Şekil 5.18. AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	64
Şekil 5.19. AlMg1SiO,6-TiH ₂ 0.8 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	65

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	66
Şekil 5.21. Cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	66
Şekil 5.22. Farklı işparçası malzemelerinin 50 μ s'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	67
Şekil 5.23. Farklı iş parçası malzemelerinin 100 μ s'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın I_d ile değişimi	68
Şekil 5.24. Farklı iş parçası malzemelerinin 200 μ s'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi	68
Şekil 5.25. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	69
Şekil 5.26. AE109 Al-MMK malzemesinin işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	70
Şekil 5.27. AlMg1SiO,6TiH ₂ 0.8 MMK malzemesinin işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	71
Şekil 5.28. ETIAL-20 malzemesinin işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	72
Şekil 5.29. 1.2210 115CrV3 malzemesinin işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	73
Şekil 5.30. Farklı iş parçası malzemelerinin 6 A'lik boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	74
Şekil 5.31. Farklı iş parçası malzemelerinin 9 A'lik boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde işparçası işleme hızının ($\dot{I}H$) vurum süresi (t_s) ile değişimi	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. Farklı iş parçası malzemelerinin 12,5 A'lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	75
Şekil 5.33. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	77
Şekil 5.34. AE109 al-MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	78
Şekil 5.35. AlMg1SiO,6TiH ₂ 0,8 MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	78
Şekil 5.36. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	79
Şekil 5.37. Cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	80
Şekil 5.38. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 6 A'lık boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	81
Şekil 5.39. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 9 A'lık boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	82
Şekil 5.40. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 12,5 A'lık boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi	83
Şekil 5.41. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	84
Şekil 5.42. AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	84
Şekil 5.43. AlMg1SiO,6-TiH ₂ 0,8 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	85

Şekil	Sayfa
Şekil 5.44. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	86
Şekil 5.45. Cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	86
Şekil 5.46. Farklı iş parçası malzemelerinin 6 A'lik boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	87
Şekil 5.47. Farklı iş parçası malzemelerinin 9 A'lik boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi	87
Şekil 5.48. Farklı iş parçası malzemelerinin 12,5 A'lik boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi.....	88
Şekil 5.49. Seçilen malzemeler için elektrot aşınma hızı (EAH)'nın deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri	94
Şekil 5.50. Seçilen malzemeler için iş parçası işleme hızı (İİH)'nin deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri	95
Şekil 5.51. Seçilen malzemeler için bağıl aşınma (BA)'nın deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri.....	96
Şekil 5.52. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (6 A için)	108
Şekil 5.53. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (9 A için)	109
Şekil 5.54. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (12,5 A için)	109
Şekil 5.55. Boşalım akımı 9 A, vurum süresi 100 μ s olan işleme şartlarında elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları	110

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. “EDM M 25 A model” EEİ tezgâhı	31
Resim 4.2. Malzeme çifti (<i>elektrot ve işparçasının</i>) bağlama donanımı (a) Malzeme çifti bağlama detayları (b) Malzeme çifti bağlama aparatları	32
Resim 4.3. Dielektrik sıvı uygulama adaptörü görünüşü	32
Resim 4.4. Deney numuneleri a) AL427915 Al/Cu MMK malzeme b) AE109 kodlu MMK malzeme c) Karma işparçası deney malzeme örnekleri	34
Resim 4.5. FOCUS Model CNC torna tezgâhında işlenerek hazırlanan elektrot takımı	36
Resim 4.6. Tel EEİ tezgâhında kesilmiş malzeme çifti (elektrot-işparçası) örnekleri	37
Resim 4.7. EEİ’de işlenmiş kör delik yüzeyin enine kesitinin SEM mikro yapısı	42
Resim 4.8. Solartron 1260 ve 1296 marka yüksek frekans empedans analiz cihazı	43
Resim 5.1. Görüntüleme için tanımlanmış bölgenin gösterilişi	98
Resim 5.2. AL427915 Al/Cu MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta.	98
Resim 5.3. AL109 Al-MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta.....	99
Resim 5.4. AlMg1SiO,6-TiH ₂ 0,8 Al- MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta.....	99
Resim 5.5. ETİAL 20 Ticari alüminyum malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta.....	99
Resim 5.6. 1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta.....	100

Resim	Sayfa
Resim 5.7. EDS analizi yapılan bir numunenin analiz noktalarının SEM görüntüsü üzerinde gösterilişi.....	102
Resim 5.8. Elektrolitik bakır - Al427915 Al/Cu MMK malzeme çifti SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü	103
Resim 5.9. Elektrolitik bakır – AE 109 Al-MMK malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü	104
Resim 5.10. Elektrolitik bakır – AlMg1SiO,6-TiH ₂ 0,8 Al-MMK malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü	105
Resim 5.11. Elektrolitik bakır –Ticari Alüminyum ETİAL 20 malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü	106
Resim 5.12. Elektrolitik bakır –1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
φ	İşleme verilen karşılık değerinin (Y) fonksiyonu
ρ	Yoğunluk, g/mm ³
$\sigma_{iletkenlik}$	Malzemenin elektriksel iletkenliği, mm/ Ω mm ²
A	Yüzey alanı, mm ²
I, I _d	Boşalım akımı, amper (A)
k	Isıl iletkenlik katsayısı, W/m ^o K
L	Numune kalınlığı, mm
P _b	Dielektrik püskürtme basıncı, bar
R	Direnç, ohm (Ω)
R ²	Mutlak değişim kesri
R _a	ortalama yüzey pürüzlülüğü, μ m
t _{işleme}	İşleme süresi, dak
t _p	Bekleme süresi, μ s
t _s , T	Vurum süresi, μ s
V	İşleme gerilimi, V
Y	İşleme verilen karşılık değeri

Kısaltmalar	Açıklama
BA	Bağıl Aşınma / Relative Electrode Wear Rate (REWR), %
BTK	Beyaz Tabaka Kalınlığı / White Layer Thickness (WLT), μ m
CNC	Computer Numerical Control
EAH	Elektrot Aşınma Hızı / Tool Wear Rate (TWR), mm ³ /min
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi / Energy Dispersive Spectrometer
EEİ	Elektro Erozyon ile İşleme / Electrical Discharge Machining (EDM)
EİT	Elektro Erozyon ile İşleme Tekniği
EETT	Elektro Erozyonla ile Taşlama Teknolojisi
HAZ	Isıdan Etkilenen Bölge / Heat Affected Zone
İİH	İşparçası İşleme Hızı / Material Removal Rate (MRR), mm ³ /min
MAM	Malzeme Aşındırma Mekanizması

Kısaltmalar	Açıklama
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata / Mean Absolute Percentage Error
MMK	Metal Matrisli Kompozit / Metal Matrix Composite MMC)
RMS	Kareler Ortalamasının Karekökü / Root Mean Square
SCG	Scaled Conjugate Gradient
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu / Scanning Electron Microscopy
SiC_p	Silisyum karbür parçacık
YP	Yüzey Pürüzlülüğü / Surface Roughness (SR), μm
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, oluşan yeni ihtiyaçlar ve şartlar daha üstün özelliklere sahip malzeme kullanımını zorunlu kılmaktadır. Çoğu zaman yeterli performansa sahip malzeme gelişimi sağlanamaması veya geliştirilen malzemenin uygun şartlarda işlenememesi gibi çeşitli nedenlerle arzu edilen hedefe ulaşılamamaktadır. Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin üretimi ile ilgili yoğun çalışmalar sonucu çok farklı yapılarda kompozit malzemelerin geliştirilmesi mümkün olmakla beraber, bu malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesinde karşılaşılan güçlükler nedeniyle kullanımı yeterince yaygınlaşamamıştır.

Yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluk ve ısıl genleşme katsayısı gibi üstün özellikleri ile MMK malzemelerin kullanımı hızla yaygınlaşmakta; özellikle otomotiv endüstrisi ile uzay ve havacılık sektöründe ağırlığın azaltılması ihtiyacı, alüminyum metal matrisli kompozit malzemelerin tercih edilmesine neden olmaktadır [1-3]. MMK malzemelerin otomotiv sektörü başta olmak üzere, oldukça fazla endüstriyel uygulama alanı bulunmaktadır. Ancak, üretilen parçaların geleneksel yöntemler ile işlenmesinde, aşırı takım aşınması ve düşük yüzey kalitesinin varlığı yeterince ekonomik ve hızlı üretime geçişi engellemektedir. Bazı MMK malzemelerin seramik takviye içermesi ve seramik parçacıkların kesici takımları hızlı şekilde aşındırması ve takım-malzeme sıvanmasına yol açması dolayısıyla, yüzey kalitesi ile ölçü tamlığının da bozulmasına neden olmaktadır [3]. Reel sektörde karşılaşılan ve tüm işleme operasyonlarına yansıyan işleme problemlerinin, elektro erozyon ile işleme (EEİ), su jeti, lazer ve plazma ile kesme gibi tekniklerle çözülmeye çalışıldığı görülmektedir [4].

MMK'lerin geleneksel imal usulleri ile işlenmesindeki yüksek maliyet ve uzun zaman kaybı, bu malzemelerin geleneksel olmayan imal usulleri ile işlenebilmesinde yaygın araştırmalara yol açmıştır. Geleneksel olmayan imal usulleri arasında önemli bir yer tutan elektro erozyon ile işleme tekniği (EEİT), elektriksel kıvılcımla aşındırma teknolojisinin özel bir uygulaması olmuştur. MMK'lerin EEİ yöntemiyle işlenmesinde, işleme parametreleriyle elde edilen yüzeyin kalitesi ve işlemenin

ekonomikliği arasında günümüze kadar uzanan çalışmalar yaygın olarak yer almıştır [5-6].

EEİ teknolojisinde büyük ilerlemeler olmuşsa da, yöntemle ilgili bazı problemler hala güncelliğini korumaktadır. Elektrotun şeklindeki değişimlerin ve kenarlarda oluşan kıvılcımların, iş parçasının oyularak işlenmesini doğrudan etkilemekte olduğu ifade edilebilir. Bunun yanında, işlenen parça yüzeyinde, belirtilen kısımların performansını etkileyebilecek kadar büyük değişimler de olabilmektedir.

Bazı araştırmacılar, yüksek boşalım akımının, işlenen yüzeyde büyük bir yarıçapa sahip bir krater oluşturulabildiğini, aynı zamanda, hızlı ısınma ve soğuma sonucunda oluşan beyaz tabakanın, yüksek yüzey gerilimlerine, aşındırılmış yüzeylerin kompozisyonundaki değişmelere ve yüzey çatlamlarına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Fazla derin olmayan çatlaklar ve beyaz tabakaların iyi bir kesim ve parlatma aşamalarından sonra yok edilebildiği bilinmektedir. Araştırmada, madde hareketlerinden sonra, kimyasal kompozisyon, sertlik ve yeniden katılaşmış tabakanın analitik bir modelle hesaplanmasının mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Hatta deneysel incelemelerin bile, temel düzeyde araştırmalarla sınırlı olduğu vurgulanmaktadır [7].

Bu çalışmada, farklı kuruluşlar tarafından üretilen beş farklı işparçası malzemesi (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 Al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH₂O,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzeme*), belirlenen işleme parametrelerine bağlı kalarak ve parafinol serisi 5 nolu dielektrik sıvısı kullanılarak, EEİT ile işlenmiştir. Deneylerde kullanılan malzemeler, 6, 9 ve 12,5 amperlik boşalım akım (I_d) değerleri aralıklarında işlenmiştir. Her bir I_d değeri için, 50, 100 ve 200 μ s'lik vurum süresi (t_s) ayrı ayrı dikkate alınmıştır.

Ülkemizde bu kapsamda yapılan ilk çalışmayla, MMK malzemelerin işlenebilirliği ve EEİ yönteminin bu malzemelerin işlenmesindeki rolünü belirlemek amaçlanmıştır. İmalat sektörüne, incelenen MMK'lerin işlenebilirlik verilerinin

aktarılması ve işleme parametrelerinin optimizasyonu ile sağlanacak farklı dokulardaki MMK'ler için güvenilir bir kaynak, deneysel bulgulara dayanılarak hazırlanmıştır. İşlem parametrelerine bağlı olarak, işlem performans ölçümleri yapılmıştır. Her bir deney setinin analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan bu analizde, her malzeme çifti için yapay sinir ağları ile işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve bağlı aşınma (BA)'nın analitik ifadeleri elde edilmiştir. Özet olarak bu çalışmayla, MMK malzemelerin işlenebilirliği ve EEİ yönteminin bu malzemelerin işlenmesindeki rolünü belirlemek amaçlanmıştır.

Bunun yanında, kıvılcıma maruz kalmış işparçası yüzeylerinin metalürjik ölçümleri Al427915 alüminyum/bakır MMK malzeme için tüm numunelere, diğer malzemeler için ise sadece 9 A'lık boşalım akımında ve 100 μ s'lik vurum süresi değerlerinde elde edilen numunelere uygulanmıştır. Deneysel çalışma şartları ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 4. Deneysel Yöntem ve Çalışmalar kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Bu bölümde özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin EEİ ile işlenmesinde çeşitli özelliklerini inceleyen çalışmalar ve işleme parametrelerinin, performans çıktıları üzerindeki etkileri gözden geçirilmiştir. Doktora çalışması kapsamında kalmayan diğer MMK malzemelerle ilgili çalışmalar dikkate alınmamıştır.

MMK malzemeler, uzay ve havacılıkta, savunma ve otomobil endüstrisinde giderek artan bir değere sahiptir. Bu malzemeler, otomobillerin fren rotorlarında ve içten yanmalı motorların yanma odası kaplamalarında değişik şekillerde değerlendirilmektedir. Bu malzemelerin bu tür uygulamalarda tercih edilmesinin nedeni hafifliği ve geleneksel malzemelere göre ısıya ve aşınmaya karşı yüksek direncidir. MMK malzemelerinin üreticiler tarafından kullanılmasını aksatan tek etken, bu malzemelerin işlenme zorluğudur. MMK malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi diğer tür malzemelere oranla çok zordur [1–4, 8]. EEİ, geleneksel olmayan, yeni ve gelişmekte olan değerli bir işleme tekniğidir. EEİ'nin,

takviyelerinin aşırı sert partiküller içeren MMK'leri işlemede iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. EEİ tekniğinin mekanik enerji içermemesi, işparçasının sertlik, mukavemet ve pürüzlülük değerlerinin, işparçası işleme hızına etki etmemesini sağlar [8].

Müler ve Monaghan çalışmalarında, içerisinde sert takviyeli malzemelerin varlığı nedeniyle, işlemede yüksek takım aşınması oluşmasından, geleneksel işleme yöntemleriyle oldukça zor işlenebilen parçacık takviyeli SiC_p MMK malzemeler için geleneksel olmayan EEİ, lazer ve su jeti ile kesme ve işlemeyi incelemiştir [9]. Seramik parçacık takviyeli MMK ile takviyesiz MMK malzemenin işlenmesi analiz edilmiştir. Bu deneysel çalışmada, AA2618/SiC/20_p ve A356/SiC/35_p malzemeleri araştırma için seçilmiştir. MMK malzeme toz metalurji yöntemleriyle ve sıcak-isostatik preslemede üretilmiştir. Deneyler, dalma tip EEİ tezgâhı ile yapılmıştır. Elektrot takımı olarak, 10 mm kalınlığında plaka elektrolitik bakır, ortasından 5 mm delik delinerek kullanılmıştır. İşparçası olarak ise, partikül takviyeli ve 10 mm kalınlığında MMK malzeme ortasından 9 mm çapında delinerek kullanılmıştır. Bu her bir yuvarlak delik, kare şeklindeki elektrotlar kullanılarak kare şeklindeki deliklere dönüştürülmüştür. Bu deneysel çalışmada, geleneksel olmayan yeni yöntemlerin, daha ucuz ve daha uygun yöntem bulmak ve en uygun şartları sağlamak için detaylı olarak incelendiği görülmüştür.

Yan ve arkadaşları, Al₂O₃/6061Al kompozitin işlenebilirliğini incelemek için, bilyeli parlatma yöntemi ile dönel EEİ tekniğinin uygulanabilirliği ve optimizasyonu üzerine çalışmışlardır [10]. İşleme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi, EEİ tekniğinin optimizasyonu için belli değerler olarak kabul edilmiştir. Deneysel sonuçlar, bilyeli parlatma yöntemi ile dönel EEİ'nin Al₂O₃/6061Al kompozitinin işlenmesinde uygulanabilir bir teknik olduğunu göstermiştir. Deneysel çalışmada, Al₂O₃/6061Al kompozitinin işlenmesinde dönel EEİ yönteminin kullanılmasının uygun bir teknik olduğu sonuçlarıyla aktarılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesinin, farklı deney parametrelerine bağlı olarak % 55'ten % 92'ye kadar arttığı ifade edilmiştir. Bunun yanında, hem elektrot takımının dönüş hızının yüksekliğinin hem de % 20 hacim takviyeli Al₂O₃ parçacıkların ZrO₂

küresinin aşınmasını arttırdığı ve daha pürüzlü bir yüzeyin oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesini % 80'e kadar artırdığı vurgulanmıştır.

B. H. Yan, C. C. Wang, W. D. Liu ve F. Y. Huang, disk türü dönel elektrot ile $Al_2O_3/6061Al$ kompozit malzemesinin işleme özelliklerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır [11]. Çalışmada, Al_2O_3 parçacıkları ile takviyelendirilmiş olan 6061Al matrisli, ortalama büyüklüğü 10 μm olan partiküller, % 10'luk hacimsel orana sahip bir MMK malzeme kullanılmıştır. Uygulama için altı bağımsız işleme parametresi seçilerek iki grupta sınıflandırılmıştır. Birinci grupta, elektriksel parametre olarak, polarite, tepe akımı, t_s ve güç kaynağı voltajı; elektriksel olmayan işleme parametresi olarak, elektrodun çevresel hızı ve salınım hızının dikkate alındığı belirlenmiştir. Disk türü dönel elektrot ile yapılan deneysel sonuçlar, köşeli ya da testere elektrotlarla aynı yüzey pürüzlülüğünde, daha fazla talaş kaldırma oranıyla işleme sağlamıştır. Disk türü dönel elektrot ile yapılan işlemede, elektrot aşınma hızının, köşeli ve testere elektrotta nazaran daha fazla olduğu bu çalışmada ortaya konmuştur.

Chien-Cheng Liu ve Jow-Lay Huang, EEİ yönteminde, iletken TiN/Si_3N_4 sıcak preslenmiş kompozitlerin işlenmesi ile mikro yapıları ve iletkenlik ilişkisini araştırmışlardır [12]. EEİ ile işlenmiş yüzeyin yüzey yapısı, yüzey pürüzlülüğü (YP) ve İİH, çalışma voltajı ve ilerleme oranları analiz edilmiştir. TiN/Si_3N_4 'nin geleneksel kesme yöntemleri ile işleme ve güvenilirlik testleri karşılaştırılmıştır. Yüksek çalışma voltajı ve akım şartlarında, TiN ile zenginleştirilmiş iş parçasında yüksek işleme hızı elde edilmesini sağlamıştır. EEİ ile işlenmiş ve geleneksel olarak parlatılmış örnekler karşılaştırılmış ve yapılan çalışma sonucunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile mukavemet ve güvenilirlik TiN/Si_3N_4 kompozit malzeme için elde edilmiştir.

K. M. Shu ve G. C. Tu, Elektro erozyon ile işleme ve taşlamanın birleştirildiği bir makinada, metal matris (Cu/SiC_p) elektrot kullanılarak, metal matris yapısını incelemişlerdir [13]. Elektro erozyon ile taşlama teknolojisi (EETT) ile yapılan

işlemede, metal matris elektrot malzemesinin SiC_p parçacık büyüklüğü ve elektrot dönme hızı uygun olarak ayarlandığında, iş parçası işleme hızında normal dalma tipi EEİ'ye göre 3–7 katı daha fazla verim elde edilebildiği görülmüştür. Bu elde edilen sonuçla ilgili olarak, EEİ sonucu kalan tümsekliklerin ve taşlama ile giderilerek işleme verisinin artmasına neden olduğu savunulmuştur. Bunun tersine, uygun olmayan şartlarda eriyik durumundaki malzemenin küreselleşerek katılaşması ve iletken olmayan seramik, taşlama sonucu yukarıda bahsedilen durumun önemini kaybettiği ve daha düşük İİH oluştuğu belirtilmiştir.

R. Karthikeyan ve arkadaşları, İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modellenmesi için, SiC_p'nin hacimsel yüzdesi, boşalım akımı ve vurum süresini dikkate alarak bir çalışma yapmışlardır [14]. Araştırmanın amacı olarak, SiC_p'nin hacimsel yüzdesinin, boşalım akımı ve vurum süresinin, İİH, EAH ve YP üzerine etkisini çalışarak, işleme bölgesinde İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirmek olarak belirlenmiştir.

Araştırmada, işlem parametrelerine göre matematiksel modelleme geliştirmenin amacı, EEİ'deki işlenen MMK malzemelerin optimizasyonunu kolaylaştırmak olarak belirtilmiştir. Çalışmada üretilen genel matematiksel model aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$Y = \varphi (V, I, T) \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte; Y , işleme verilen karşılık değeri, φ , Y 'nin fonksiyonu ve V , I ve T ise sırasıyla işleme gerilimi, boşalım akımı ve vurum süresi olarak işlem değişkenleridir. Bu çalışmada elde edilen matematiksel modeller, literatürde belirtilmiş çoklu regresyon analiz yöntemi kullanılarak formülize edilmiştir (Eş.1.2, Eş.1.3 ve Eş.1.4).

$$\begin{aligned} \text{İİH} = & 41,08 - 0,71(V-13) + 0,11(V-13)^2 - 0,04(T-600) + 3,94(I-7,5) - 1,6 \\ & \times 10^{-3} (T-600)(V-13) + 5 \times 10^{-4} (V-13)^2 (T-600) - 9,16 \\ & \times 10^{-6} (T-600)^2 (V-13) - 5,63 \times 10^{-3} (T-600)(I-7,5) - 5,08 \\ & \times 10^{-4} (I-7,5)^2 (T-600) \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned}
 EAH = & 50,33 + 2,11(V-13) + 2,85(I-7,5) - 0,03(T-600) - 0,26(V-13)^2 \\
 & + 0,09(V-13)(I-7,5) - 0,04(I-7,5)^2 (V-13) \\
 & + 2,72 \times 10^{-4} (V-13)^2 (T-600)
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

$$\begin{aligned}
 YP = & 11,33 + 1,06(V-13) - 0,02(V-13)^2 + 0,48(I-7,5) \\
 & + 1,8 \times 10^{-3} (T-600) + 5,2 \times 10^{-5} (V-13)(T-600) \\
 & - 1,62 \times 10^{-3} (V-13)^2 (I-7,5)
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Araştırmacılar, deneysel gözlemlerin analizi sonucunda İİH, EAH ve YP, MMK’lerde bulunan SiC hacimsel yüzdesiyle, akımla ve vurum süresiyle yüksek etkileşim içinde olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında, İİH, akımdaki artışla beraber artarken, SiC’nin hacimsel yüzdesinin ve vurum süresinin artışlarıyla azalmakta olduğu, EAH’nın ise, akımdaki ve hacimsel yüzdedeki artışla beraber arttığını fakat vurum süresinin artışıyla azaldığını ifade edilmiştir.

M. Ramulu, G. Paul ve J. Patel, tekdüze ve yorulma yük şartları altında, % 15 SiC partikül takviyeli A356 Al kompozitin yüzey kalitesi ve buna bağlı performansı üzerine elektro erozyon ile işlemenin etkilerini araştırmışlardır [15]. İşparçası olarak kullanılan malzemenin işleme öncesi ve EEİ ile işleme sonrası yüzeyi kıyaslanmıştır. Kıyaslama öncesi, işlenen bölge, çok iyi ve dikkatli bir yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Ticari olarak elde edilmiş haldeki malzeme, elektro erozyon ile işlenmiş, yüzey kıvılcımlı materyal üzerinde temel monotonik özelliklere ilişkin EEİ işlem etkilerini tespit etmek üzere gerilim testleri uygulanmıştır. Parlatılmış ve kıvılcımlı materyal üzerinde yüksek döngülü sabit stres genişleme gerilim testleri uygulanmış; yorulma çatlamasının mekanizmalarını araştırmak amacıyla da çatlama ile ilgili analizler yapılmıştır. EEİ kıvılcımının, yüzey sertliğini ciddi şekilde arttırdığı ve yeniden katılaştıran tabakanın altındaki mikro yapılarda hafif bir yüzey altı yumuşamasına sebep olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek işleme hızı neticesinde daha fazla yapısal bozulmaya uğrayan malzemenin yorulma gerilimi, EEİ sayesinde önemli oranda azaltılmıştır.

P. N. Singh ve arkadaşları [16], Al–10% SiC_p kompozitlerinin EEİ sürecinde, işleme parametrelerinden I_d , t_s ve püskürtme basıncının (P_b) optimizasyonu için, İİH, EAH ve YP üzerine çalışma yapmışlardır. Bunun yanında, Ortogonal Array ile Grey ilişki analizi yapılarak sonuçları paylaşmışlardır. Çalışmada optimizasyonun, aşağıdaki basamaklar takip edilerek yapıldığı görülmektedir:

- i. Tüm denemeler için İİH, EAH ve YP deneysel sonuçların normalizasyonu.
- ii. Grey ilişkilendirme performansının ve Grey ilişki katsayısının hesaplanması.
- iii. Grey ilişki katsayısı ortalamasından, Grey ilişki değerinin bulunması.
- iv. Grey ilişki değerinin girdi parametreleri istatistiksel analiz yöntemi (*ANOVA*) ile incelenerek, etkin parametrelerin tespiti.
- v. İşleme parametrelerinin optimum değerlerinin seçimi.
- vi. Bu değerler kullanılarak doğruluğun tespiti ve optimum işleme parametrelerinin ayarlanması.

P. Narender Singh ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışmada ise, %10 SiC_p katkılı Al–MMK malzemenin işlenmesinde I_d , t_s ve püskürtme basıncı (P_b)'nin, İİH, EAH ve YP üzerine etkisini araştırmışlardır [17]. Dielektrik sıvısının jet püskürtme olarak kullanıldığı deneysel çalışmada, İİH'nin büyük boşalım akımı ve vurum süresinde yüzey pürüzlülüğü daha büyük olmuştur. EAH'nın, yüksek I_d kullanıldığında, İİH'den daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek boşalım akımı ve vurum süresinden boyutsal doğruluğun olumsuz etkilendiği belirlenmiştir.

Literatürün Genel Değerlendirmesi

EEİ geleneksel olmayan imal yöntemlerine dahil olmasından itibaren yöntemin temel çalışma prensiplerini anlamak ve işleme performansını iyileştirmek için birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. EEİ tekniği, hızla yaygınlaşmış ve kalıp işleme başta olmak üzere, ilgili sektörde kullanılan temel yöntemlerden biri konumuna gelmiştir. Malzeme çifti arasında mekanik bir temas olmaması, işleme baskısından doğan yüzey olumsuzluklarının yok denecek kadar azalması, tekniğin olumlu yönleri olarak dikkat çekmiştir.

MMK malzemelere, yüksek mukavemet, sertlik ve bükülmezlik vermesi için belirli değerlerde ikincil sert ve aşındırıcı takviye elemanları dahil edilmektedir. Bununla birlikte, geleneksel kesici takımların kullanılmasıyla MMK malzemelerin işlenmesi, şiddetli takım aşınmasına yol açan, aşındırıcı takviye elemanlarının miktarına ve büyüklüğüne göre oldukça güçlenmektedir. Kompozitteki takviye maddesini iyileştirmek, takım aşınmasını hızlandırmaktadır. Geleneksel olmayan işlemelerden EEİ tekniği, MMK malzemeleri işlemeyi titiz yapabilmek için kullanılmaktadır.

Literatür araştırmasından elde edilen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki özet yorumlar elde edilmiştir:

1. Geleneksel olmayan işleme yöntemlerinden biri olan EEİ tekniği, yaygın olarak MMK malzemelerin işleme performansının araştırılmasında tercih edilmektedir.
2. Araştırma materyali olarak çoğunlukla Al matrisli MMK malzemelerin araştırmalarda kullanıldığı görülmektedir.
3. Takviye elemanı olarak SiC seramik partiküllerin hacimce % 2,5 ile % 25 aralığında matris yapı yer aldığı görülmektedir.
4. Seyrekte olsa, Al_2O_3 partikül takviyeli farklı MMK malzemelerinde EEİ yöntemi ile işlenebilirliğinin incelendiği görülmektedir.
5. EEİ yöntemi ile MMK malzemelerin işleme performanslarının araştırılmasında teorik çalışmalardan ziyade deneysel çalışmalara ağırlık verildiği anlaşılmaktadır.
6. Araştırmalarda, girdi parametreleri olarak boşalım akımı, çalışma voltajı, vurum süresi, bekleme süresi, püskürtme yöntemi ve basıncının dikkate alındığı tespit edilmiştir.
7. Araştırmalarda MMK malzemelerin yapısal özellikleri değişimlerinin de deneysel çalışmalarda girdi parametreleri olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu girdi parametrelerinin ise, takviye türü, takviye miktarı, partikül büyüklüğü ve matris kompozisyonu olduğu görülmektedir.
8. Genel olarak, EEİ tekniğinin performans kriterleri olarak dikkate alınan çıktı veya karşı parametrelerinin İİH, EAH, BA, YP olduğu tespit edilenlerdir.

MMK malzemeler yeni geliştirilen malzemeler olarak tanımlandığından, işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalarda hız kazanarak artmaktadır. EEİ'yi etkileyen birçok işleme parametresi bulunmaktadır. EEİ yönteminde önemli performans çıktılarından yani sonuçlarından bazıları, işparçası işleme hızı (İİH, mm³/dak), elektrot aşınma hızı (EAH, mm³/dak) ve bağlı aşınma (BA, %) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüdür (YP, Ra, µm). Bu nedenle, EEİ yöntemini iyileştirerek en büyük işleme hızı, en az elektrot takım aşınması ve pürüzsüz bir yüzey elde etme çabasına dayanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar ve araştırmalar, EEİ'de MMK malzeme işleme sonrası performans çıktılarını baz almış ama element transferini göz önüne almamışlardır.

EEİ tekniğini, bilimin birçok disiplini ile mühendisliğin birçok kolunun teorisini de içerisinde bulunduran karışık bir olay olarak ifade etmek mümkündür. Bu nedenle, işlemin ekonomik amacını sağlayabilmek için, optimum kesme şartlarının oluşturmaya yönelik matematiksel modelleme üzerinde de çalışmaların yoğunlaştığı bilinmektedir [11, 14].

Bu çalışma kapsamında ise;

- (i) Boşalım akımının, vurum süresinin ve işparçası elektriksel iletkenlik değerinin, işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve bağlı aşınma (BA) üzerine etkisi,
- (ii) İşleme bölgesinde İİH, EAH ve BA'nın tahmini sonuçlarını elde etmek için, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile değerlendirilme ve matematiksel modellemenin geliştirilmesi ve
- (iii) Elektrot malzemesinden işparçası malzemesine element transferi ve işparçası malzemesinin mikro yapısının incelenmesi gibi hususlar üzerinde yoğunlaşmıştır.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT (MMK) MALZEME

Son yıllarda otomotiv, elektronik, spor, havacılık ve uzay gibi farklı sektörlerde performansın artırılmasına yönelik olmak üzere, MMK malzemelerin geliştirilmesi için, çeşitli çalışmaların sürdürüldüğü bilinmektedir. Ülkemizde de MMK malzeme üretimi, geliştirilmesi ve işlenmesi ile ilgili olarak çok sayıda çalışma, yapılmaktadır [18-20]. Araştırmalar, metal matrisli kompozit malzemelerin, performansta önemli derecede artış sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

MMK malzemeler, alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif matris malzemelere uzun elyaf, kısa elyaf veya saçak (*whisker*) ve parçacık biçiminde, SiC veya Al_2O_3 gibi seramik malzemelerin takviye elemanları olarak çeşitli yöntemlerle katılmasıyla üretilmektedir [21]. SiC takviyeli MMK malzemeler, seramiklerin yüksek aşınma dayanımı ve metallerin yüksek tokluk ve süneklik özelliklerini bir arada taşımaktadırlar. Bu malzemeler, başlangıçta, havacılık ve savunma endüstrilerinde yüksek performanslı ürünlerin üretilmesinde kullanılmıştır. Son yıllarda maliyetlerin düşürülmesi ile birlikte MMK malzemelerin üretimi ve dolayısıyla ticari anlamda kullanılmaları yaygınlaşmıştır [3]. Çizelge 2.1’de metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları verilmiştir [22]

MMK malzemelerin özelliklerinde, matris malzemesine göre önemli oranda iyileşme görülmüştür. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv sanayinde fren diskleri ve güç aktarma milleri, havacılık sanayinde elektrik teçhizatları için sehpalar, spor sanayinde bisiklet gövdeleri gibi endüstriyel ürünler, parçacık takviyeli MMK malzemelerden üretilerek endüstriyel kullanımları yaygınlaşmıştır [23].

Araştırmacılar, MMK malzemelerin yaygın olarak kullanımının önünde, üretimlerinde karşılaşılan problemler ve üretimleri sonrası kullanıma hazır hale getirmek için talaşlı imalat maliyetlerinin yüksek olmasını engel olarak görmektedirler [24]. MMK malzemelerin talaşlı imalat yöntemiyle işlenmesi esnasında karşılaşılan en önemli problemin, hızlı kesici takım aşınması olduğuna dikkat çekilmiştir [3].

Çizelge 2.1. Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanları [22]

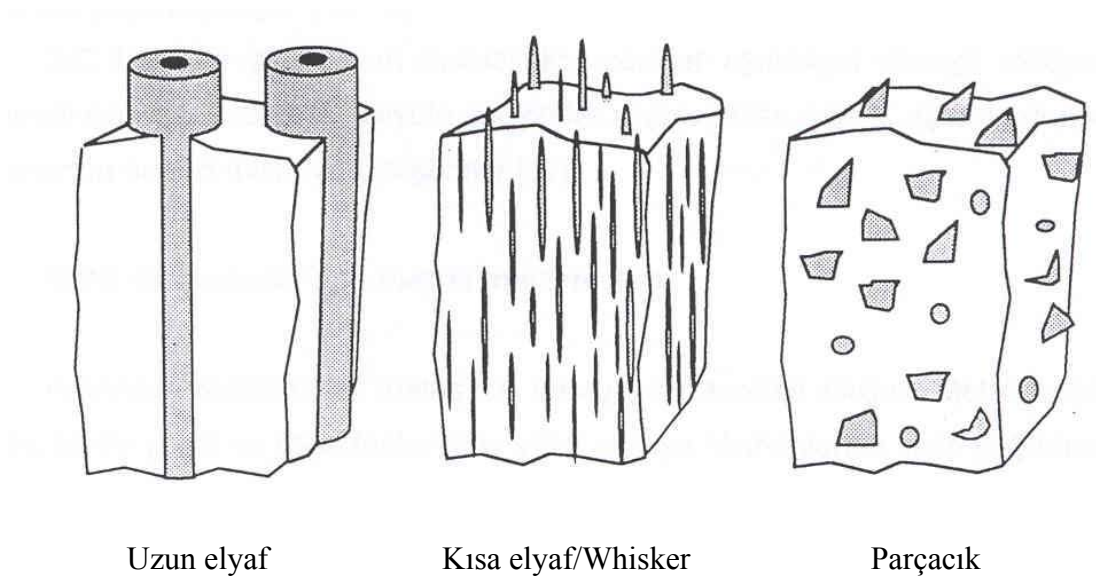
Kullanım Yeri	İstenilen Özellikler	Kompozitler
Uzay Sanayi -Konstrüksiyonlar, antenler	Hafiflik, rijitlik veya direnç	B/Al, B/Mg, C/Mg, Gr/Mg
Uçak Sanayi -Pilonlar -Payandalar, kapılar -Çerçeveler, döşeme kirişleri -Fan ve kompresörler -Türbin kanatları -Helikopter transmisyon parçaları	Hafiflik, rijitlik, ısı direnci Hafiflik, rijitlik, mukavemet Hafiflik, rijitlik, mukavemet Mukavemet, rijitlik, ısı ve çarpma direnci Mukavemet, rijitlik, ısı ve çarpma direnci Hafiflik, rijitlik, mukavemet	B/Al, SiC/Al B/Al, SiC/Al B/Al, SiC/Al, Gr/Al B/Al, SiC/Al, Gr/Al B/Al, SiC/Al, C/Al, süper alaşımlar, Al ₂ O ₃ /Mg, Al ₂ O ₃ /Al, Gr/Al, Gr/Mg
Otomotiv Sanayi -Motor gövdeleri, piston kolları, yaylar	Hafiflik, rijitlik, mukavemet, ısı direnci	SiCw/Al
Elektrik Endüstrisi -Elektrik motorlu fırçaları -Akü plakaları Elektrik kabloları	Elektrik iletkenliği, aşınma direnci Rijitlik, mukavemet, korozyon direnci Elektrik iletkenliği, mukavemet	Gr/Cu Al ₂ O ₃ /Pb, Gr/Pb Gr/Cu
Tıp -Röntgen masaları, protezler, tekerlekli sandalyeler	Hafiflik, rijitlik, mukavemet	B/Al, SiC/Al
Spor Malzemeleri -Tennis raketleri, kayaklar, golf sopaları -Bisiklet ve motosiklet gövdeleri	Hafiflik, rijitlik, mukavemet Hafiflik, rijitlik, mukavemet	B/Al, SiCw/Al, Gr/Al B/Al, SiCw/Al, Gr/Al
Tekstil -Mekikler	Hafiflik, aşınma direnci	B/Al, SiC/Al, Gr/Al

2.1. MMK Malzemelerin Sınıflandırılması

Metal matrisli kompozit malzemeler, ayrı bir mühendislik malzemesi olarak tanımlanabilir. MMK malzemeler, özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin mekanik veya metalurjik olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemeler şeklinde tanımlanmaktadır [25]. Bu tanımdan hareketle, MMK malzemeler öncelikle matris malzemesine göre birbirinden ayrılmaktadır. Matris malzemeleri içerisinde en yaygın kullanılanı alüminyum ve alaşımları olmuştur [3].

MMK malzemeler matris malzemelerine göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozit malzemeler olarak üç gruba ayrılır. Yüksek özgül dayanım, yüksek özgül rijitlik, yüksek tokluk ve yüksek sıcaklıkta iyi mekanik özellik sergilemenin yanında, çoğunlukla iyi aşınma ve sürtünme direncine sahiptirler.

MMK malzemeleri, takviye elemanlarına göre sürekli ve süreksiz takviyeli olarak iki gruba ayrılabilirken, uzun elyaf, kısa elyaf/whisker ve parçacık takviyeli olmak üzere üç grup olarak sınıflandırmak da mümkündür. Şekil 2.1’de farklı takviye elemanlarından oluşan MMK malzemelerin gruplandırılması gösterilmektedir [23].



Şekil 2.1. Farklı takviye elemanına göre MMK malzemesinin gruplandırılmasının şematik gösterilişi [23]

Son yıllarda yapılan çalışmalar, genel amaçlı kullanımlar için, parçacık takviyeli MMK malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. SiC_p takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler, aşınma direnci gerektiren uygulama alanlarında kullanım için büyük bir potansiyele sahiptirler. Parçacıklar, sertlik ve aşınma direncini önemli oranlarda iyileştirmektedir.

2.2. MMK Malzemeler İçin Matris Malzemeleri

Parçacık takviyeli MMK malzemeler, matris ve takviye fazlarından oluşur. Metal matris birleştirici olarak görev yapar ve esas fonksiyonu yükü takviye elemanlarına iletip dağıtmasıdır. Matris malzemesi olarak en yaygın biçimde kullanılan Al, Ti ve Mg'dur. İyi korozyon direnci, düşük yoğunluğu, yüksek ısıl iletkenliği ve nispeten iyi mekanik özelliklere sahip olduğu için, günümüzde yapılan çalışmalar, alüminyum alaşımları üzerinde yoğunlaşmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

2.3. MMK Malzemeler İçin Takviye Elemanları

Yaygın olarak kullanılan takviye elemanları SiC, Al₂O₃, TiB₂, bor ve grafitir. Yapılan araştırmalar, takviye elemanı seçiminde dikkate alınması gereken hususları; elastikiyet modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, kimyasal kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, matris malzemesiyle uyumluluk ve maliyet şeklinde sıralamaktadır [21].

2.4. Parçacık Takviyeli MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin ekonomik ve ticari üretimi için, etkin üretim yöntemleri geliştirmesine yönelik çalışmalar devam etmekle birlikte, bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Üretim yönteminin seçiminde ürün kalitesi ve maliyeti temel faktör olarak görülmektedir. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemler, üretim esnasında metal matrisin sıcaklığına göre gruplandırılabilir. Araştırmacılar üretim yöntemlerini; sıvı hal üretim

yöntemi, katı hal üretim yöntemi ve sıvı-katı hal üretim yöntemi olarak üç kategoriye ayırmaktadırlar [26].

MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemler, bu çalışma kapsamında değerlendirilmediğinden ve daha kapsamlı bilgilere çeşitli kaynaklardan ulaşılabilme kolaylığından dolayı, ayrıntılı anlatıma gidilmemiştir.

2.5. MMK Malzemelerde Dayanım Artırıcı Mekanizmalar

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin, matris alaşımlarına bağlı olarak üstün özellikler sergilediği bilinmektedir. MMK malzemelerin tane boyutu önemli derecede metallerin mekanik özelliklerini etkiler. Büyük tane yapısı genelde düşük dayanım, düşük sertlik ve düşük süneklik demektir. MMK malzeme içerisindeki sert parçacıklar daha küçük boyutlu tanelere sahip bir mikroyapıya neden olur. Bu, MMK malzemelerin dayanım ve sertliğini artırır.

2.6. MMK Malzemelerin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

MMK malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri, yapısal malzemeler olarak kullanılmak için çok önemli olan çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, özetlemek gerekirse, aşağıda gösterilen özelliklerin bir kombinasyonunu içerir [27]:

- Yüksek dayanım
- Yüksek elastiklik modülü
- Yüksek sağlamlık ve darbe özellikleri
- Termal şok veya değişen sıcaklıklara düşük hassasiyet
- Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzey hatalarına düşük hassasiyet
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik

Genellikle sünek, düşük dayanımlı ve düşük elastikiyet modülüne bir matrisle sert, kırılğan, yüksek dayanımlı ve yüksek elastikiyet modüllü seramik parçacıkların

çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesiyle oluşturulan parçacık takviyeli MMK malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde bileşen fazların özellikleriyle karşılaştırıldığında önemli derecede değişiklikler olur. Parçacık takviyeli MMK malzemeler aynı zamanda matris malzemesine göre yüksek elastikiyet modül, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve yüksek sertlik gibi fiziksel özelliklere de sahiptir [28]. Parçacık takviyeli MMK malzemelerde artan parçacık hacim oranıyla akma ve çekme dayanımının arttığı fakat belirli bir orandan sonra artış hızının azaldığı gözlenmiştir [29, 30].

3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PRENSİPLERİ

Elektro erozyon ile işleme tekniği (EEİT), geleneksel olmayan işleme yöntemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan imal usullerinden birisidir. Malzemelerin sertliğine bakılmaksızın, iletken parçaları ısı (*termal*) enerjiden yararlanarak işleme özelliği, EEİ'yi kalıp üretiminde, otomotiv endüstrisinde, uzay ve havacılıkta çok büyük bir kullanım avantajı sağlamaktadır. EEİT'de iş parçasından malzeme (*talaş*) kaldırarak aşındırma, iş parçası malzemesinin ergimesi, buharlaşması ve dışlama çevrimi ile gerçekleşmektedir. İşleme esnasında işparçasından malzeme kaldırılırken aynı zamanda elektrotun da aşındığı gözlenmektedir. Bunun yanında, EEİ sürecinde, malzeme çifti ile yani elektrot takımı ve iş parçası doğrudan temas halinde değildir; bu özellik, çalışma anında işleme süresince mekanik stres ve titreşim gibi problemlerin ortaya çıkmasını önlemektedir. Bu işleme tekniği, çok sert ve kırılgan yapıya sahip, yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelere verimli olarak uygulanmaktadır [31].

EEİ'nin kökleri, İngiliz kimyager Joseph Priestly'nin elektriksel kıvılcımın ya da elektriksel boşalmanın (*deşarjin*) etkilerini keşfettiği 1770'lere uzanmaktadır. Ancak ilk olarak, 1943 yılında Moskova Üniversitesi'nde Lazarenko'lar, elektriksel boşalmanın aşındırıcı ve tahrip edici etkisini bu alanda olumlu olarak kullanmışlardır. Lazarenko'lar; metalin yüzeyindeki buharlaşan malzeme ile zor işlenen metallerin kontrollü işleme yöntemini geliştirmişlerdir, denebilir. Lazarenko'lar, geliştirdikleri EEİ sisteminde RC güç kaynağı kullanmışlar; bu 1950'lerde elektro erozyon ile işlemede yaygın hale gelmiş ve EEİ'de daha sonra, bir gelişim modeli olarak kullanılmıştır [31].

Vakum tüplü EEİ tekniğinin geliştirilmesi ile elektrot-işparçası arasında kıvılcım aralığını otomatik sağlayan (*elektrot ile işparçasını doğrudan temas ettirmeyen*) elektronik devreli servo sistemin geliştirilmesi, EEİ teknolojisinin veriminde çok büyük ilerlemelerin kaydedilmesini sağlamış, 1980'lerde bilgisayarlı sayısal denetimin de EEİ teknolojisine dahil olmasıyla bu süreç hızlanmıştır. EEİ'nin bu şekilde artan özellikleri, büyük ekonomik yararlar ortaya çıkaran ve araştırma

Tek bir elektriksel kıvılcım deşarjının EEİ sürecinde oluşumu Şekil 3.2’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir [32,33]. Voltaj ve akım grafikleri, şekilde detaylı olarak işleme durumuna göre her gösterimin altında verilmiştir. Tüm şekillerde, elektrot takımı (*anot*) üst tarafta koyu renkle gösterilen malzemedir, iş parçası (*katot*) da alt kısımda yer alan ve negatif yüklü parçadır. İşlemede kullanılan dielektrik sıvısı yalıtkan olarak hizmet görmektedir.

İlk önce, Şekil 3.2.a’da gösterildiği üzere elektrot iş parçasına yaklaşır. İki yüzey arasındaki potansiyel fark artar, ortamdaki dielektrik sıvısı çöker ve iyonlar oluşmaya başlar. İki yüzey arasındaki uzaklığın (ortalama 10–40 μm) en düşük olduğu noktada elektriksel alan en yüksektir. Elektriksel kıvılcım bu alanda oluşur. Bu esnada voltajın artmasına rağmen dielektrik sıvısından dolayı hiç bir akım oluşmaz çünkü, dielektrik sıvı elektrot ve işparçasını yalıtmış durumdadır.

Sonra Şekil 3.2.b’de görüldüğü gibi iyonların oluşumu artar, elektriksel alan dielektrik sıvı içerisindeki partiküllerin elektriksel alan içinde bir hat üzerinde asılı kalmasına ve işleme aralığı boyunca bir köprü oluşturmaya neden olur ve elektriksel alanın en güçlü olduğu noktada dielektrik sıvısı yalıtkan özelliğini yavaş yavaş kaybetmeye başlar. Bu olay dielektrik sıvının kırılmasına sebep olur. Voltaj en yüksek değerine ulaşırken akım sıfır değerindedir.

Şekil 3.2.c’de görüldüğü gibi voltajın azalmasıyla akım oluşmaya başlar. Dielektrik sıvının kırılması ile işleme aralığındaki gerilim değeri düşer ve akım değeri operatör tarafından ayarlanmış olan sabit değere kadar yükselir ve elektrot takımı ile iş parçası arasında boşalım (*deşarj*) kanalı oluşmaya başlar.

Şekil 3.2.d’den anlaşılacağı gibi voltaj düşerken akım artmaya devam eder. Isı hızlı bir şekilde yükselir, bunun sonucunda bir miktar anot, katot ve dielektrik sıvı malzeme buharlaşır.

Şekil 3.2.e’de görülen, şiddetli elektro manyetik alanın yol açtığı kırılma iyonlarının etkisiyle buhar ile kaplı deşarj kanalının (*plazma kanalının*) vurum süresi boyunca büyüdüğü ve gelişerek genişlediği gösterilmiştir.

Şekil 3.2.f’de görülen, döngüdeki voltajın iyice sona yaklaştığı grafikdir. Akım ve voltaj sabitleşir. Kanal içindeki ısı ve basınç en yüksek değerlerine varır ve bazı malzemeler ergimiş ya da taşınmıştır. Bir başka ifade ile, plazma kanalının etrafında buhar kabarcıkları oluşur. Bu buhar kabarcıkları ile plazma kanalının etrafındaki dielektrik sıvı, plazma kanalının gelişimini sınırlar ve giren enerjiyi çok küçük bir hacimde yoğunlaştırılmış halde tutar.

Şekil 3.2.g’de, Şekil 3.2.h’de, Şekil 3.2.i’de voltaj ve akım sıfırlandıktan sonra neler olduğu görülmektedir. Deşarj kanalındaki ısı ve basıncın hızlı düşüşü, kanalın kırılmasına sebep olur. Kanalın yok olmasıyla beraber ergimiş iş parçaları da süpürülür. Dielektrik sıvısı, küçük partiküler atıkları bu bölgeden uzaklaştırır ve anot ile katot yüzeyini soğutur. Süpürülmemiş ergimiş malzeme, yüzeyde tekrar katılaşarak yeni ve sert bir tabaka oluşturur. En sonunda elektriksel kıvılcım işini tamamlamıştır ve yeni kıvılcım için ortam hazırdır.

Malzemenin işparçası yüzeyinde eriyip buharlaşma süreci geleneksel işleme süreçlerinden tamamen farklıdır. EEİ’de aşındırılan malzemeler (talaşlar) mekanik olarak oluşturulmaz, Her bir elektriksel deşarjda işparçasından kaldırılan malzeme hacmi diğer bir deyişle İİH değişik oranda olabilmektedir. Biçimlendirilen elektrot takımı, elektriksel kıvılcımla aşındırmanın gerçekleşeceği alanı belirttiği için, EEİ’den sonra oluşan parçanın boyutsal ve geometrik hassasiyeti ile doğruluğu oldukça yüksektir. Sonuçta EEİ, elektrotun işparçası içinde yansıtıldığı üretken bir biçimlendirme süreci olarak belirtilebilir.

3.1.1. EEİ tekniğinin değişimi ve gelişimi

EEİ değişimi, özellikle uzay ve havacılık endüstrisi ile ilgili parçaların üretiminde kullanılan özel malzemelerin ve sert metal alaşımlarının işlenmesi amacıyla reel sektörde oluşan ihtiyaçlardan dolayı gerçekleştirilmektedir. EEİ tekniğinin bilinen iki çeşidi vardır. Bunlar; dalma tip EEİ ile tel EEİ’dir. Dalma tip EEİ’de elektrotun biçimi, işlenecek parçanın tam tersi şeklindedir.

EEİ, yüksek mukavemet özelliğine sahip karmaşık şekil ve profillerdeki malzemeleri keserek ve aşındırarak işleyebildiği için, farklı bir açıdan çok tercih edilen modern bir işleme çeşididir.

Dalma tip EEİ tezgahı, ölçülebilen performans çıktıları, işleme kapasitesi ve diğer yardımcı aksesuarları göz önüne alınarak yapılabilecek sınıflandırma Şekil 3.3’de gösterilmiştir [34].

3.2. EEİ Uygulamaları

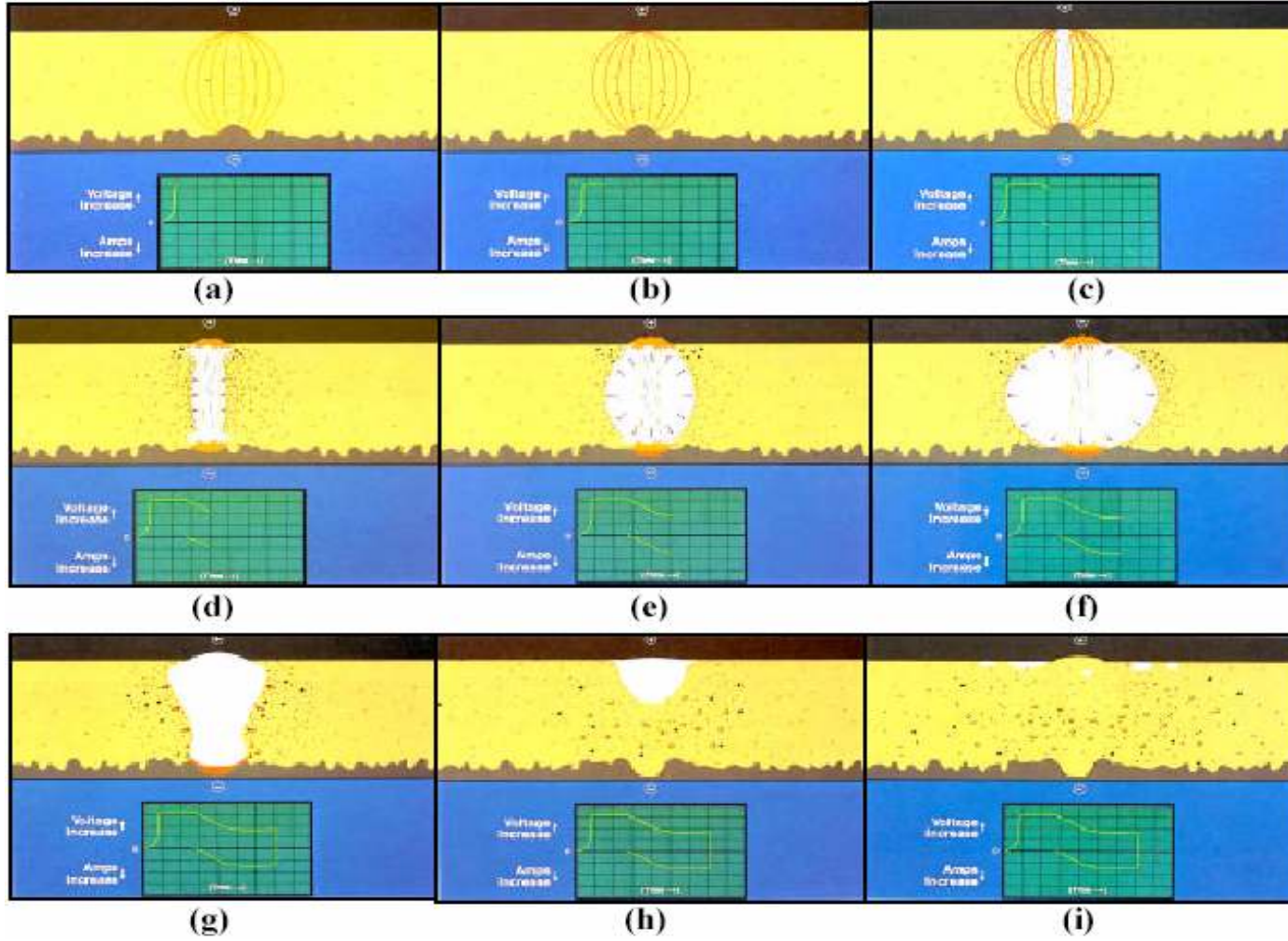
EEİ uygulamalarına, endüstride sıklıkla rastlamak mümkündür. EEİ uygulamalarını, uygulama yerleri açısından ifade etmek daha tutarlı bir yaklaşım olacaktır. Endüstri kullanımı uygulamalarının yaygınlaşması, deneysel çalışmaların yönelimini de etkilemektedir. Yoğunlaştığı alanlar bakımından EEİ uygulamalarını, dört gruba ayırmak mümkündür. Bunlar aşağıda özetlenmiştir [34]:

3.2.1. Isıl işlem uygulanmış malzemelerin işlenmesi

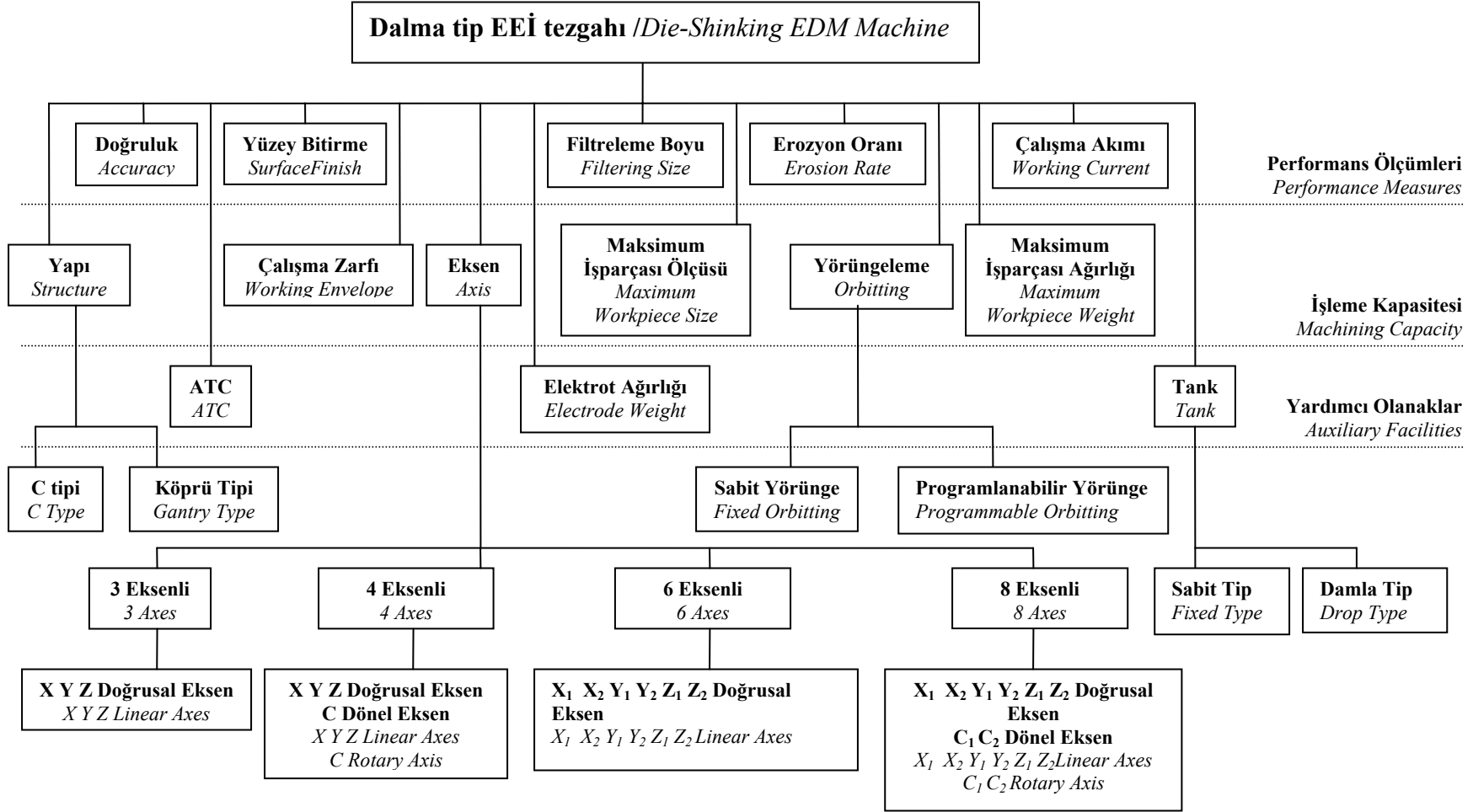
EEİ, ısıl işlem uygulanmış takım çelikleri gibi malzemeleri, geleneksel yöntemlerle işlemenin yerini almıştır. Geleneksel yöntemlerle kesme takımlarıyla işlenmiş malzemenin ortalama sertliği 30–35 HRC’den az ve uygun bir sertlik aralığında olması gerekir [35]. Ancak EEİ, takım çeliklerinin işlenmeden önce gerekli sertliğe erişene kadar işlenmesini sağladığından uygulama sonrasında karşılaşılan boyut değişikliği sıkıntısını ortadan kaldırmaktadır [36]. EEİ, işlem sırasında mekanik gerilim yaratmadığı için, hassas ürünlerin üretiminde çok kullanışlıdır.

3.2.2. Mikro-EEİ uygulamaları

Ürün büyüklüğünü azaltma yolundaki yeni eğilim sayesinde mikro-EEİ, araştırmalar için bir cazibe merkezi haline gelmiştir. Mikro-EEİ sayesinde, sektörde mikro delikler, mikro-nozul ve mikro-oyuk gibi mikro-parça üretmeye yönelik çok sayıda başarılı uygulamalar yapılmaktadır [37].



Şekil 3.2. EEİ tekniğinde tek bir kıvılcım evriminin fiziksel prensibi [32,33]



Şekil 3.3. Dalma tip EEİ tezgahının sınıflandırılması [34]

3.2.3. Seramik türü malzemeleri işleme uygulamaları

Gelişmiş seramiklerin EEİ’de işlenmesi, işleme maliyeti ve özellikleri konusundaki rekabete bağlı olarak, metal kesme ve işleme endüstrisinde yaygın olarak kabul görmüştür. Yalıtkan, doğal-iletken ve iletken (*iletken olmayan elementlerin iletken elementlerle karıştırılmasıyla elde edilir*) olarak sınıflandırdığı seramiklerin çeşitli işlenme uygulamaları vardır.

3.2.4. Kompozit malzemeleri işleme uygulamaları

Son on yılda çeşitli kompozit malzemelerin geliştirilmesiyle EEİ uygulamaları genişlemiştir. Yan ve arkadaşları, metal matris kompozitleri (MMK) üzerinde uygulanan çok sayıda işleme süreçlerini araştırmışlar ve diske benzer elektrotla birlikte kullanılan dönel EEİ’den yararlanan $Al_2O_3/6061Al$ kompozitin işlenmesiyle bunu denemişlerdir [11]. Muller ve Monaghan, parçacık takviyeli metal matris kompozitlerin EEİ’sini, lazer ışını ile işleme ve aşındırıcı su jeti gibi diğer yeni işleme süreçleriyle karşılaştırmışlardır [9]. Bu çalışmada, EEİ’nin parçacık takviyeli metal matris kompozitlerin çok az bir yüzey aşınmasıyla işlemeye uygun olduğu ancak, İİH’nın çok yavaş olduğu gözlenmiştir.

3.3. EEİ Araştırmalarının Temel Alanları

Ho, K. H. ve Newman, S. T., çalışmalarında temel EEİ araştırma alanlarının sınıflandırmasını yapmışlardır. Bu sınıflandırma, ayrıntılı olarak Şekil 3.4’de verilmiştir [34]. Araştırmacılar, EEİ’nin araştırma alanlarını üç başlık altında toplamışlardır. Bunlardan birinci alan, iş parçasının işlenmesi, elektrot takım aşınması ve yüzey kalitesi gibi performans ölçüleriyle ve bunların araştırılmasıyla ilgilidir. İkinci alan, genel olarak, işleme sonrası elde edilen performans ölçülerinin kıvılcım süreçlerinin rastgele yapısını optimize etmek için gerekli, elektriksel olan ve olmayan, değişkenleri içeren işlem parametrelerinin etkilerini tanımlayan araştırmalarla ilgilidir. Araştırmacılar, son olarak da elektrotların tasarımı ve üretimi ile ilgili hususları, araştırmaların kapsamı içine almışlardır.

3.3.1. EEİ performans ölçümleri

Çalışmaların büyük bir bölümü EEİ performans ölçümlerinin verimini arttırmaya, İİH'nı yükseltmeye, EAH'nı azaltmaya ve çok iyi yüzey kalitesine erişmeye ağırlık vermiştir. Çalışmalarda, her performans ölçümü üzerinde durularak, bunların daha iyi hale getirilmesine yönelik yöntemler ele alınmıştır.

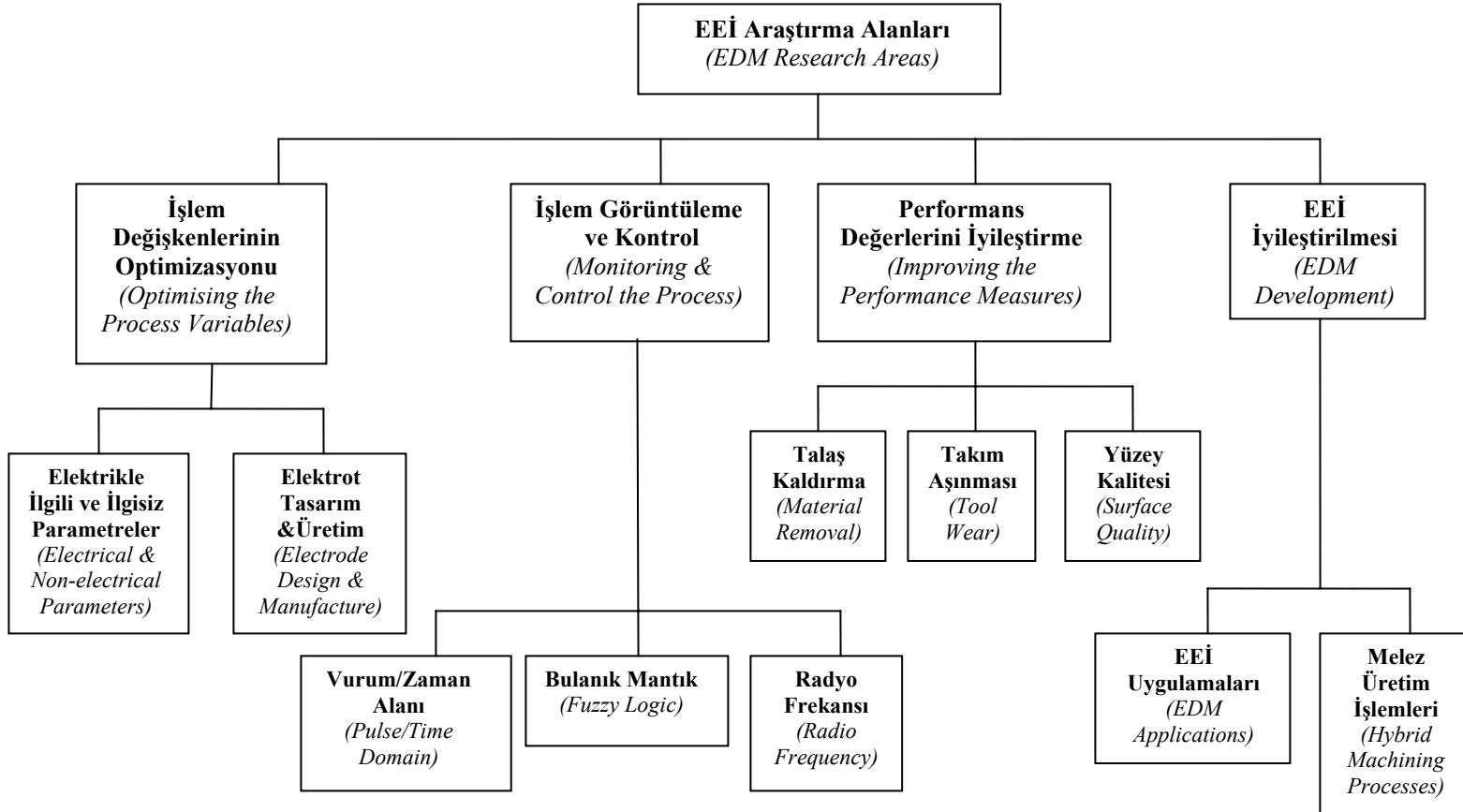
İş parçası işleme mekanizması

Araştırmacılar, malzeme aşındırma mekanizmasını (MAM), işparçası ve elektrot takımı arasındaki malzeme elementleri hareketi olarak açıklamaktadır. Soni ve Chakraverti, elementin elektrottan işparçasına ya da tersi yönde büyük oranlarda hareket ettiğini göstermiştir [7]. Bu elementler katı, sıvı ya da gaz halinde taşınmış ya da katı, eriyik ya da gaz fazı tepkimelerde bulunarak yüzey alaşımı haline gelmişlerdir [38]. Aşınmış elektrot ve işparçası element türleri dielektrik sıvısının ayrılmış parçalarıyla birlikte, tek bir kıvılcımın boşalması esnasında üç fazı olan ergime, boşalım ve dışlama çevrimi ile ilişkili olarak MAM'nı anlamlı bir biçimde etkilemektedir [39]. Buna ek olarak, elektriksel kıvılcımın polaritesini tersine çevirerek işparçası yüzeyinde önemli bir elektrot malzeme çökeltisi miktarının oluşmasıyla malzeme aşınma kavramı değiştirilmektedir [40].

MAM'nin diğer açıklamaları farklı araştırmacılar tarafından da yapılmıştır. Singh ve Ghosh ile Gadalla ve Tsai, katot elektrotta aktif olan elektrostatik kuvvetlerin ve gerilim dağılımının kısa vurum sürelerinde iş parçası aşınmasında önemli bir nedeni olduğunu ortaya koymuşlardır [41, 42]. Ancak Lee ve Lau, ısıl soyulmanın (*thermal spalling*) normal erime ve buharlaşma başlamadan, ani ısı kademeleri oluşmasına yol açan fiziksel ve mekanik özelliklere bağlı olarak, kompozit seramiklerin kıvılcım sırasında MAM'na katkı yaptığını savunmuşlardır [43].

Elektrot aşınma hızı veya süreci

Elektrot aşınma hızı veya süreci; elektrot ve işparçası, EEİ'de elektrot setinin bir



Şekil 3.4. Temel EEİ araştırma alanlarının sınıflandırılması [34].

parçası olarak görüldüğünden, İİH ile benzerlik gösterir. Mohri ve arkadaşları, elektrot aşınmasının kıvılcım süresince hidrokarbon dielektriğinden elektrot yüzeyine karbon çökmesinden etkilendiğini savunmuştur [44]. Elektrot kenarındaki hızlı aşınmanın da elektrotun zor erişilen yerlerinde karbon çökmesinin zor olmasından ötürü olduğunu savunmuşlardır. Marafona ve Wyles ise, normal EEİ şartlarından önceki işleme parametreleri ortamının değiştirilmesiyle, elektrot yüzeyinde aşınmayı engelleyen bir karbon tabakası tespit etmişlerdir [45]. Karbon engelleme katmanının kalınlığı EAH üzerinde önemli bir ilerleme sağlamışsa da, İİH üzerindeki etkisi az olmuştur. Mohri ve arkadaşları, başka bir çalışmalarında, işleme hızı artışı gerektiren uygulamalarda işparçası üzerine elektrot malzemesini aşıl原因arak elektrot aşınmasını arttırmak üzere büyük bir boşalım akımı vermişlerdir [46].

Yüzey kalitesinin analizi ve iyileştirilmesi

Elektro erozyon ile işlenmiş yüzey, beyaz tabaka/yeniden katılaşmış tabaka, ısıl etkilinmiş bölge (*Heat Affected Zone-HAZ*) ve etkilenmemiş ana metal malzemeyi kapsayan üç farklı tabakadan oluşmaktadır [47, 48]. Lim ve arkadaşları [49], EEİ ile işlenmiş yüzeyin metalürjisinin yeniden gözden geçirilmesini sağlamışlardır, bu da boşalım (*deşarj*) kesilmesi ve bunu izleyen faz transformasyonundan sonra gerçekleşen erimiş metalin katılaşma davranışına bağlıdır. İş yüzeyinde oluşan yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı ve elektrotun ısıl hasar düzeyi, kıvılcım sırasında plazma kanalının büyümesi incelenerek belirlenebilmektedir [50].

Beyaz tabaka çevre etkilerine maruz kalana kadar iş parçasının yüzey özellikleri üzerinde fazlasıyla etkilidir. Araştırmacılar, EEİ ile işlenmiş yüzey üzerindeki mikro çatlakların varlığına neden olarak, yüksek sıcaklık değişiminin sebep olduğu yüksek gerilim ve artık gerilimleri keşfetmiştir [51]. Boşalım enerjisinin yan etkisi de ayrıca işin yorulma direnci konusunda iç görü sağlamıştır; bu da tekrar katılaşmış tabaka içindeki çoklu yüzey bozukluklarından kaynaklanmaktadır [52].

Bunun yanı sıra EEİ ile işlenmiş yüzey nispeten daha yüksek bir mikro-sertliğe sahiptir, bu da beyaz tabakada demir karbitleri oluşturan iş parçası yüzeyine yağ

dielektriklerinden karbon göçü ile açıklanabilir [53]. Karpitlerin konsantrasyonu, gerek iş parçası üzerinde yüzey tabakası, gerekse düzgün atık tozu olsun, vurum biçimi, aralık ve dielektrik sıcaklığı gibi diğer işleme parametreleriyle birlikte uygulanan akımın frekansı ve kutuplamasına bağlıdır [54].

3.3.2. EEİ işlem (süreç) parametreleri ve etkileri

Elektriksel ve elektriksel olmayan parametreler gibi işlem (süreç) parametrelerinin çeşitli performans ölçümleri üzerindeki etkilerine, yapılan deneysel çalışmalarda yer verilmektedir.

Elektriksel parametrelerin etkileri

EEİ sürecinin doğal ısı yapısı, elektriksel parametrelerin bireysel performans ölçümleri üzerindeki tüm etkilerinin deneysel açıklamasının yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu performans ölçümleri üzerinde, çeşitli elektriksel parametrelerin optimizasyon, izleme ve kontrol alanlarında yapılan araştırmalar söz konusudur.

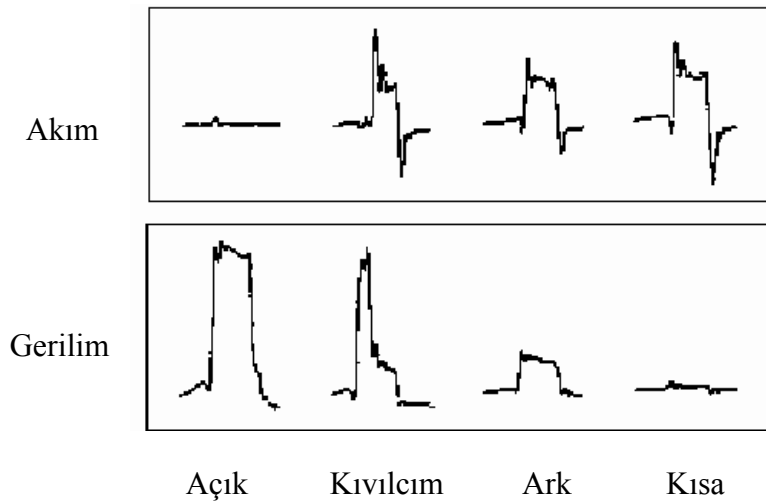
İşleme parametrelerinin optimizasyonu

Geleneksel olarak, en çok tercih edilen işlem parametrelerinin seçimi, deneyime ya da EEİ tezgâhlarının el kitabı yönergelerine bağlı olarak belirlenmektedir. Oysa bunların her ikisine bağlı yapılan uygulamalarda, tutarsız işleme performans ölçümlerine rastlanmaktadır. Ancak, günümüzde parametrelerin optimizasyonu, istenen işleme özelliklerine ulaşma amacına bağlı olarak tercih edilen işlem değişkenlerinin etkilerinin belirlenmesine yönelik süreç analizine dayanmaktadır. Lin ve arkadaşları, EEİ sürecinin işlem parametreleri ile çoklu performans ölçümleri arasındaki karmaşık ilişkilerin çözümüne yönelik olarak *Grey* ilişkisel analizi benimsemişlerdir [55].

Diğer çalışmalarda ise, ideal EEİ süreçlerinin analizi ve tasarlanmasına yönelik olarak

Taguchi yaklaşımı benimsenmiştir. Marafona ve Wykes [45], Taguchi yöntemini normal kıvılcım sürecinden önce elektroda yüksek karbon içeriği ekleyerek EAH'nı arttırmak amacıyla kullanmışlardır. Lin ve arkadaşları, çeşitli performans ölçümlerini göz önünde bulundurarak işleme parametrelerinin optimizasyonu için bunu bulanık mantık (*fuzzy logic*) ile desteklemişlerdir [56]. Tzeng ve Chen ise, işleme değişkenlerini çıktı tepkilerinin dinamik bir dağılımını sağlayan sinyal, kontrol ve ses faktörleri şeklinde sınıflandırmak üzere dinamik sinyalden-sese (S/N) oranından yararlanmak suretiyle yüksek hızlı EEİ sürecini optimize etmişlerdir [57].

EEİ süreçlerinin gerçek zamandaki izleme ve kontrolleri çoğu zaman farklı durumların belirlenmesine dayalıdır. EEİ durumları açık, kıvılcım, ark ve kısa durumlar şeklinde ateşleme ve gecikme süresine bağlı olarak sınıflandırılabilir. Bu durumların, iş parçasının İİH, YP ya da hassasiyeti üzerinde doğrudan etkileri bulunur [58]. EEİ durumlarının sınıflandırması Şekil 3.5'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir [34].



Şekil 3.5. EEİ'de oluşan durumların ayrıntılı olarak gösterimi [34]

Elektriksel olmayan parametrelerin etkileri

Elektriksel parametrelerin yanı sıra işparçası ve elektrotun dönel hareketiyle birlikte

dielektrik sıvının püskürtülmesi gibi elektriksel olmayan parametreler de, optimal performans ölçümlerinin verilmesinde büyük rol oynamaktadır. Araştırmacılar, elektriksel olmayan parametrelerin çeşitli performans ölçümleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bunlar:

Dielektrik sıvının püskürtülme yöntemi

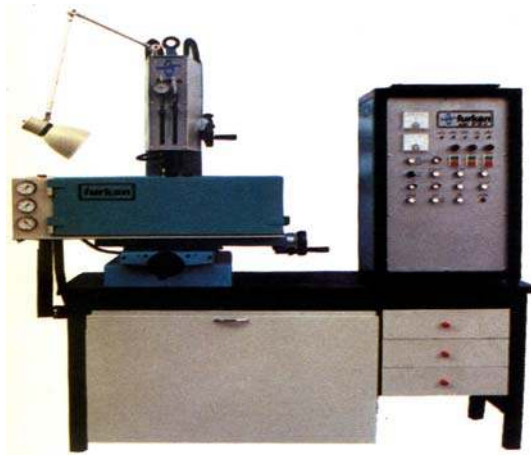
Dielektriğin kıvılcım süreci boyunca püskürtülmesi, EEİ performans ölçümleri üzerinde ters etki yapar. Ön işleme sırasında püskürtme, İİH ve EAH'nı, bitirme işleminde ise YP'yi etkilediği bilinmektedir. Püskürtme hızı, aynı zamanda çatlak yoğunluğunu ve yeniden katılacak katmanı etkiler, bu da optimal püskürtme hızının elde edilmesiyle en aza indirgenebilir [59]. Bunun yanı sıra, dielektrik sıvının farklı özellikleri de atık malzemenin işleme aralığından püskürtülerek uzaklaştırılmasında hayati bir rol oynar. Bunun yanında, İİH ve EAH, dielektrik sıvının kırılma direncine, iletkenliğine, viskozitesine, yanma noktası ile sağlık ve güvenlik faktörüne dayanır. Sonuçta, işparçası yüzeyinde herhangi bir metal karpit oluşmaksızın yüksek İİH ve düşük EAH elde etmek mümkün olabilir.

Benedict, sabit basınç altında uygulanan en yaygın püskürtme yöntemlerini beş ana sınıfa ayırmıştır [37]. Dielektrik sıvı, elektrot boyunca emme (*vakum*), titreşim ya da püskürtme yoluyla uygulanabilir. Düzgün atık konsantrasyonu dağılımı sağlamaya yönelik olmak üzere kıvılcım aralığı boyunca süpürme etkisi yaratan nozul'la dinamik püskürtme de son zamanlarda uygulanmaktadır. Püskürtme durumunun iyileştirilmesine yönelik olmak üzere ise, işparçası ile elektrot arasında bağıl hareket sağlanmaktadır. Bu, işin bir tarafından dielektrik sıvısının girip diğer tarafından çıkmasıyla, yanal aralıkta elektrotun dairesel yörünge gibi hareketi sağlanarak yapılabilmektedir.

4. DENEYSEL YÖNTEM VE ÇALIŞMALAR

4.1. Elektro Erozyon İle İşleme Tezgâhı

Deneysel çalışmada, MAKİM Makine İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti, (*Furkan Mühendislik*) firması tarafından üretilen servo kontrollü “EDM M 25 A model” elektro erozyon ile işleme tezgâhı (EEİT) kullanılmıştır (Resim 4.1). EDM M 25 A model tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir. İşlenecek numunelerin farklı ölçülerde olması, modüler bir bağlama donanımının tasarımı ve üretimini gerekli kılmıştır. Pirinç malzemeden üretilen bağlama donanımı, Resim 4.2’de gösterilmiştir.



Resim 4.1 “EDM M 25 A model” EEİ Tezgahı

Çizelge 4.1. “EDM M 25 A model” tezgâhın bazı teknik özellikleri

Jeneratör	
Güç (220 V, 50 Hz, 3f)	3 KVA
Boşalım Akımı Kademeleri	1,5-3-6-9-12,5-25 A
Vurum (<i>Ark</i>) Süresi Kademeleri	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Bekleme Süresi Kademeleri	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Tezgâh Gövdesi	
Tabla Hareket Hassasiyeti (X-Y)	0,02 mm
Z - Ekseni Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Ekseni Hareket Hassasiyeti	0,01 mm
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Pompa Kapasitesi	50 lt/dak.



(a)

(b)

Resim 4.2. Malzeme çifti (*elektrot ve işparçası*) bağlama donanımı

(a) Malzeme çifti bağlama detayları

(b) Malzeme çifti bağlama aparatları

Deneysel çalışma için Resim 4.3’de gösterilen dielektrik sıvı uygulama adaptörü geliştirilmiştir. Dielektrik sıvısının temizleme etkinliği ve önemi göz önüne alınarak, dielektrik uygulama şeklinin püskürtme tipi olması kararlaştırılmıştır. Uygulama için elektrot takımının merkezinden boydan boya 5 mm çapında delik delinmiştir. İşparçası temininde karşılaşılan güçlüklerden dolayı, yanal püskürtme gibi ikinci bir püskürtme tipi uygulaması yapılamamıştır. Ortamdaki atıkların uzaklaştırılması, elektrotun aşağı/yukarı hareketi anında püskürtme ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.3. Dielektrik sıvı uygulama adaptörü görünüşü

4.2. Dielektrik Sıvısı

Deneylerde dielektrik olarak Promar Endüstriyel Kimyasallar San. ve Dış. Tic. Ltd. Şti.’nin ürettiği Parafinol serisi 5 nolu elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. Deneysel

çalışmada tercih edilen dielektrik sıvısına ait teknik özelliklerle ilgili ayrıntılı bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Parafinol serisi 5 nolu elektro erozyon sıvısının özellikleri

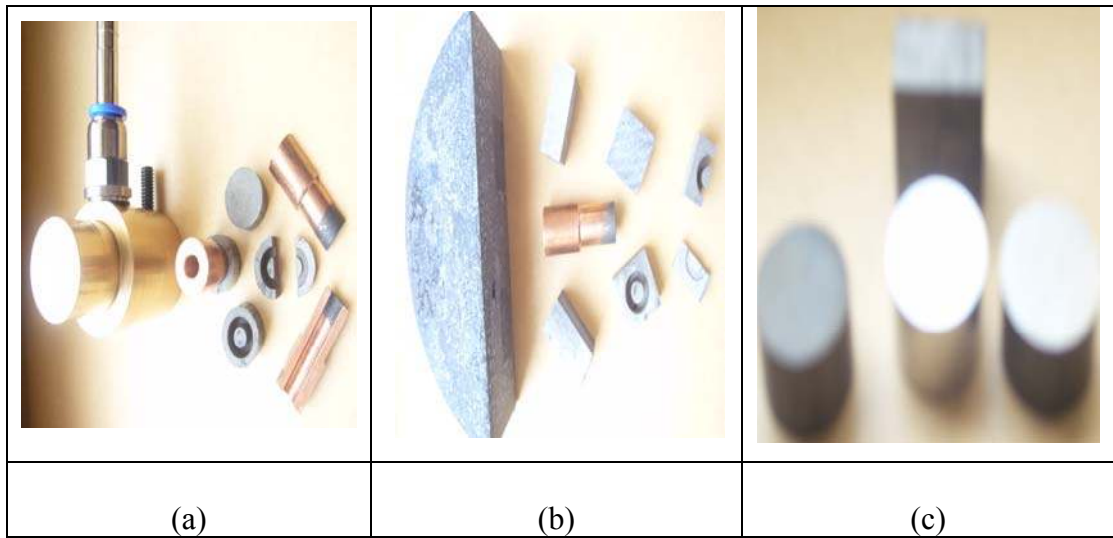
Özellik	Parafinol 5
İçerik	Parafinik yapıdaki hidrokarbonların sinerjik karışımı ve özel inhibitör ve katkılardan oluşmuştur. Aromatik madde içermemektedir.
Renk	Berrak (saydam)
Koku	Kokusuz
Ph	Nötr
Viskozite (40 °C)	3,5-5 cst
Yoğunluk (20 °C)	0,81-0,83 g/l
Parlama noktası	125 °C

4.3. İşparçası ve Elektrot Takımı Malzemesi

Deneyisel çalışma kapsamında incelenen malzemelerin, Çizelge 4.3 - Çizelge 4.7’de fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu çalışmada, üç farklı kompozit malzeme deney numunesi olarak kullanılmıştır. MMK malzemenin ilki ticari olarak Goodfellow tarafından 15 mm çapında silindirik çubuk olarak üretilen AL427915 Al/Cu MMK malzemedir. İkincisi, pres döküm yöntemiyle üretilmiş AE109 kodlu alüminyum esaslı MMK malzemedir. Üçüncüsü toz metalürjisi yöntemi ile preslenerek ve sonra sinterlenerek ekstrüzyon ile üretilen AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesidir. Diğer taraftan, metal matrisli kompozit malzemelerin işlenmesi sürecinde elde edilen çıktılarla karşılaştırma yapabilmek için ETIAL 20 kodlu ticari alüminyum malzeme ile bir soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği olarak ifade edilen (1.2210 115CrV3) malzeme de aynı şartlarda işlenmek üzere, çalışma kapsamına dahil edilmiştir.

Deneylerde işparçası olarak kullanılan AL427915 kodlu malzeme 10x15 mm, AE109 kodlu Al-MMK malzemesi 15x15x10 mm ve AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesi 20x20x4 ölçülerinde hazırlanmıştır. Resim 4.4’de fotoğrafik olarak gösterildiği gibi numuneler, KALIPSAN Torna Tesviye Metal Kalıp firmasının bu araştırmaya

sağladığı imkanlarla, özel aparatlar kullanılarak MAKINO MGW-J1 marka tel EEİ tezgahında kesilerek elde edilmiştir. Ayrıca ETIAL 20 kodlu ticari alüminyum malzeme 10x15 mm ve BÖHLER'in ürettiği ve pazarladığı 1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme 10x15 mm ölçülerinde, aynı firmanın CNC torna tezgâhında işlenerek deneysel çalışma için hazırlanmıştır. Bütün işlemlerle, boyutsal doğruluk ve hassasiyet göz önüne alınmıştır.



Resim 4.4. Deney numunelerinin fotoğraflık görünümü a) AL427915 Al/Cu MMK malzeme b) AE109 kodlu MMK malzeme c) Karma işparçası deney malzeme örnekleri

Çizelge 4.3. AL427915 Al/Cu MMK malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi

Markası	DIN Normu	Elemanlar %				
		Al	SiC	Cu	Mg	Mn
AL427915 Al/Cu MMK malzeme	-	77.9	7.8	3.3	1.2	0.4
		Ticari olarak Goodfellow Cambridge Limited firmasından temin edilmiştir.				
Yoğunluk, ρ, (20 °C)		3,52 g/cm³				
Elektriksel iletkenlik (20 °C)		0,0860 mm / Ω mm²				

Çizelge 4.7. 1.2210 115CrV3 malzemenin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi

Markası	DIN Normu	Alaşım Elemanları %							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
Böhler K510 (Cıva Çeliği)	1.2210	1.18	0.25	0.30	0.7	-	-	0.10	-
	115CrV3	Ticari olarak cıva çeliği adı ile bilinen, Cr ve C karışımı soğuk iş takım çeliğidir. Pim, zımba, matkap ve rayba vs. kesici takım imalatında kullanılır.							
Yoğunluk, ρ, (20 °C)		7,919 (g/cm³)							
Elektriksel iletkenlik (20 °C)		0,0876 mm / Ω mm²							

Deneylerde elektrot takımı olarak, Çizelge 4.8’de fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi verilmiş olan silindirik elektrolitik bakır kullanılmıştır. Elektrotlar, KAL-TES Makine San.ve Tic. Ltd. firmasının bu araştırmaya sağladığı imkânlarla, FOCUS Model CNC torna tezgâhında işlenerek hazırlanmıştır (Resim 4.5). Tornalama işlemi, boyutsal hassasiyet göz önüne alınarak yapılmıştır. Aynı takım tezgâhında dielektrik sıvı uygulamaları için elektrotun merkezine boydan boya 5 mm’lik delik delinmiştir. Deneysel işlem sonrası, daha önce belirtilen KALIPSAN firmasının üretim atölyelerinde, özel aparatlar kullanılarak MAKINO MGW-J1



Resim 4.5. FOCUS Model CNC torna tezgâhında işlenerek hazırlanan elektrot takımı

marka tel EEİ tezgâhında elektrot-işparçası setleri işleme eksenleri sabitlenmiş, merkezinden kesilerek elektrot takımının geometrik incelemesine hazır hale getirilmiştir. Tel EEİ tezgâhında kesilmiş AL427915 Al/Cu MMK malzeme ile elektrolitik bakır elektrot malzeme çifti (*elektrot - işparçası*) örnekleri Resim 4.6'da verilmiştir.



Resim 4.6. Tel EEİ tezgâhında kesilmiş malzeme çifti (*elektrot-iş parçası*) örnekleri

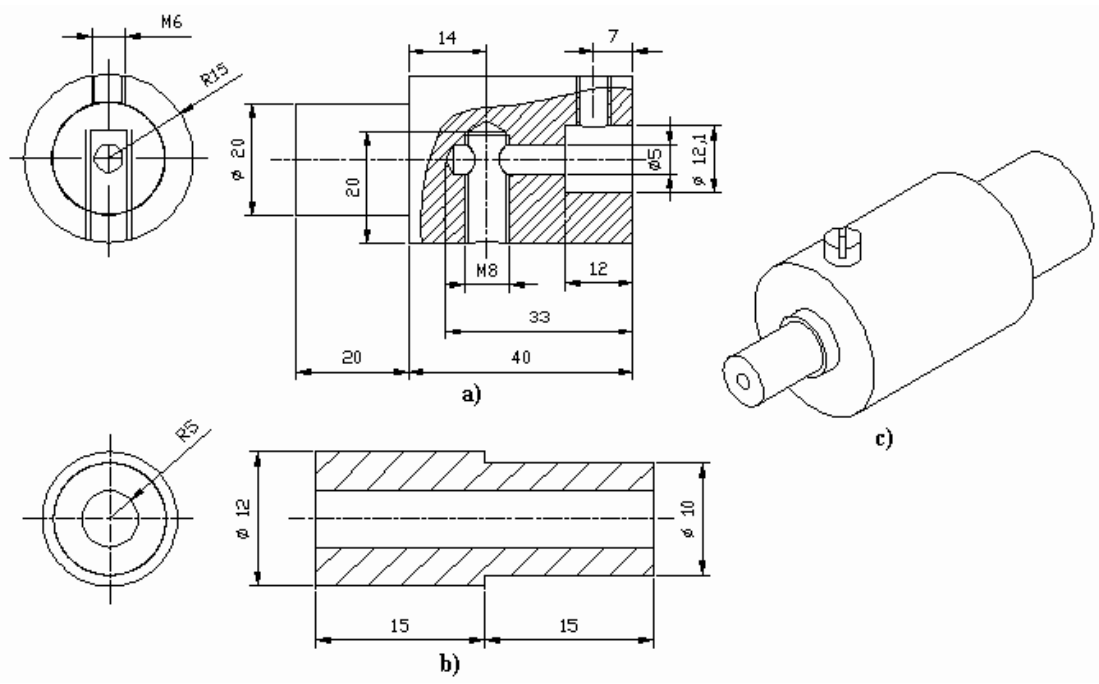
Bu çalışmadaki deney şartlarında elektrot takımı anot (+), işparçası ise katot (-) olarak kullanılmıştır. Kullanılan elektrot takımı ve iş parçaları Şekil 4.1. ve Şekil 4.2'de görülen parçalardan oluşmuştur.

Çizelge 4.8 Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi

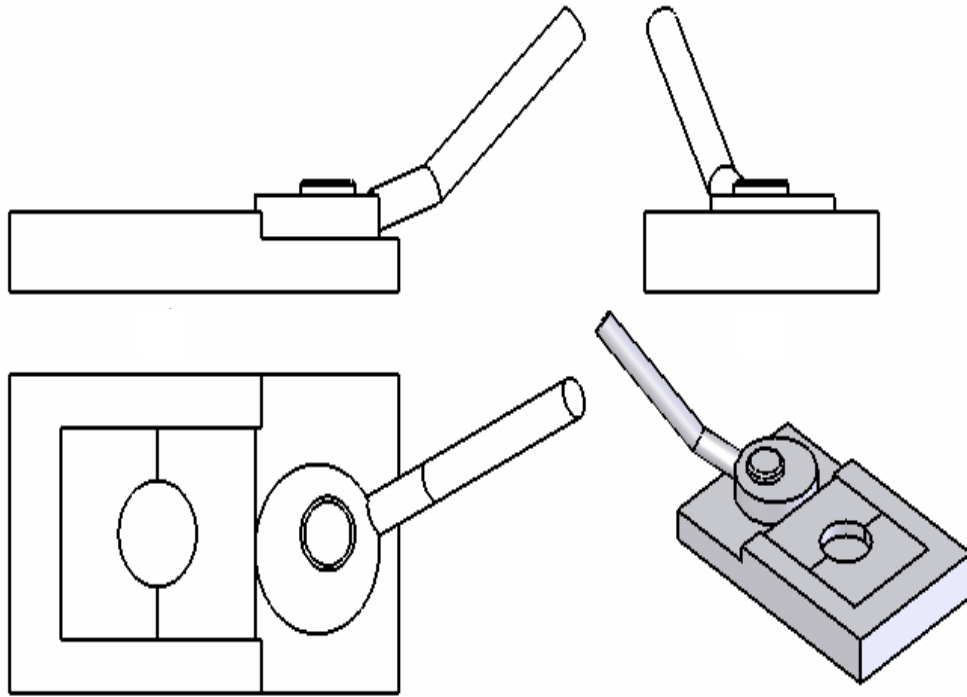
ELEMENT	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Cu
%	0,021	0,029	0,001	0,033	0,027	99,876
Yoğunluk, ρ , (20 °C)	8,9 g/cm ³					
Elektriksel iletkenlik (20 °C)	56-58 m/Ω mm ²					

4.4. İşleme Parametreleri ve Değişen Değerlerin Karşılıkları

Bu araştırmada, üç işleme parametresi, boşalım akımı (I_d), vurum süresi (t_s), işparçası malzemesi değişen parametreler olarak alınmıştır. Karşılık parametreler ise işparçası işleme hızı ($\dot{I}H$), elektrot aşınma hızı (EAH) ve bağıl aşınma (BA) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Elektrot donanımı a) Tutucu b) Elektrot c) Montajlı görünüşü



Şekil 4.2. Bağlama donanımı

4.5. Karşılık Değerlerin (İİH, EAH ve BA) Değerlendirilmesi

İşparçası işleme hızı, toplam işleme süresi başına uzaklaştırılan malzemenin hacmi veya kütlesi olarak tanımlanır. Uzaklaştırılan (*kaldırılan*) malzemenin hacmi, işparçası ve elektrot için ortalama işleme derinliği ve yüzey alanının çarpımı ile bulunabilir. Bu çalışmada, işparçasından kaldırılan malzeme miktarı hacimsel olarak dikkate alınarak işparçası işleme hızı hesaplanmıştır. Elektrot aşınma hızı da, toplam işleme zamanı başına elektrot malzemesinden uzaklaşan malzeme hacmi veya kütlesi olarak tanımlanır. EEİ’de bilinen toplam işleme zamanı, her bir puls için harcanan vurum süresi ve bekleme aralığı işlemlerinin toplamı olarak tanımlanır. Bağlı aşınma, elektrot takım aşınma oranının işparçasından uzaklaştırılan malzeme oranına yani işparçası işleme hızına bölümü ile bulunmaktadır. BA değeri, malzeme çifti arasındaki göreceli malzeme kaybını yansıtmaları bakımından, önemli bir aşınma göstergesidir.

Genel olarak EEİ operasyonunda işleme performansının değerlendirilmesi aşağıdaki performans karakteristiklerine göre yapılır. Bunlar:

$$\text{İİH (mm}^3\text{/dak)} = \text{İşparçası hacim kaybı (mm}^3\text{)} / \text{İşleme süresi (dak)} \quad (4.1)$$

$$\text{EAH (mm}^3\text{/dak)} = \text{Elektrot hacim kaybı (mm}^3\text{)} / \text{İşleme süresi (dak)} \quad (4.2)$$

$$\text{BA (\%)} = \text{EAH (mm}^3\text{/dak)} / \text{İİH (mm}^3\text{/dak)} \quad (4.3)$$

Yukarıda belirtilen işlem performans ölçümlerinin değerleri tamamen işleme parametrelerine bağlıdır. EEİ tekniğinin genel optimizasyon kriteri, en az EAH ile en fazla İİH’ı elde etmek olarak ifade edilebilir.

4.6. Deneylerin Uygulanışı

Deneylerin uygulanışında, boşalım akımı (I_d), vurum süresi (t_s) ve işparçası malzemesi değişen parametre olarak kabul edilmiştir. Polarite (+/-), bekleme süresi

(t_p), dielektrik sıvı cinsi ve elektrot malzemesi ve dört malzeme için işleme derinliği bütün deneyler için sabit tutulmuştur. Sadece Al-MMK ($AlMg1SiO,6TiH20,8$) malzeme için mevcut malzeme kalınlığının 5 mm olmasından dolayı işleme derinliği 4 mm alınmıştır. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri Çizelge 4.9’da, performans çıktıları ile genişletilmiş bilgiler, işleme değişkenlerine ait detaylar olarak ayrıca verilmiştir (EK-1).

EK-1’de görülen 45 deney için ikişer tekrar olmak üzere toplam 90 adet deney yapılmıştır. EEİ çalışmalarında boşalım akımı için, EEİ tezgâhının güç seviyesi kademe ayarlarından yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan güç seviyesi ve karşılık değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Boşalım akımı ile vurum süresinin işleme performans ölçümleri üzerine etkilerini çalışabilmek için deney şartlarının düzenlenebilmesine yönelik ön deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneyler, her bir boşalım akım seti için üç vurum süresi değeri ($50 \mu s$, $100 \mu s$ ve $200 \mu s$) dikkate alınarak ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrı deney setindeki her bir deney, en az iki kez tekrarlanmıştır. Deney esnasında işleme parametreleri tutarsızlık gösteren bazı deneyler tekrarlanmıştır. Sonuçlar iki tutarlı deney sonucunun aritmetik ortalaması alınarak, analiz ve değerlendirmeler için hazırlanmıştır.

İş parçasına elektrot dalma derinliği 7 mm olarak ayarlanmış, dalma derinliği tamamlandığında, işleme otomatik olarak durdurulmuştur. Her bir deney numunesi için ortalama işleme süresi, boşalım akımına, vurum süresine ve işparçasına bağlı olarak değişmiştir. Ortalama işleme süresinin, artan boşalım akımı değeri ve vurum süresinin artması ile ilişkili olduğu bilinmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılacak elektrot takımlarının üretimi esnasında yüzeylerinde kalan atıklar basınçlı hava ile uzaklaştırılmıştır. Bu sayede, her bir deneyde, önceden kalan kalıntıların, İİH, EAH ve BA ile işlenmiş yüzey kalitesine etkilerinden kurtulmak için oldukça temiz elektrot kullanımına özen gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Deney işleme parametreleri

Deney işleme parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_d) [A]	6, 9 ve 12,5
Vurum Süresi (t_s) [μs]	50, 100, 200
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Merkezden Püskürtme
Püskürtme Basıncı (P) [bar]	0,5
Deney Tekrar Sayısı [adet]	2
Polarite	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (t_p) [μs]	50
Dielektrik Sıvı	Parafinol 5
İşparçası Malzemesi	AL427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 Al-MMK malzeme ve AlMg1SiO,6TiH ₂ 0.8 Al-MMK Malzeme ile ETIAL-20 ticari alüminyum ve Böhler K510 cıva çeliği (1.2210 115CrV3)
Elektrot Malzemesi	Elektrolitik Bakır
İşleme Derinliği [mm]	Dört deney seti için 7, bir deney seti için 4 olarak alınmıştır
İşleme Süresi ($t_{işleme}$) [dak]	Deney şartlarına göre değişmiştir

Çizelge 4.10. Deneyde kullanılan güç seviyesi ve karşılık değerleri

Güç Seviyesi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Karşılığı	1/32	1/16	3/32	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
Anma Akımı, (A)	0,75	1,5	2,3	3	4,5	6	7,5	9	12,5	15	18	21	25

4.7. İşparçası İşleme Hızı Performans Ölçüm Değerlerinin Analizi

Deneysel çalışmada kullanılan her bir işparçası ve elektrot; işlem öncesi ve sonrası olmak üzere temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur. Daha sonra Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalişleri Bölümü Ölçü Laboratuvarında bulunan 0,0001 g hassasiyete sahip Precisa marka dijital terazi ile ikişer kez tartılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. En son işlem olarak, her bir işparçası için, deney öncesi ve deney sonrası kütle değerlerinin farkları, hesaplanan işparçası yoğunluğu ile

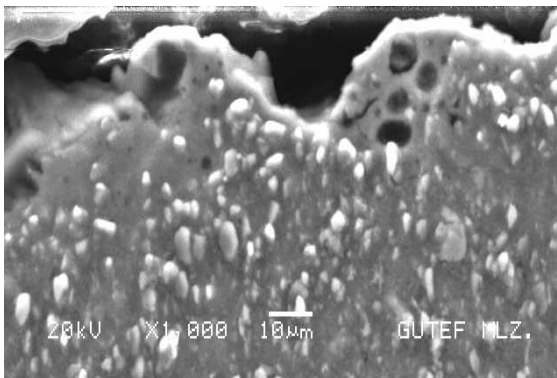
ilişkilendirilerek hacim değerleri bulunmuş, bulunan değer, ortalama deney işleme sürelerine bölünerek işparçası işleme hızı (İİH), (mm^3/dak) olarak hesaplanmıştır.

4.8. Elektrot Aşınma Hızı Performans Ölçüm Değerlerinin Analizi

Deneysel çalışmada kullanılan her bir elektrot, işlem öncesi ve sonrası olmak üzere temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur. Daha sonra Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal İşleri Bölümü Ölçü Laboratuvarında bulunan 0,0001 gr hassasiyete sahip Precisa marka dijital terazi ile ikişer kez tartılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. En son işlem olarak, her bir elektrot için, deney öncesi ve deney sonrası kütle değerlerinin farkları, hesaplanan elektrolitik bakır yoğunluğu ile ilişkilendirilerek hacim değerleri bulunmuş, bulunan değer ortalama deney işleme sürelerine bölünerek elektrot aşınma hızı (EAH), (mm^3/dak) olarak hesaplanmıştır.

4.9. Yüzey Pürüzlülüğü

Deneysel çalışmada işlenmiş işparçasının yüzey pürüzlülüğü görünümü, tarama elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümleri, izleyici uçlu ölçüm cihazları ile yapılmamıştır. Resim 4.7, EEİ'de elektrot malzemesi ile boşalım akımı 9 A, vurum süresi 100 μs olan işleme parametresine bağlı olarak işlenmiş AL427915 Al/Cu MMK malzemenin, işlenen kör delik ve yüzeyin enine kesitinin SEM mikro yapısını göstermektedir.



Resim 4.7. EEİ'de işlenmiş kör delik yüzeyin enine kesitinin SEM mikro yapısı

4.10. Elektriksel İletkenliğin Ölçülmesi

Deneysel numuneler için hazırlanmış malzemelerinden birer tanesi, elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde kullanılmıştır. Elektriksel iletkenlik ölçümleri yapılacak numunelerin her iki yüzeyi arasında temas sağlanacağı düşünülerek kurutma işlemlerine tabi tutularak temizlenmiştir. Elektrik iletkenlik ölçümleri Resim 4.8’de görülen Solartron marka 1260 ve 1296 yüksek frekans empedans analiz cihazları kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, normal şartlarda 1 Hz-1 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Numunelere AC 100 mV gerilim uygulanmıştır.

Deney verilerinin toplanması ve yorumlanması bir bilgisayar yardımı ile Smart ve Z view programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.8. Solartron 1260 ve 1296 marka yüksek frekans empedans analiz cihazı

Elektrik iletkenlik ve dirençlerinin belirlenmesinde numune geometrisi dikkate alınmıştır. Malzeme iletkenlik ve direnci;

$$\sigma_{iletkenlik} = \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{A} \quad (4.4)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır. Burada; $\sigma_{iletkenlik}$ malzemenin elektriksel iletkenliğini, A numunenin tek bir yüzeyinin alanını, L numunenin kalınlığını ve R malzeme direncini göstermektedir.

4.11. Metalografik İncelemeler

Deneysel çalışmada kullanılan AL427915 Al/Cu MMK malzemesi deney seti (*dokuz adet*) ile diğer dört malzemenin boşalım akımı değeri 9 A, vurum süresi 100 µs olan işleme şartlarına ait deneysel uygulamaları numune olarak alınmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler polyester kullanılarak soğuk gömme yöntemi ile kalıplanmıştır. Numuneler sırasıyla 400, 800, 1000 ve 1200 grid'lik SiC zımparalarla yüzeydeki tüm çizikler giderilene kadar zımparalanmış ve daha sonra numune yüzeyleri 3 µm'luk elmas pastalar kullanılarak parlatılmıştır. Son parlatma işlemi ise, alümina solüsyonu kullanılarak yapılmıştır.

EEİ ile işlenmiş ve yüzeyleri parlatılmış deneysel numunelerin mikroyapılarının görüntülenmesinde ve mikroyapı incelemeleri için, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalişleri Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan DFC-320 dijital kamera bağlantılı Leica marka DM4000M model optik mikroskop kullanılmıştır. 100 ve 400 kat büyütme kullanılarak önceden belirlenen farklı bölgelerden mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikro yapı değişiminin incelenmesi için işlenmiş yüzeye çok yakın bölgelerde fotoğraf çekilmesine özen gösterilmiştir

Bütün numuneleri ayrıntılı olarak incelemek için, yukarıda belirtilen laboratuvarında bulunan Jeol 6060 LV model taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüleme çalışmaları yapılmıştır. Deneysel uygulamaların mikroyapı fotoğrafları gruplandırılmış ve tekrar katılmış tabaka ile ısıdan etkilenmiş bölgeyi gösteren beyaz tabaka kalınlığı incelenmiştir.

Ayrıca, EEİ ile işlenmiş işparçası yüzeylerin kısmi alanlarında element kompozisyonunu (*bileşeni*) gözlemek ve tespit etmek için, SEM cihazının Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılmıştır. Bunun için, ölçüm yapılacak her bir deneysel numenin üç bölgesinde analiz çalışması yapılmıştır.

4.12. Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Değerlendirme ve Matematiksel Modelleme

Klasik yöntemlerle veya algoritmalarla çözülemeyen ya da iyi sonuçlar alınamayan karmaşık problemlere çözümler üretmek için son yıllarda yapılan araştırmalar sonucu, yeni bir bilgi işleme yöntemi olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) doğmuştur [60]. Yapay sinir ağları, 20. yüzyılda elektronik, mekanik ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan evrimin kaçınılmaz sonucu olarak ortaya çıkan yapay zeka yöntemlerinden biridir. Yapay sinir ağlarına olan ilgi son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Mühendisliğin çeşitli alanlarında çalışan araştırmacılar, yapay sinir ağlarını kendi uzmanlık alanlarına taşıma ve kullanacakları yöntemleri uygulama aşamasına gelmişlerdir [61].

Yapay sinir ağları, günümüzde matematik, fizik, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok bilim dalının araştırmalarında kullanılır hale gelmiştir. Pratikteki kullanımı, farklı yapılarda ve formlarda bulunabilen örnek verileri tanımlama ve algılama üzerinedir. Benzer amaçla geliştirilen diğer yapay zeka yöntemleri gibi, havacılık, uzay ve savunma sanayi ile otomotiv, ses ve sinyal algılama, robotik, imalat, optimizasyon, kontrol mühendisliği, sibernetik ve daha bir çok alanda farklı ağ yapılarıyla uygulama alanı bulmaktadır. Mühendislik uygulamalarında ise geniş bir şekilde kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri, klasik yöntemlerle çözülemeyen problemlere etkin bir alternatif oluşturmasıdır [61, 62].

Yapay sinir ağı modelleri, algoritmik olmayan, paralel ve yayılı bilgi işleme yetenekleri ile klasik modellerden farklıdır ve farklı olan bu özellikleri sayesinde, karmaşık ve doğrusal olmayan hesapları kolaylıkla ve hızlı bir şekilde çözebilir [63, 64].

4.13. Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Sürecinde İstatistiksel Hatalar

Yapay sinir ağları öğrenme ve test işlemlerini belirli bir hata değerine göre yapmaktadır. Öğrenme sırasındaki hata, RMS (Root-mean-squared (*Kareler*

Ortalamasının Karekökü)) olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [65]:

$$RMS = \left((1/p) \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

MAPE (mean absolute percentage error (ortalama mutlak yüzde hata))

$$MAPE = \frac{o - t}{o} \times 100 \quad (4.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. R^2 (Absolute fraction of variance (mutlak değişim kesri));

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \right) \quad (4.7)$$

olarak ifade edilmektedir.

Bu ifadelerde o ; YSA'nın çıktı değeri, t hedef değerdir.

4.14. Uygulama

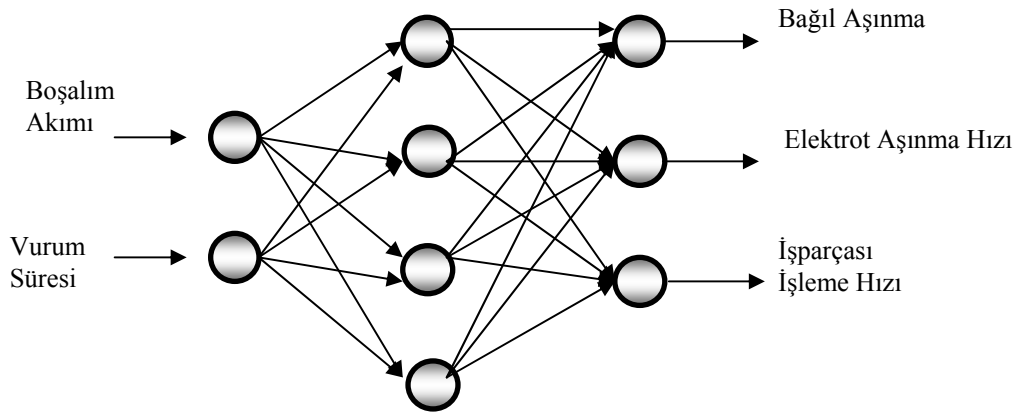
Deney sonuçlarının performans çıktıları, işleme ortamına ve şartlarına bağlı olarak, boşalım akımı ile vurum süresinin değiştirildiği, diğer işleme parametrelerinin değiştirilmeyerek sabit tutulduğu çalışmaların sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Performans çıktıları, boşalım akımı ve vurum süresinin, İİH, EAH ve BA üzerine etkileri olarak alınmıştır. Sonuçlar, YSA öğrenme algoritmasının sonucu olarak ortaya çıkan ağırlık değerleri kullanılarak analitik olarak ifade edilmişlerdir. Elde

edilen denklemler İİH, EAH ve BA'nın boşalım akımı ve vurum süresinin fonksiyonu olarak verilmiştir (Eş.5.12-Eş.5.26).

4.14.1. Matematiksel modelleme

Malzeme çiftlerinin boşalım akımı (I_d) ve vurum süresine (t_s) bağlı olarak ortalama işleme süresi ($t_{işleme}$) dikkate alınarak, EAH, İİH ve BA'nın, yapay sinir ağları kullanılarak matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiş ve analitik bağıntılar elde edilmiştir. Beş farklı malzeme çifti için ayrı ayrı modelleme yapılmıştır. Modellemede deneylerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.3'de verilmiştir. Scaled Conjugate Gradient (SCG) öğrenme algoritması ile 3 nöronlu elde edilen matematik ifadeler beş farklı malzeme için aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3. Modeldeki yapay sinir ağlarının ağ yapısı

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Deney Sonuçları Performans Çıktılarının Değerlendirilmesi

Beş farklı malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı bu deneysel çalışmada, EEİ sonucunda, İİH, EAH, BA ve metalürjik yapı değişimi gibi işleme performans çıktılarının işleme parametreleri özelliklerine göre gösterdiği değişim değerlendirilmiştir.

5.2. İşparçası İşleme Hızının (İİH), Elektrot Aşınma Hızının (EAH) ve Bağlı Aşınmanın (BA) Boşalım Akımı (I_d) Değişimi İtibariyle Değerlendirilmesi

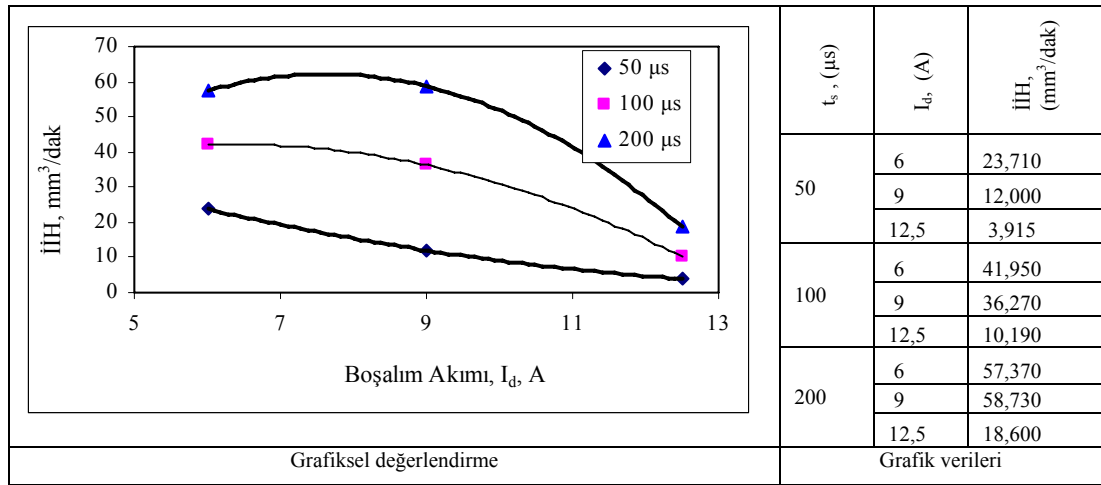
Boşalım akımı değiştirilerek gerçekleştirilen deneysel çalışmada 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık değerler dikkate alınmıştır. Her bir I_d değeri için 25 μ s, 50 μ s ve 100 μ s'lik vurum süreleri uygulanmıştır. Her bir deney için ortalama işleme süresi boşalım akımına, vurum süresine ve iş parçasına bağlı olarak değişmiştir.

5.2.1. İşparçası işleme hızının boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.1. – Şekil 5.5’de boşalım akımına bağlı olarak beş farklı işparçası malzemesi için (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 Al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin*) İİH’nın I_d ile değişimleri gösterilmiştir.

Şekil 5.1’de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işparçası işleme hızının I_d ile değişimi incelendiğinde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH’nın artmakta olduğu görülmektedir. Aynı şekilde t_s dikkate alındığında, I_d arttırıldıkça, İİH değerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, en yüksek İİH, 9 A’lık boşalım akımında ve 200 μ s’lik vurum süresinde 58,730 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük İİH ise, 12,5



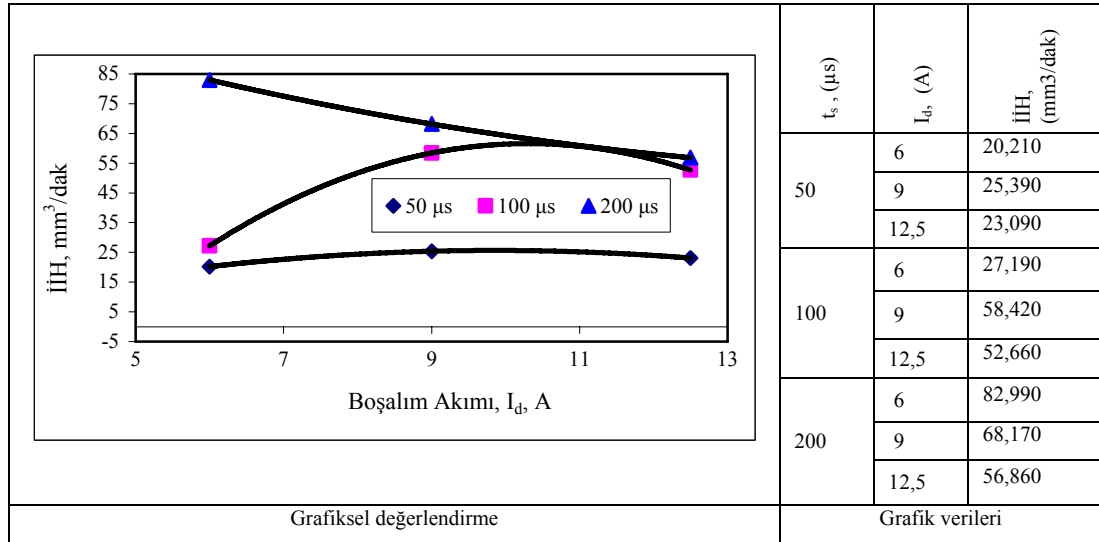
Şekil 5.1. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

A'lık I_d ve 50 μs 'lik vurum süresinde 3,915 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık I_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen İİH değerlerinin azaldığı (*sırasıyla 41,950 mm^3/dak , 36,270 mm^3/dak ve 10,190 mm^3/dak*) görülmüştür.

Şekil 5.2'de, AE109 Al-MMK malzemesinin İİH'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH değerlerinde farklılaşma olduğu görülmüştür. Çalışılan bu malzemeye ilgili olarak, I_d 6 A iken, farklı vurum sürelerinde alınan İİH değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımında ise, 100 μs ve 200 μs vurum sürelerindeki İİH değerlerinin azaldığı, 50 μs vurum süresindeki İİH değerinin ise, artmaya devam ettiği gözlenmiştir. İİH eğrilerinin 200 μs vurum süresi için farklılık göstermesi, bu malzemenin emdirme yöntemi ile üretilmesinden ve uzun süreli boşalım sürecinde, Al matris malzemeden ayrılan SiC parçacıklarının bölgeden kolay atılmasını engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

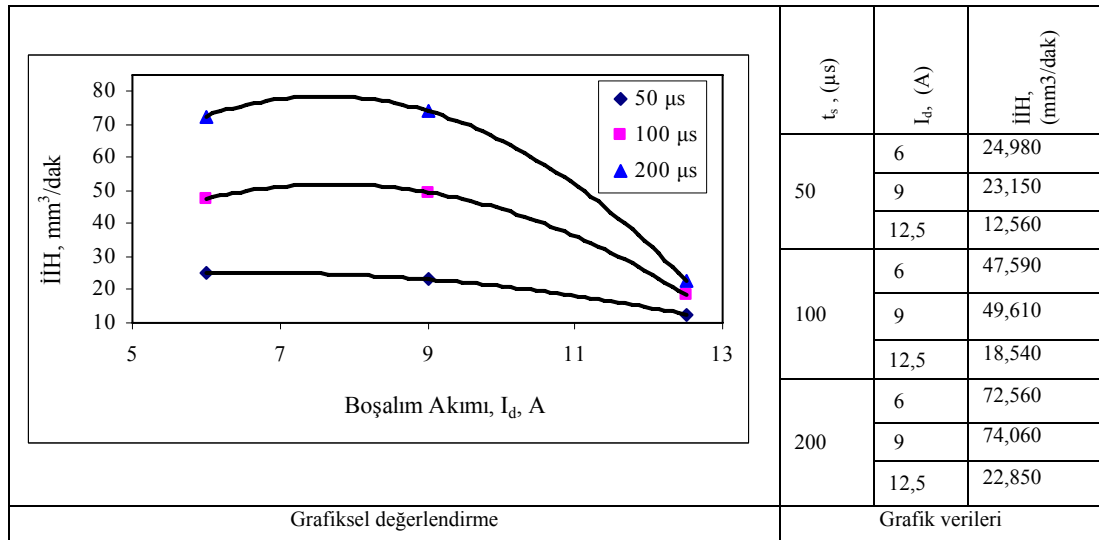
Bu çalışmada, 6 A'lık I_d ve 200 μs 'lik vurum süresinde en yüksek İİH değeri 82,990 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. En düşük İİH değeri ise, yine 6 A'lık I_d ve 50 μs 'lik vurum süresinde 20,210 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve

12,5 A'lık I_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen İİH değerlerinin (sırasıyla 27,190 mm^3/dak , 58,420 mm^3/dak ve 52,660 mm^3/dak) olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. AE109 Al-MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

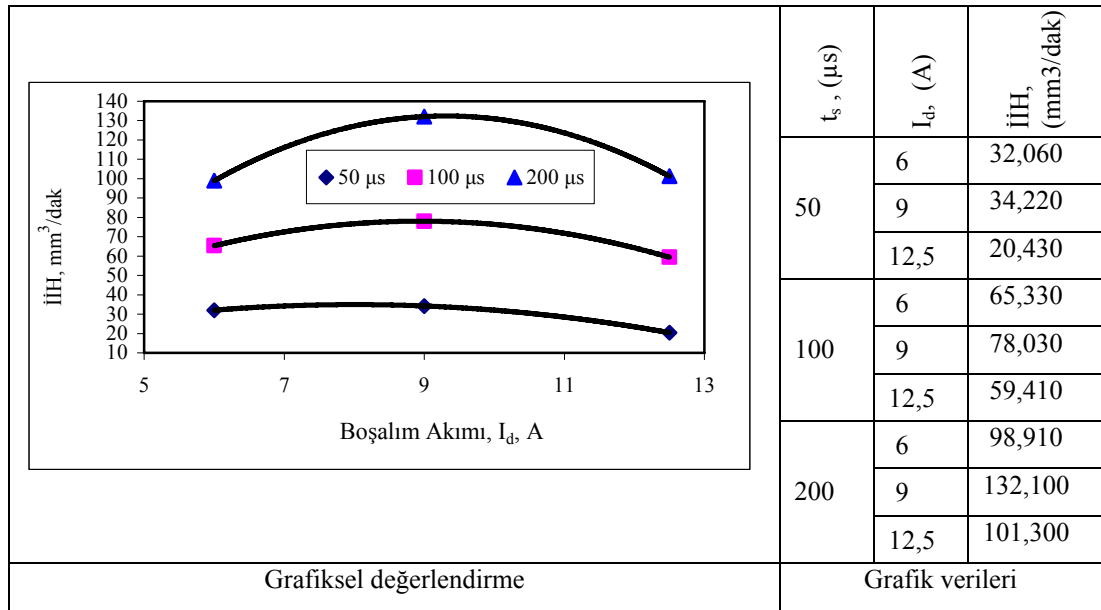
Şekil 5.3'de, AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesinin İİH'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH değerinin artmakta olduğu görülmektedir. Vurum süresinin sabit olduğu, boşalım akımının 6 A ve 9 A olduğu işleme şartlarında, İİH değerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bütün t_s için 12,5 A'lık çalışmalarda ise, İİH değerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.3. AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Bu çalışmada, 9 A'lık I_d ve 200 μs 'lik vurum süresinde en yüksek İİH değeri 74,060 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. En düşük İİH değeri ise, 12,5 A'lık I_d ve 50 μs 'lik vurum süresinde 12,560 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık I_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen İİH değerlerinin (sırasıyla 47,590 mm^3/dak , 49,610 mm^3/dak ve 18,540 mm^3/dak) olduğu görülmüştür.

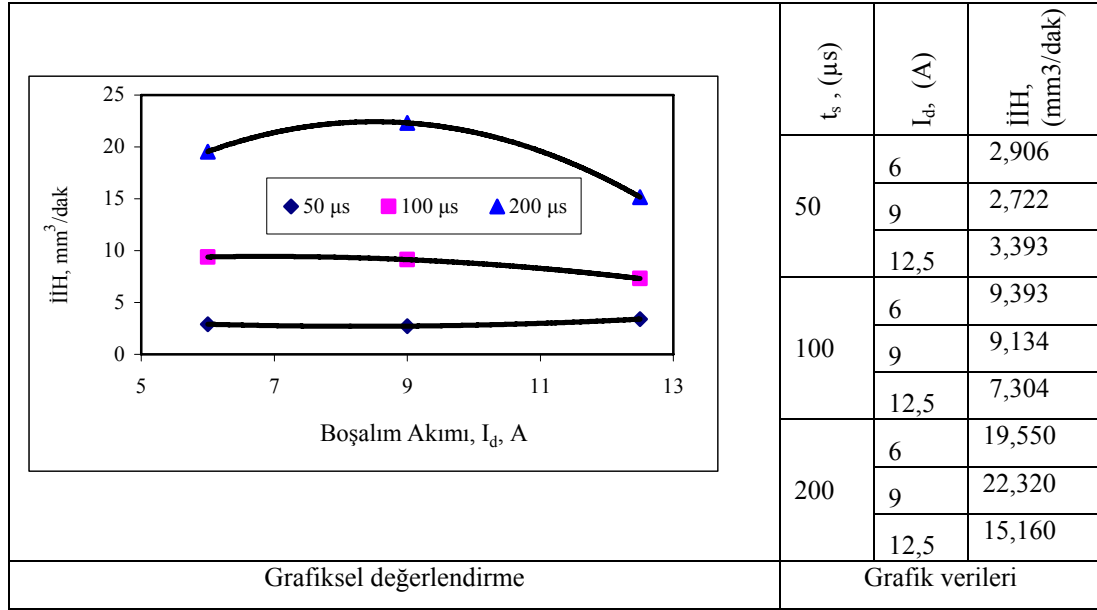
Şekil 5.4'de, ETIAL 20 ticari alüminyum malzemesinin İİH'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH değerinin artmakta olduğu görülmektedir. t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH değerinin 6 A ve 9 A değerlerinde artış gösterdiği, 12,5 A'lık işleme şartında ise azalışa yöneldiği görülmektedir.



Şekil 5.4. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Bu çalışmada, 9 A'lık I_d ve 200 μs 'lik vurum süresinde en yüksek İİH değeri 132,100 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. En düşük İİH performansı ise, 12,5 A'lık I_d ve 50 μs 'lik vurum süresinde 20,430 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık I_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen İİH değerlerinin azaldığı (sırasıyla 65,330 mm^3/dak , 78,030 mm^3/dak ve 59,410 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.5’de, Soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işparçası işleme hızının I_d ile değişimi incelendiğinde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH değerinin artmakta olduğu görülmektedir. t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH değerinin farklı olarak elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.5. Soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

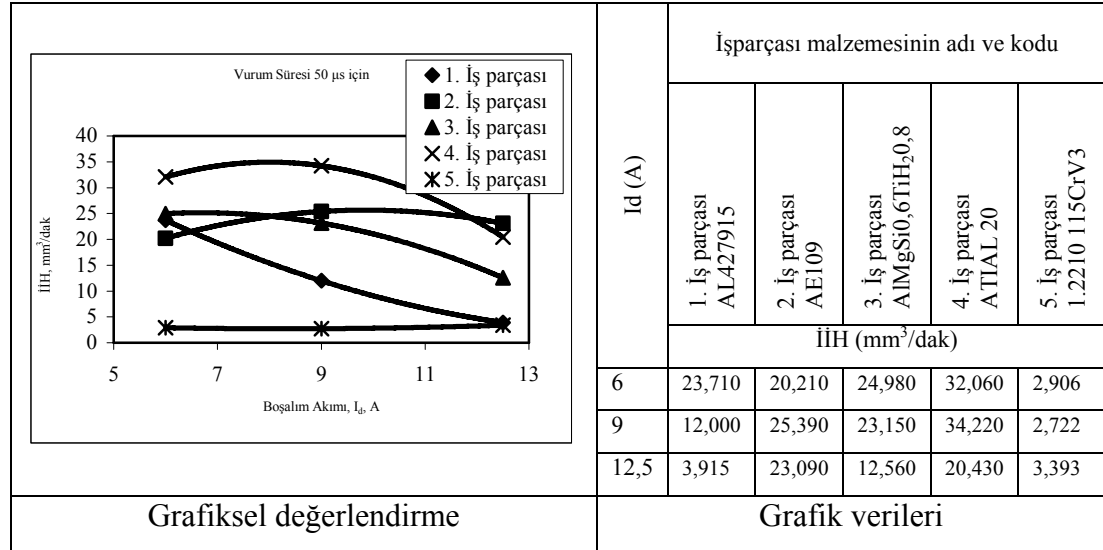
Bu çalışmada, 9 A’lik I_d ve 200 μs ’lik vurum süresinde en yüksek İİH değeri 22,320 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. En düşük İİH ise, 9 A’lik I_d ve 50 μs ’lik vurum süresinde 2,722 mm^3/dak olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lik I_d değerlerinde 100 μs ’lik vurum süresinde elde edilen İİH değerlerinin azaldığı (sırasıyla 9,393 mm^3/dak , 9,134 mm^3/dak ve 7,304 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.6. – Şekil 5.8’de ise, deneysel çalışmada kullanılan iş parçası malzemeleri için 50 μs , 100 μs ve 200 μs ’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının I_d ile değişiminin etkisi gösterilmiştir.

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, I_d değişiminin İİH üzerine etkisi değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının t_s artışı ile doğru orantılı olarak İİH’nın düştüğü görülmüştür. Bu

durum, $\text{AlMg1SiO}_6\text{TiH}_{2,8}$ MMK malzeme ile AE109 Al-MMK malzemenin işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusudur. Mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin deneysel sonuçları da eş değer performans çıktıları vermiştir.

Şekil 5.6’de farklı işparçası malzemeleri için 50 μs ’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının I_d ile değişimi gösterilmiştir. İş parçası malzemeleri için, I_d değişiminin $\dot{I}\dot{I}H$ üzerine etkisi grafik verileri değerlendirildiğinde de görülebilmektedir.

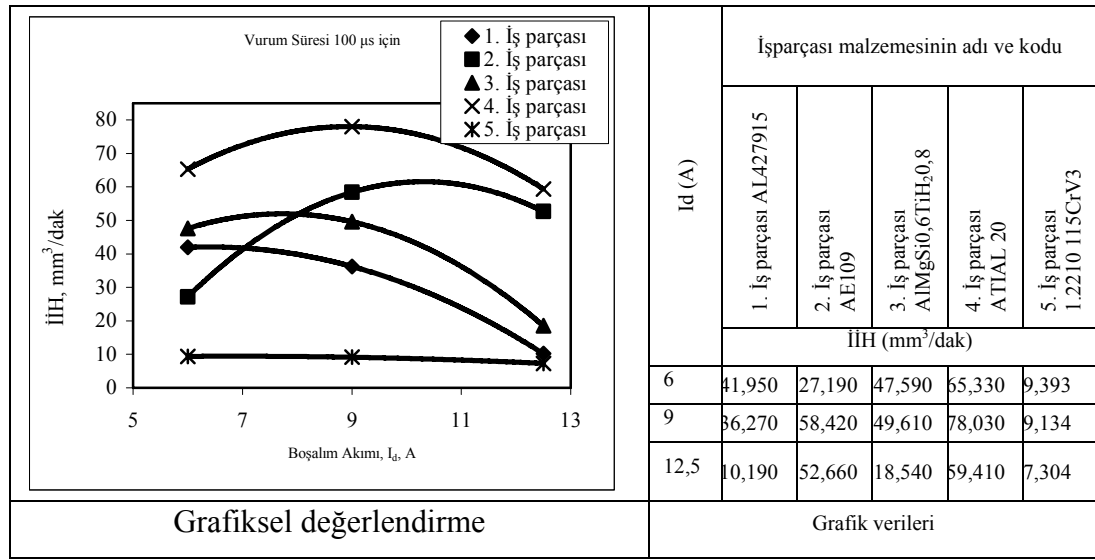


Şekil 5.6. Farklı işparçası malzemeleri için 50 μs ’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının ($\dot{I}\dot{I}H$) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin 1.nci işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, boşalım akımı değişiminin $\dot{I}\dot{I}H$ üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının vurum süresi artışı ile doğru orantılı olarak $\dot{I}\dot{I}H$ ’nın düştüğü görülmüştür. En düşük $\dot{I}\dot{I}H$, 12,5 A’lık boşalım akımında 3,915 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. Bu durum, 3.nci işparçası olarak $\text{AlMg1SiO}_6\text{TiH}_{2,8}$ MMK malzeme ile AE109 Al-MMK malzemenin 2.nci işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin $\dot{I}\dot{I}H$ değerleri için de söz konusudur. 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği

(1.2210 115CrV3) malzemenin 5.nci işparçası olarak kullanılan deneysel çalışma sonuçları da eş değer İİH çıktılarını vermiştir.

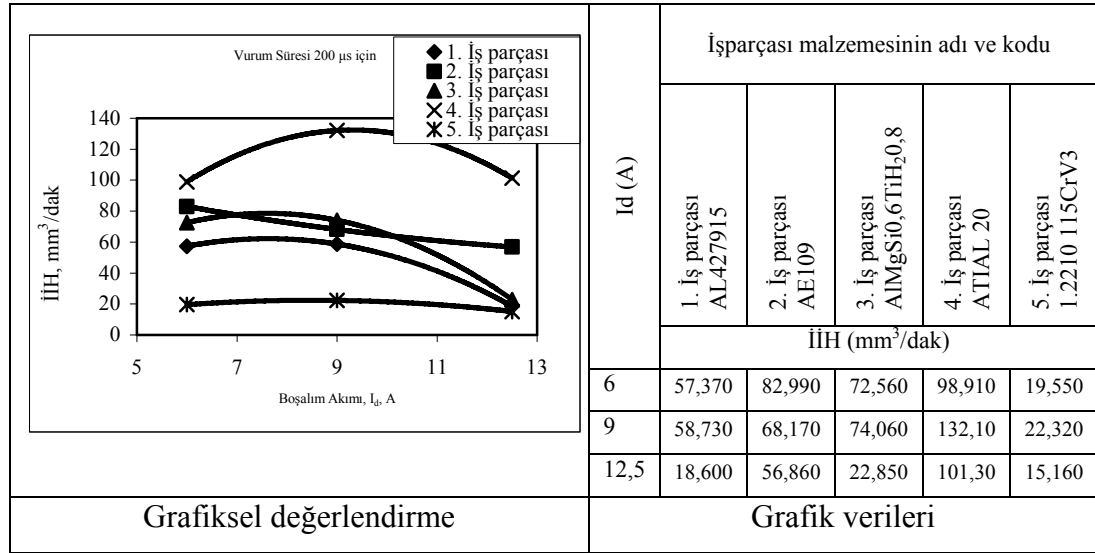
Şekil 5.7’de farklı işparçası malzemeleri için 100 μ s’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının I_d ile değişimi gösterilmiştir. Bütün işparçası malzemeleri için, I_d değişiminin İİH üzerine etkisi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7. Farklı işparçası malzemeleri için 100 μ s’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin 1.nci işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, I_d değişiminin İİH üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının t_s artışı ile doğru orantılı olarak işparçası işleme hızının düştüğü görülmüştür. En düşük İİH, 12,5 A’lik boşalım akımında 10,190 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. 3.ncü işparçası olarak AlMgSi0,6TiH2,0,8 MMK malzemede ise, 6 A’lik boşalım akımında 27,190 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. 2.nci işparçası olarak AE109 Al-MMK malzemenin kullanıldığı deneysel çalışmada ise en düşük İİH değeri, 12,5 A’lik boşalım akımında 18,540 mm^3/dak olarak bulunmuştur. 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin 5.nci işparçası olarak kullanılan deneysel çalışma sonuçları da eş değer İİH çıktılarını vermiştir.

Şekil 5.8’de farklı işparçası malzemeleri için 200 μ s’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının I_d ile değişimi gösterilmiştir. Bütün işparçası malzemeleri için, I_d değişiminin İİH üzerine etkisi olduğu görülmüştür.



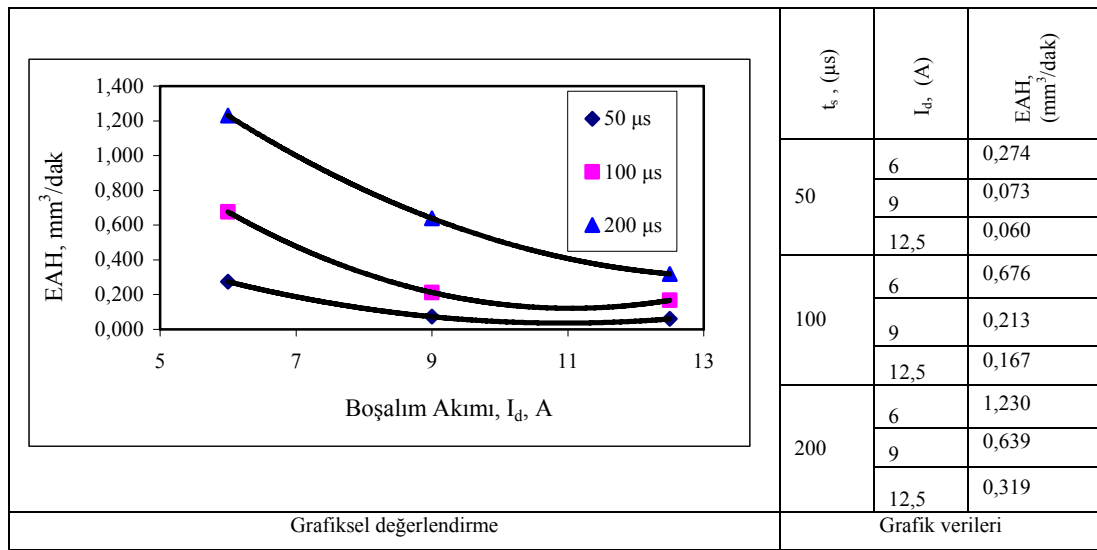
Şekil 5.8. Farklı işparçası malzemeleri için 200 μ s’lik vurum süresinde işparçası işleme hızının (İİH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin 1.nci işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, I_d değişiminin İİH üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımında vurum süresine bağlı olarak işparçası işleme hızının değiştiği görülmüştür.

Grafik verileri ayrıntılı olarak incelendiğinde, en düşük İİH, 12,5 A’lık boşalım akımında 18,600 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. 3.ncü işparçası olarak kullanılan AlMgSiO,6TiH₂0.8 MMK malzeme deneysel çalışma da eş değer İİH çıktısı sonucu vermiştir. 2.nci işparçası olarak AE109 Al-MMK malzemenin kullanıldığı deneysel çalışmada ise en düşük İİH değeri, 12,5 A’lık boşalım akımında 22,850 mm^3/dak olarak bulunmuştur. 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzemedede ise, en düşük İİH, 6 A’lık boşalım akımında 98,910 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. 5.nci işparçası olarak kullanılan soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin deneysel çalışma sonuçları da eş değer İİH çıktıları vermiştir.

5.2.2. Elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.9. – Şekil 5.13’de boşalım akımına bağlı olarak beş farklı işparçası malzemesi için (AL427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH₂O,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin) kullanılan elektrot takımının EAH’nın I_d ile değişimleri gösterilmiştir.

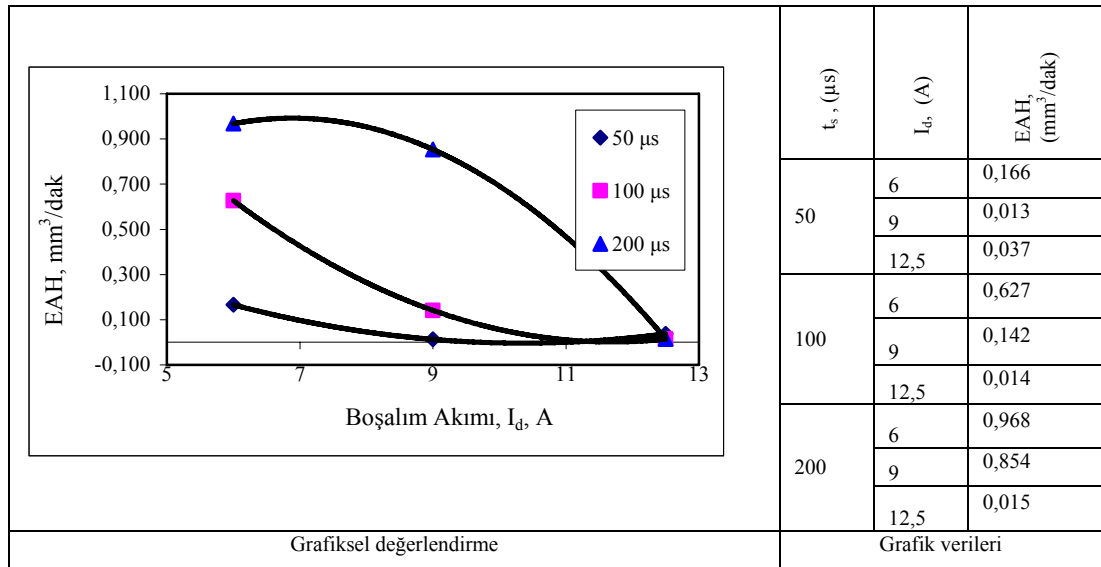


Şekil 5.9. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Şekil 5.09’de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH’nın I_d ile değişimi incelendiğinde; vurum süresinin sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH’nın azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı I_d dikkate alındığında, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A’lik boşalım akımında ve 200 µs’lik vurum süresinde 1,230 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 12,5 A’lik boşalım akımında ve 50 µs’lik vurum süresinde 0,060 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lik I_d değerlerinde 100 µs’lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin azaldığı (sırasıyla 0,676 mm³/dak, 0,213 mm³/dak ve 0,167 mm³/dak) görülmüştür.

Şekil 5.10’da, AE109 al-MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH’nın I_d ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH’nın azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı I_d dikkate alındığında, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. EAH değişimi eğrilerinden 200 μs vurum süresi için elde edilen eğri, diğerlerine nazaran artarak azalan bir seyir göstermektedir. Bunun muhtemel nedeni, bu malzemenin üretim yöntemi ile MMK malzemenin poroziteli yapısına atfedilmiştir.

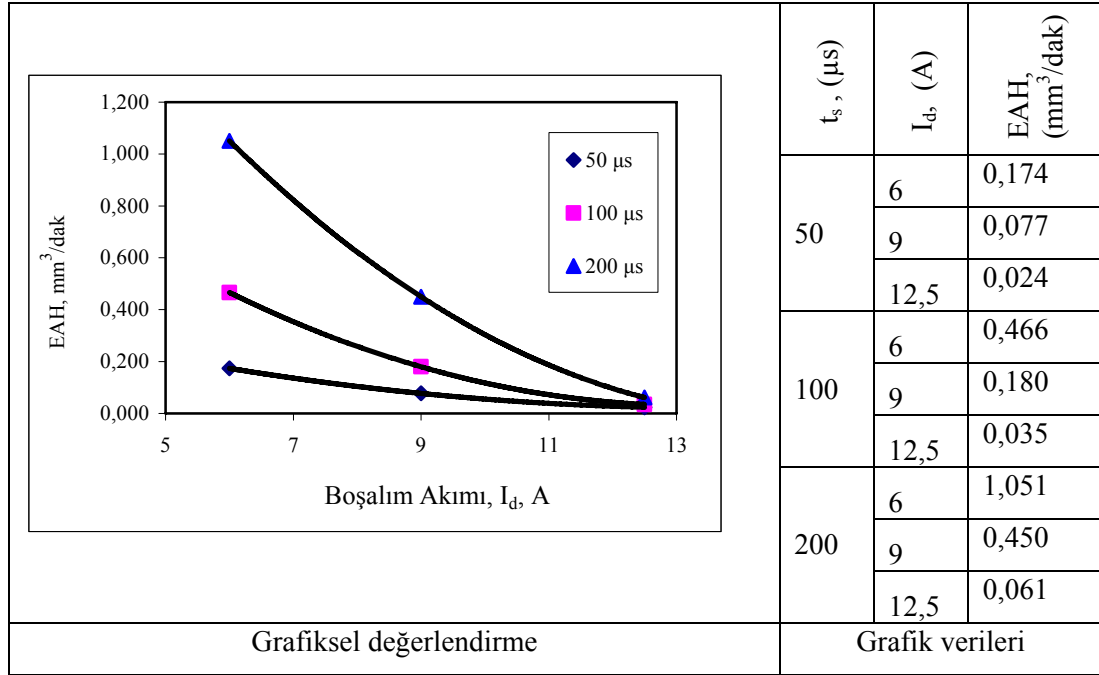


Şekil 5.10. AE109 al-MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A’lık boşalım akımında ve 200 μs ’lik vurum süresinde 0,968 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 9 A’lık boşalım akımında ve 50 μs ’lik vurum süresinde 0,013 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lık I_d değerlerinde 100 μs ’lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin azaldığı (*sırasıyla* 0,627 mm^3/dak , 0,142 mm^3/dak ve 0,014 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.11’da, AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH’nın I_d ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH’nın azalmakta olduğu görülmektedir. Bu

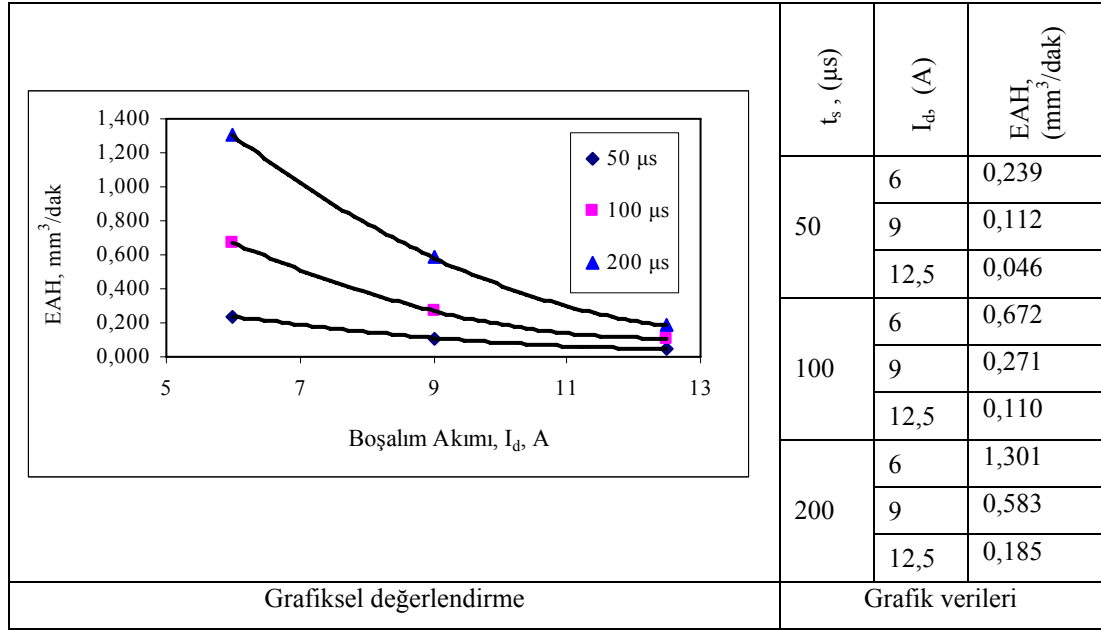
çalışmada, aynı boşalım akımı dikkate alındığında ise, vurum süresi değeri arttırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. AlMg1SiO,6TiH2O,8 MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μs 'lik vurum süresinde 1,051 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μs 'lik vurum süresinde 0,024 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık i_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin azaldığı (sırasıyla 0,466 mm^3/dak , 0,180 mm^3/dak ve 0,035 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.12'de, ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin sabit olarak alınıp boşalım akımı arttırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı çalışmada boşalım akımı dikkate alındığında, vurum süresi arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir.



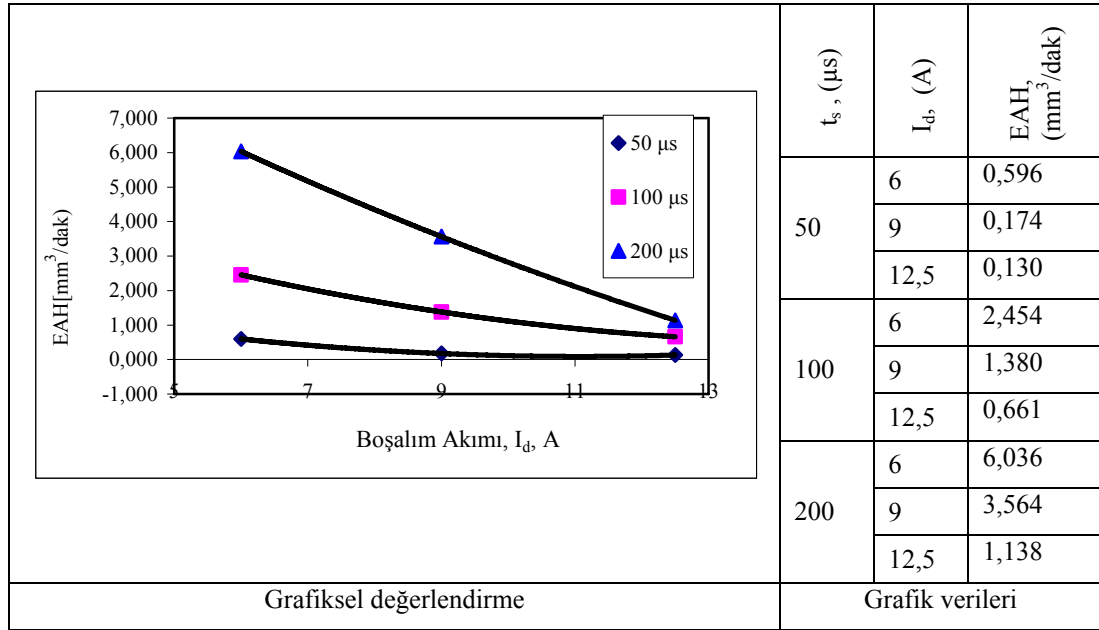
Şekil 5.12. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μs 'lik vurum süresinde 1,301 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μs 'lik vurum süresinde 0,046 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık i_d değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin azaldığı (*sırasıyla* 0,672 mm^3/dak , 0,271 mm^3/dak ve 0,110 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.13'de, cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı I_d dikkate alındığında, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μs 'lik vurum süresinde 6,036 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μs 'lik vurum süresinde 0,130 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımı

değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen elektrot aşınma hızı performans değerlerinin azaldığı (sırasıyla 2,454 mm^3/dak , 1,380 mm^3/dak ve 0,661 mm^3/dak) belirlenmiştir.

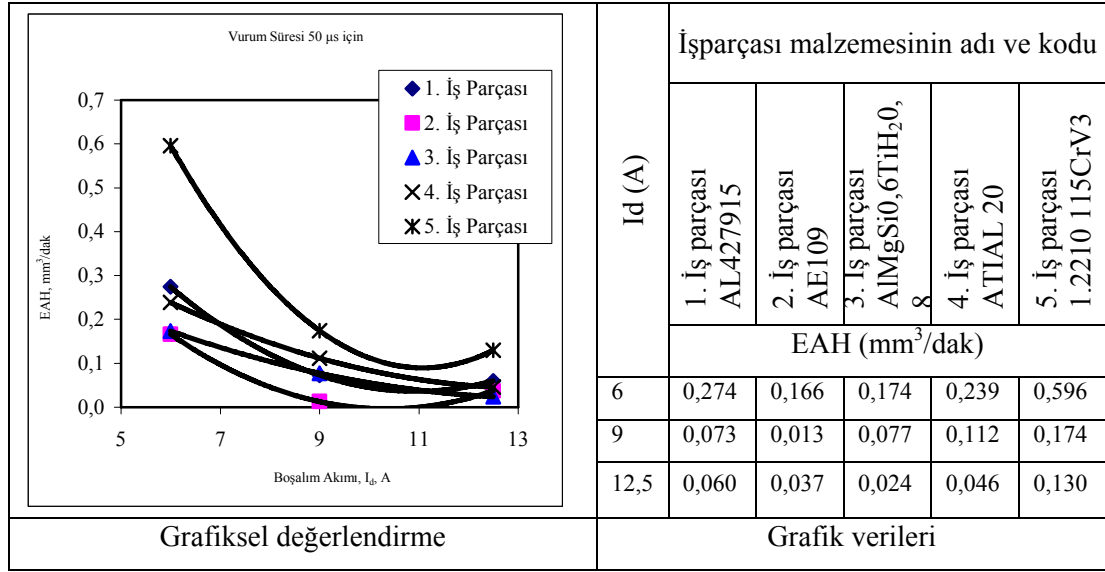


Şekil 5.13. Cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Beş farklı işparçası malzemesi için, 50 μs , 100 μs ve 200 μs 'lik vurum süresinde elektrot takımı elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişiminin gösterildiği Şekil 5.14. – Şekil 5.16'da görüldüğü üzere, boşalım akımı değişiminin elektrot aşınma hızı üzerine etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.14'de, beş farklı işparçası malzemelerinin deney numunelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 50 μs 'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişimi ayrıntılı olarak verilmiştir.

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin 1.nci işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, I_d değişiminin EAH üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının artışı ile doğru orantılı olarak EAH'nın düştüğü görülmüştür.

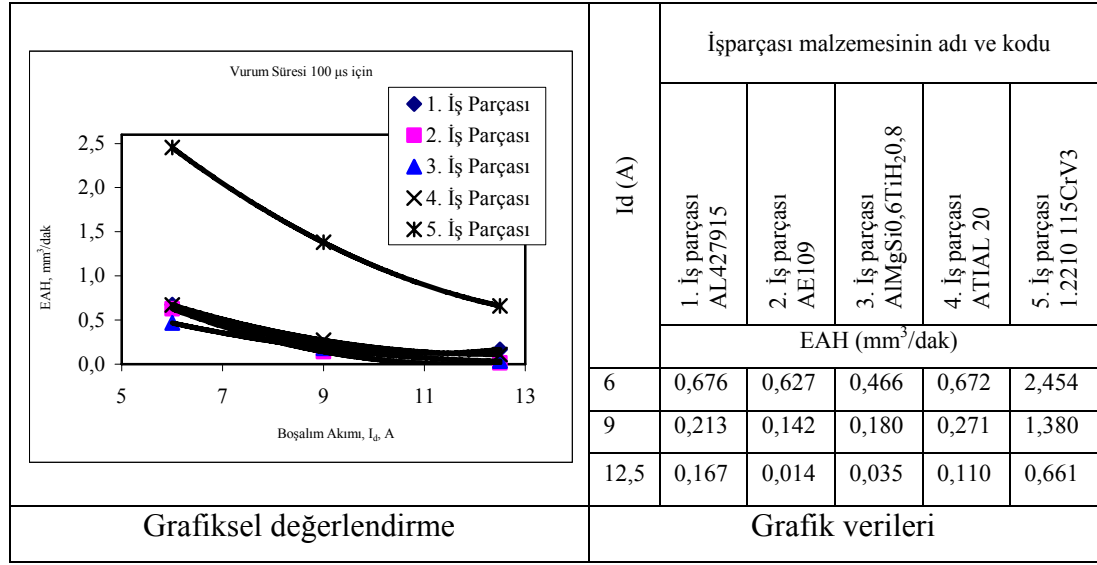


Şekil 5.14. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 50 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Aynı deneysel numunede, en düşük EAH, 12,5 A'lik boşalım akımında 0,060 mm³/dak'lık bir değer olarak elde edilmiştir. 3.ncü işparçası olarak AlMg1SiO,6TiH2O,8 MMK malzeme en düşük EAH ise, 9 A'lik boşalım akımında 0,013 mm³/dak'lık bir değer olarak elde edilmiştir. 2.nci işparçası olarak AE109 Al-MMK malzemenin kullanıldığı deneysel çalışmada ise en düşük EAH değeri, 12,5 A'lik boşalım akımında 0,024 mm³/dak olarak bulunmuştur.

Bu çalışma kapsamında, 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin 5.nci işparçası olarak kullanılan deneysel çalışma sonuçları da eş değer EAH çıktılarını vermiştir.

Şekil 5.15'de, beş farklı işparçası malzemeleri için, deney numunelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 100 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının boşalım akımı ile değişimi ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



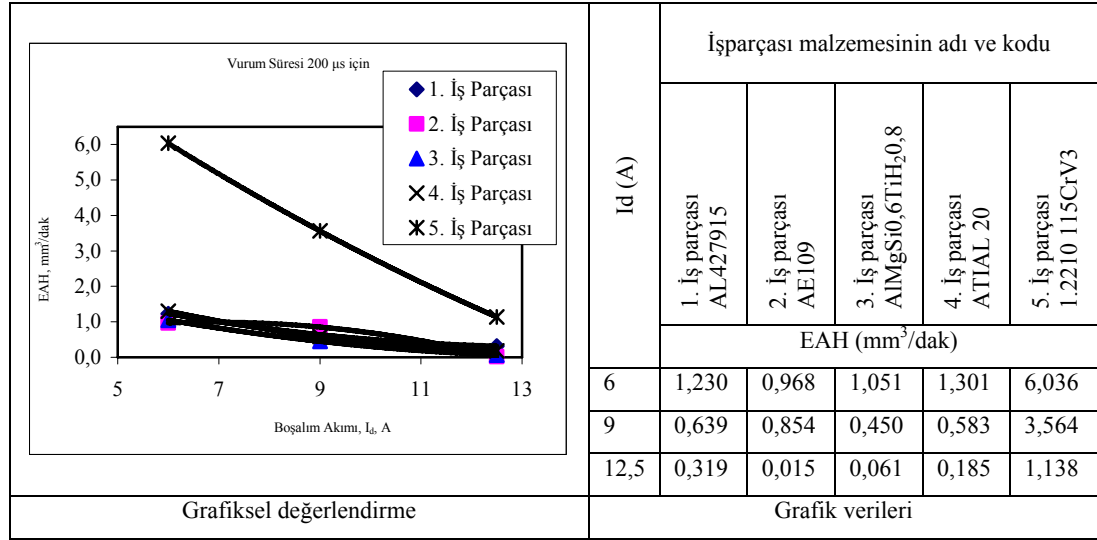
Şekil 5.15. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 100 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

İşparçası olarak kullanılan bütün deneysel numunelerde, I_d değişiminin EAH üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının artışı ile doğru orantılı olarak EAH'nın düştüğü görülmüştür.

Deneysel çalışmada kullanılan MMK malzemelerde en düşük EAH, 3.ncü işparçası olarak kullanılan AlMg1SiO,6TiH20,8 MMK malzemed, 12,5 A'lık boşalım akımında 0,014 mm³/dak'lık bir değer olarak elde edilmiştir. 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin 5.nci işparçası olarak kullanılan deneysel çalışma sonuçları da eş değer EAH çıktılarını vermiştir.

Şekil 5.16'da, farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 200 μ s'lik vurum süresinde EAH'nın I_d ile değişimi gösterilmiştir.

İşparçası olarak kullanılan bütün deneysel numunelerde, I_d değişiminin EAH üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün boşalım akımının artışı ile doğru orantılı olarak EAH'nın düştüğü görülmüştür. MMK malzemelerde en düşük



Şekil 5.16. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 200 μ s'lik vurum süresinde elektrot aşınma hızının (EAH) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

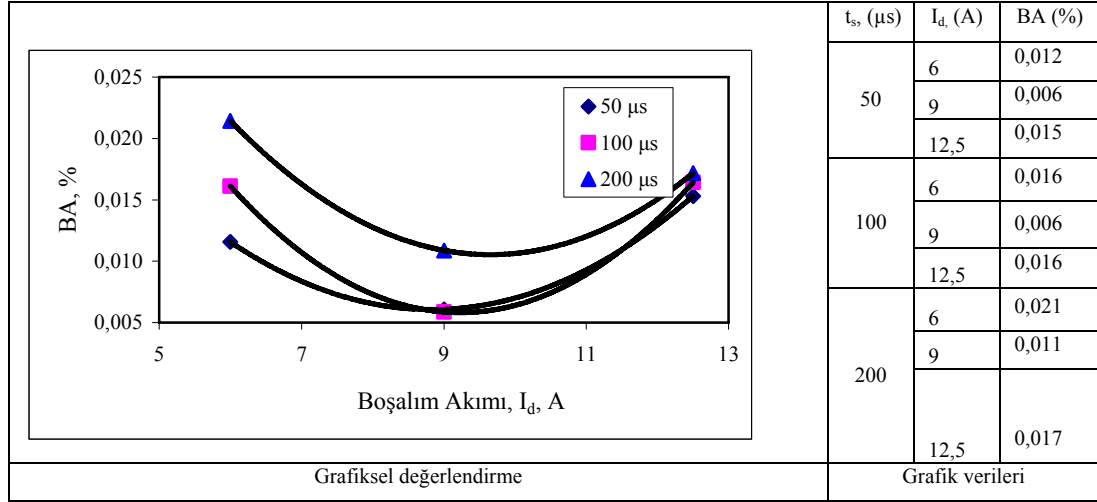
EAH, 3.ncü işparçası olarak kullanılan AlMg1SiO,6TiH20,8 MMK malzemedede, 12,5 A'lık boşalım akımında 0,015 mm³/dak'lık bir değer olarak elde edilmiştir. 4.ncü işparçası olarak mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ile soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin 5.nci işparçası olarak kullanılan deneysel çalışma sonuçları da eş değer EAH çıktılarını vermiştir.

5.2.3. Bağlı aşınmanın boşalım akımı ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.17. – Şekil 5.21'de boşalım akımına bağlı olarak beş farklı işparçası malzemesi için (Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH20,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin) BA'nın I_d ile değişimleri gösterilmiştir.

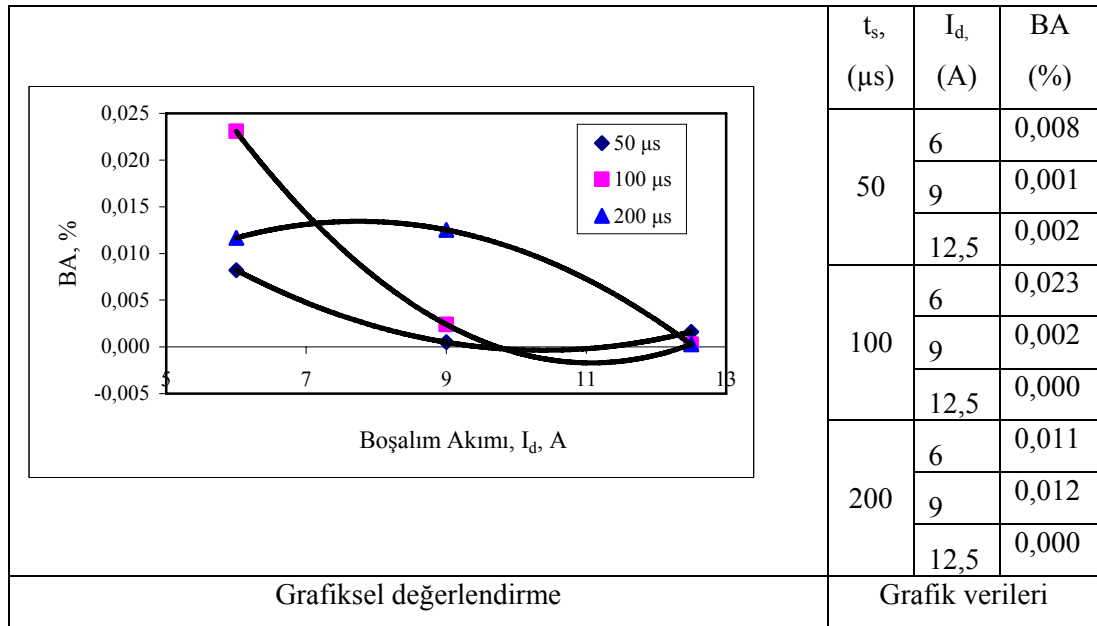
Şekil 5.17'de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesi ile BA'nın I_d ile değişimi gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, bütün t_s için 6 A ve 12,5 A'lık boşalım akımında, BA değerinde bir yükselme olduğu görülürken, 9 A'lık boşalım akımı değerinde ise % 40 ile %50 oranında BA'nın azaldığı görülmektedir. Bu malzeme için en

yüksek BA değeri, 200 μ s vurum süresinde 12,5 A boşalım akımında 0,017 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.17. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

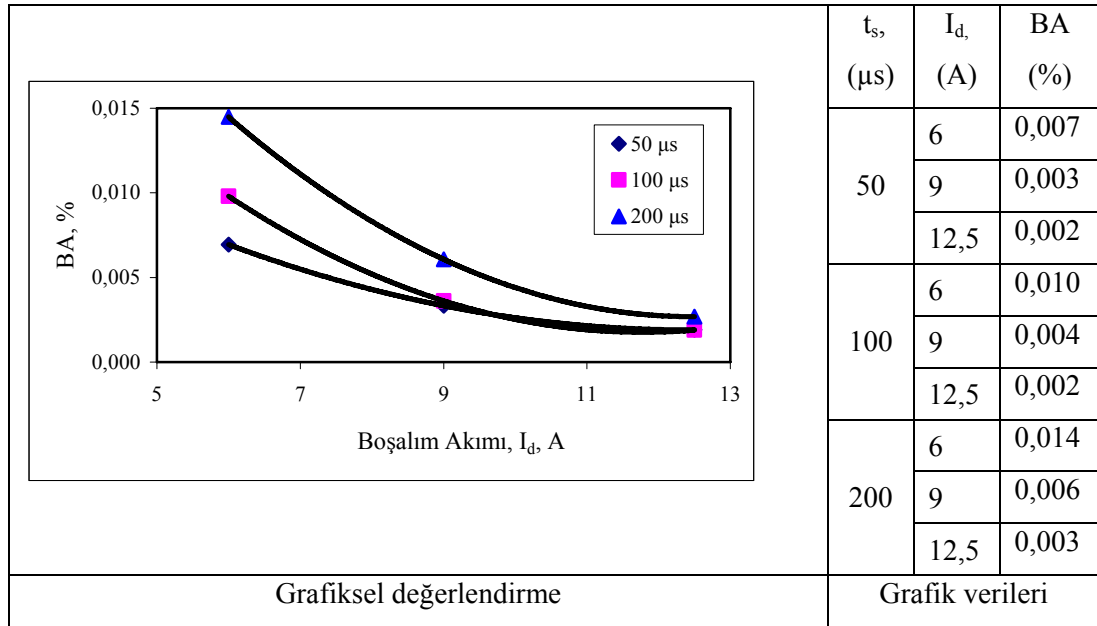
Şekil 5.18’de AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde BA’nın I_d ile değişimi gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, bütün t_s için 6 A’lık boşalım akımı hariç diğer değerler için BA’nın yok kabul edilebilecek değere sahip olduğu,



Şekil 5.18. AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

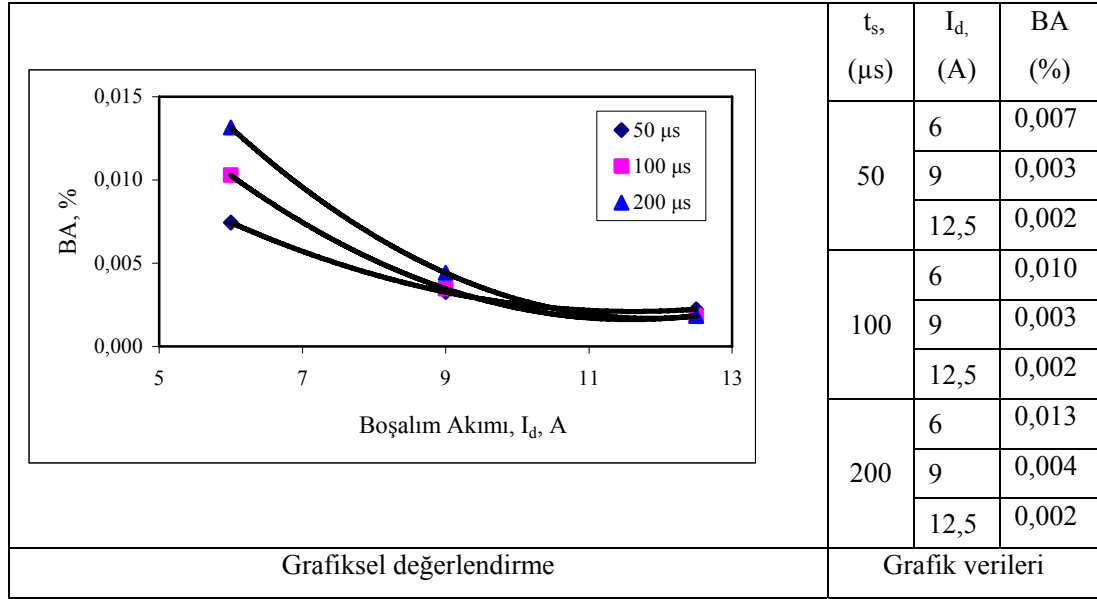
sadece 6 A'lık boşalım akımı değeri için bütün t_s için, bir değer söz konusu edilebileceği tespit edilmiştir. 200 μs t_s için ise, elde edilen BA değerlerinin, bütün boşalım akımlarında sıfıra çok yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen bu eğri, diğerlerine nazaran artarak azalan bir seyir göstermektedir. Bu eğride gözlenen farklılığın muhtemel nedeni, malzemenin emdirme yöntemi ile elde edilen poroziteli bir MMK malzeme olmasına atfedilmiştir.

Şekil 5.19'de AlMg1SiO,6-TiH₂0.8 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde BA'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin büyüklüğü ile BA ters orantılıdır. Kullanılan üç t_s için boşalım akımının azaltılması ile BA değerinin de arttığı görülmektedir. Bütün t_s için boşalım akımının artması, BA'da diğerlerinden farklı olarak yüksek eğimli doğrusal bir azalışa neden olduğu ifade edilebilir.



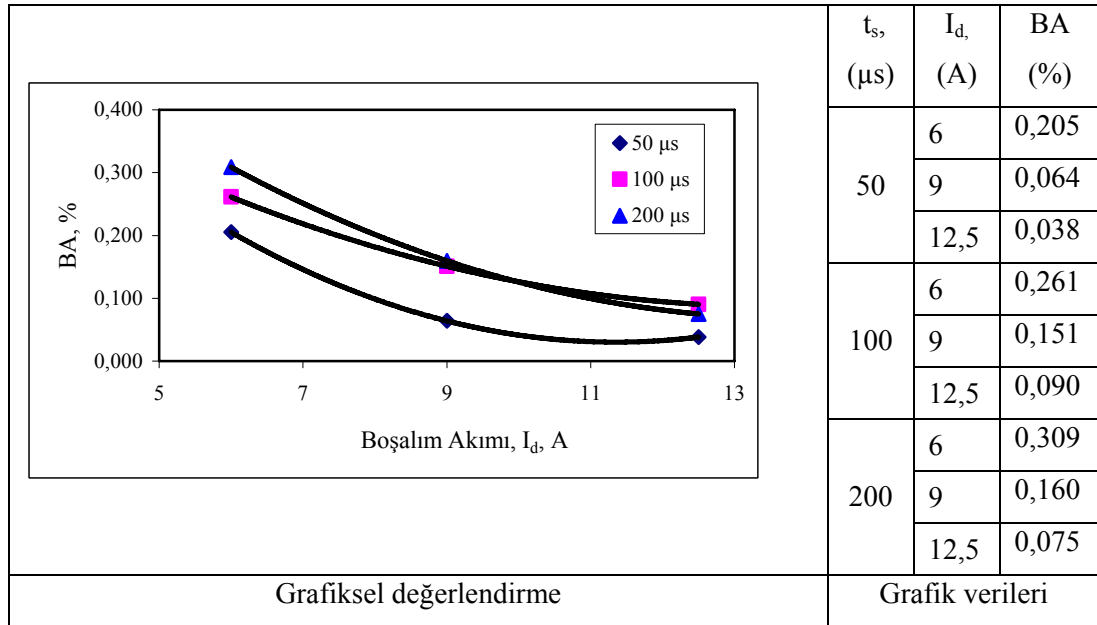
Şekil 5.19. AlMg1SiO,6-TiH₂0.8 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Şekil 5.20'de, ETIAL 20 malzemesinin işlenmesinde BA'nın I_d ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit alınıp I_d artırılırsa, BA değeri düşmektedir. Uygulamada bütün t_s için 6 A'lık I_d değerinde ise, BA'da sürekli bir artış gözlenmiştir. 12,5 A'lık boşalım akımının uygulanmasında da, BA değeri bütün t_s için aynı sonucu vermiştir.



Şekil 5.20. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

Şekil 5.21’de, cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın I_d ile değişimi incelendiğinde, vurum süresi değerinin büyüklüğü ile BA boşalım akımının artmasına bağlı olarak ters orantılı bir ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Bütün t_s değerleri için I_d değerlerinin artması, BA’da sürekli



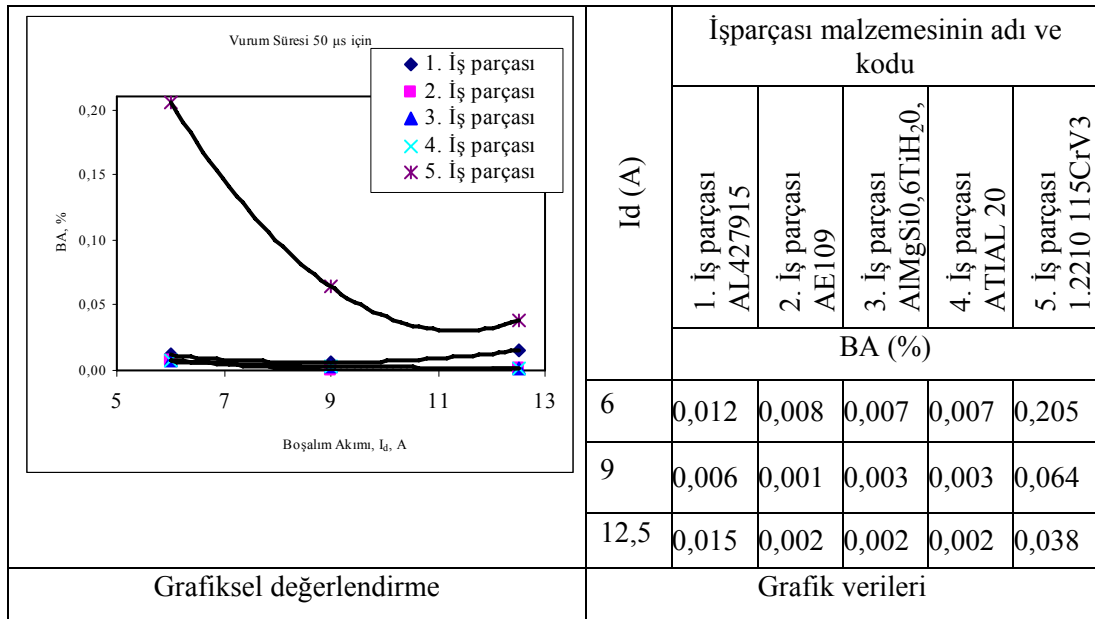
Şekil 5.21. Cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

bir azalışa neden ol muştur. 100 ve 200 μ s vurum sürelerinde, 9 ve 12,5 A'lık boşalım akımlarında BA'nın eşdeğere yakın bir seyir gösterdiği görülmektedir.

Şekil 5.22. – Şekil 5.24'de ise, farklı iş parçası malzemeleri için 50 μ s, 100 μ s ve 200 μ s'lik vurum süresi için, BA'nın I_d ile değişimi gösterilmiştir. Her bir grafiğin incelenmesi sonucu, I_d değişiminin, BA üzerine etkisi olduğu bütün iş parçası malzemeleri için tespit edilmiştir.

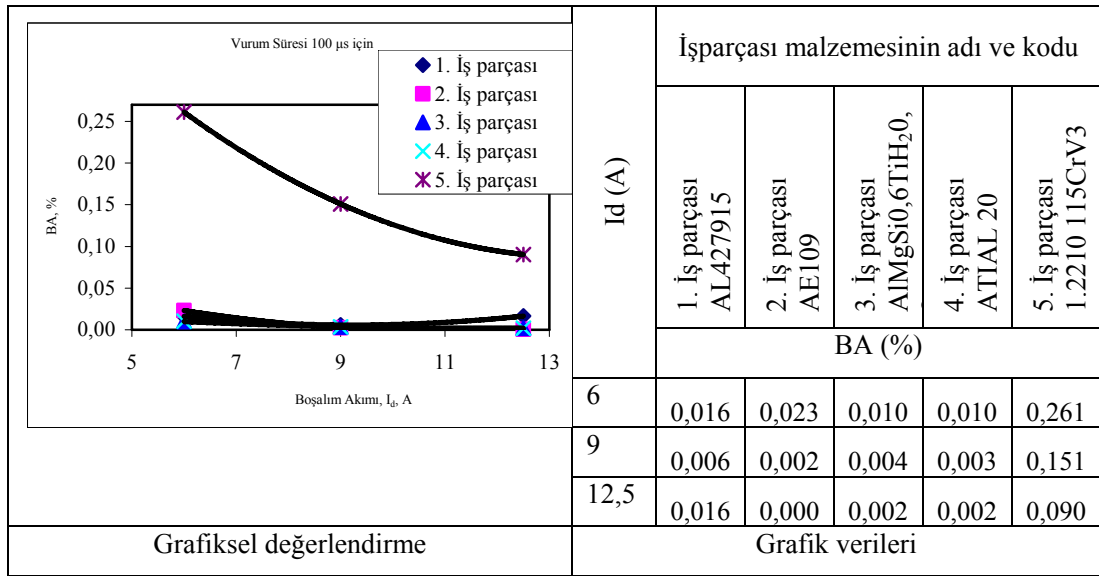
AL427915 Al/Cu MMK malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, boşalım akımı değişiminin vurum süresi değişimi ile ilişkili olarak bağıl aşınma üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; bağıl aşınmanın eşdeğer sonuç verdiği görülmüştür. Bu durum, AlMg1Si0,6TiH20,8 MMK malzeme ile AE109 Al-MMK malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusu olduğu belirlenmiştir.

Bu husus, 6 A'lık I_d değerinde yüksek olarak görülürken, diğer I_d değerleri için ise oldukça küçük olarak tespit edilmiştir. Mukayese amaçlı işlenen ETIAL 20 malzeme

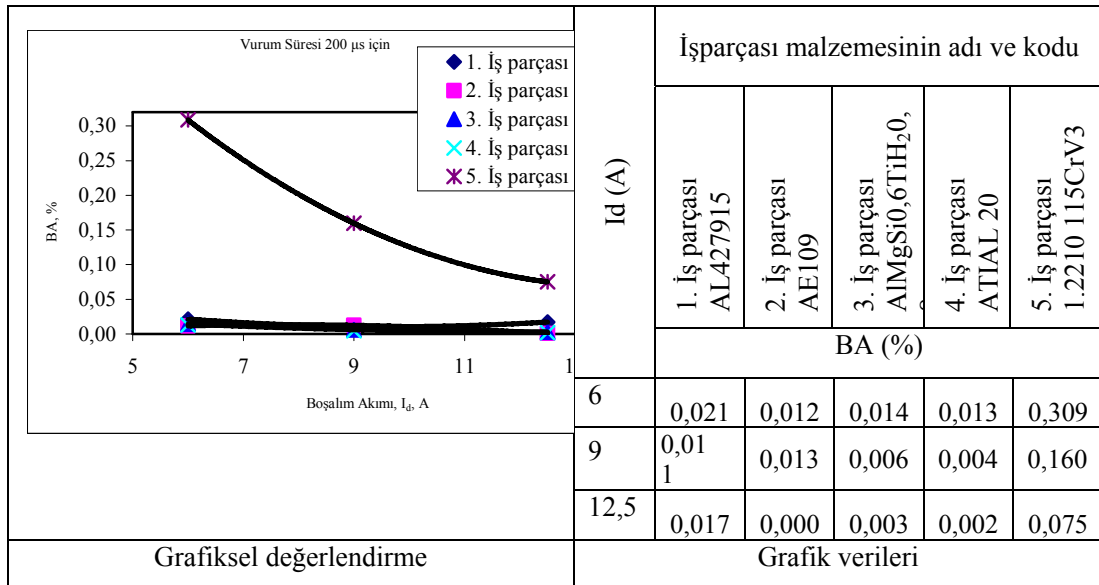


Şekil 5.22. Farklı iş parçası malzemelerinin 50 μ s'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

için de performans çıktıları benzerlik gösterirken; 1.2210 115CrV3 malzemenin deneysel sonuçları, diğer iş parçası deneysel numunelerin malzemelerinin sonuçlarına göre daha belirgin performans çıktıları vermiştir. Bu hususun, MMK malzemelerle çelik türü diğer metal malzemeler arasında belirgin doku ve yapı farklılıklarından olduğu sanılmaktadır.



Şekil 5.23. Farklı iş parçası malzemelerinin 100 µs'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın I_d ile değişimi



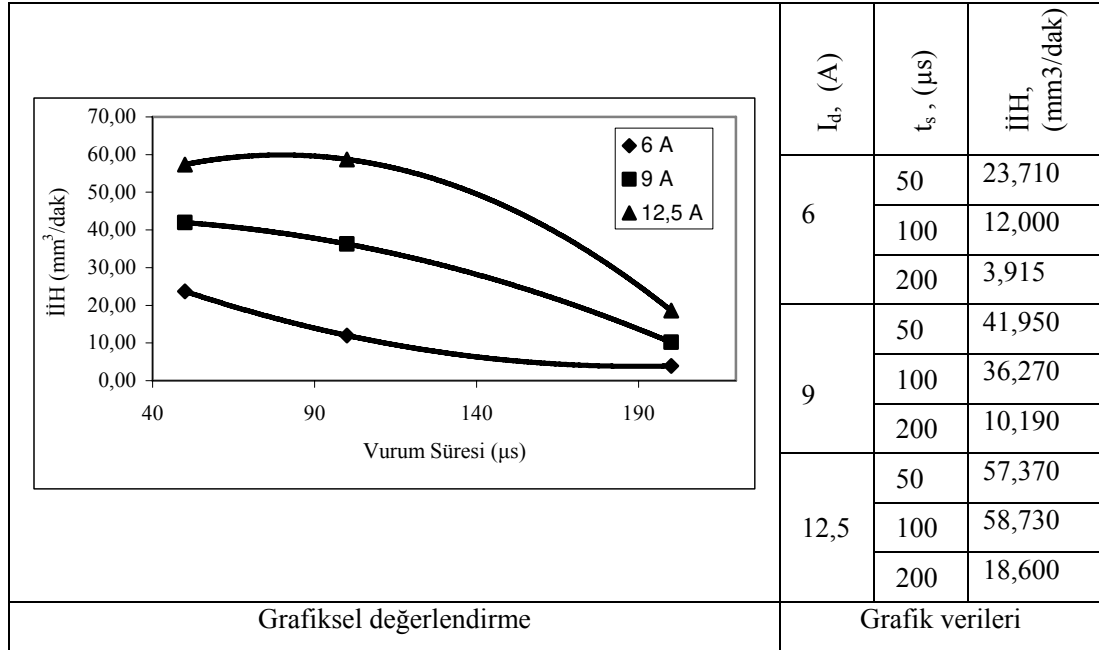
Şekil 5.24. Farklı iş parçası malzemelerinin 200 µs'lik vurum süresinde elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) boşalım akımı (I_d) ile değişimi

5.3. İş Parçası İşleme Hızının (İİH), Elektrot Aşınma Hızının (EAH) ve Bağlı Aşınmanın (BA) Vurum Süresi (t_s) Değişimi İtibariyle Değerlendirilmesi

Bu deneysel çalışmada, vurum süresinin 25 μs , 50 μs ve 100 μs ve akım değerlerinin 6 A, 9 A ve 12,5 A şeklinde kademeli olarak uygulanması sonucunda; bütün deneyler için $t_{işleme}$ değerinin, bu parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermiş olduğu tespit edilmiştir.

5.3.1. İşparçası işleme hızının vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.25. – Şekil 5.29’da vurum süresine bağlı olarak beş farklı malzemenin (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH20.8 MMK malzeme, ticari alüminyum ETIAL 20 malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin*) İİH’nın t_s ile değişimleri gösterilmiştir.

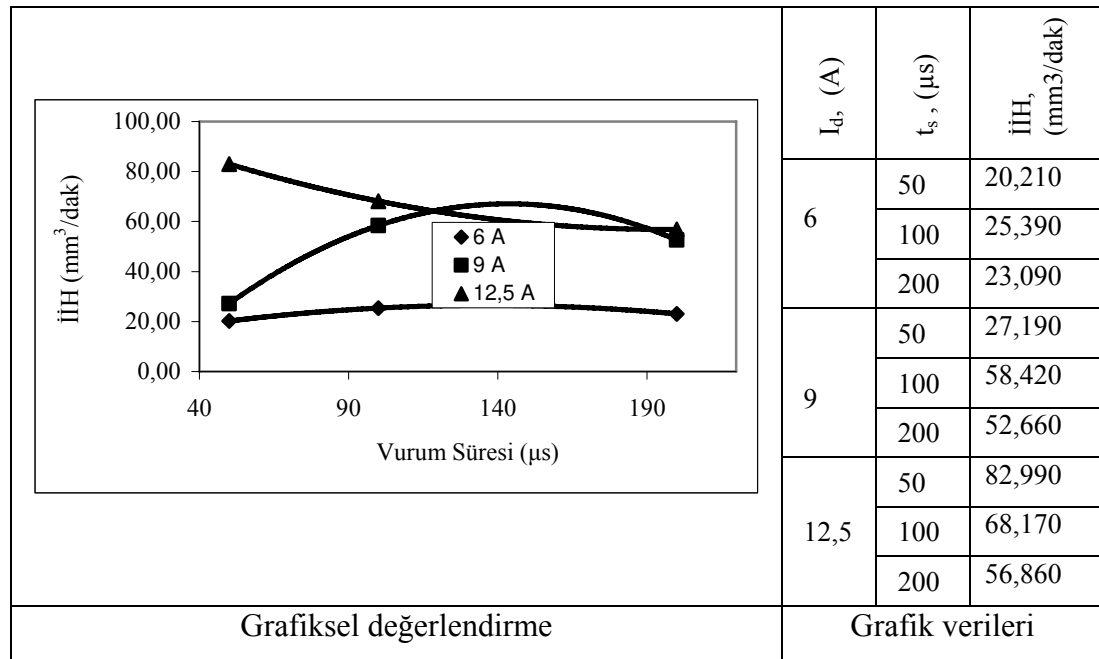


Şekil 5.25. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.25’de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin İİH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH performans değerinin artmakta olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH performans değerinin ise azaldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, en yüksek İİH performansı, 12,5 A’lik boşalım akımında ve 100 μs ’lik vurum süresinde 58,730 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük İİH performansı ise, 6 A’lik boşalım akımında ve 200 μs ’lik vurum süresinde 3,915 mm^3/dak ’lık bir değer olarak belirlenmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lik I_d değerlerinde 100 μs ’lik vurum süresinde elde edilen İİH performans değerlerinin boşalım akımına bağlı orantılı olarak yükseldiği (*sırasıyla 12,000, 36,270 ve 58,730 mm^3/dak*) görülmüştür.

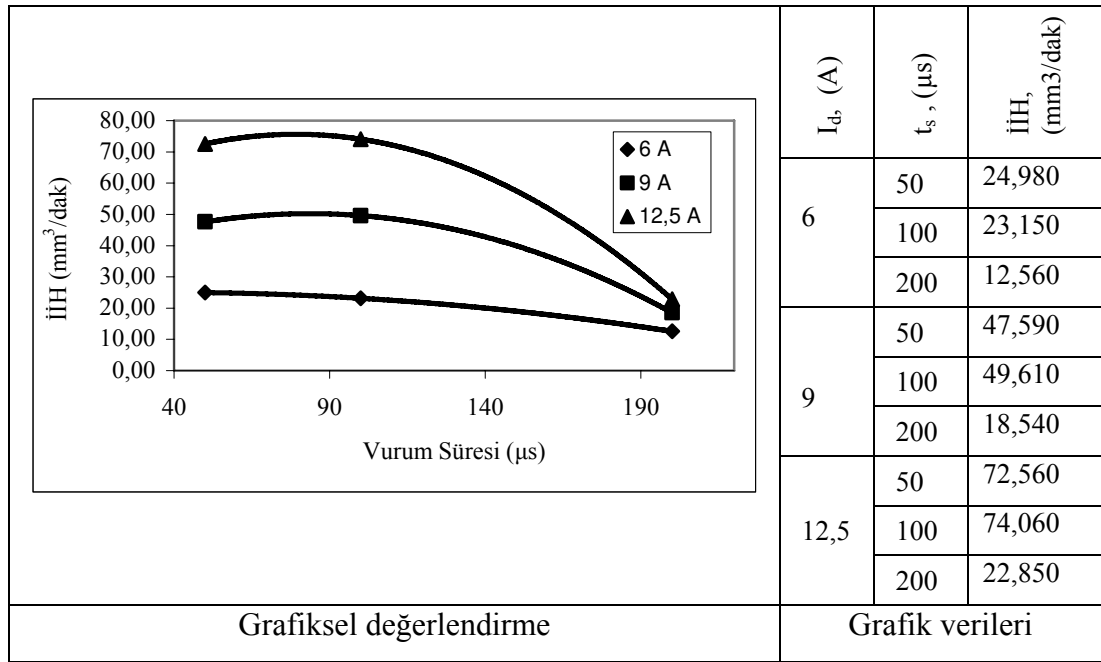
Şekil 5.26’da, AE109 al-MMK malzemesinin İİH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH performans değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH performans değerinin ise azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.26. AE109 Al-MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Bu çalışmada, en yüksek İİH performansı, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μ s'lik vurum süresinde 82,990 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük İİH performansı ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 50 μ s'lik vurum süresinde 20,210 mm^3/dak 'lık bir değer belirlenmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık I_d değerlerinde 100 μ s'lik vurum süresinde elde edilen İİH performans değerlerinin ise yükseldiği (*sırasıyla 25,390, 58,420 ve 68,170 mm^3/dak*) görülmüştür.

Şekil 5.27'de, $\text{AlMg1SiO}_6\text{TiH}_2\text{O}_8$ MMK malzemesinin İİH'nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH performans değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH performans değerinin ise azaldığı görülmektedir.

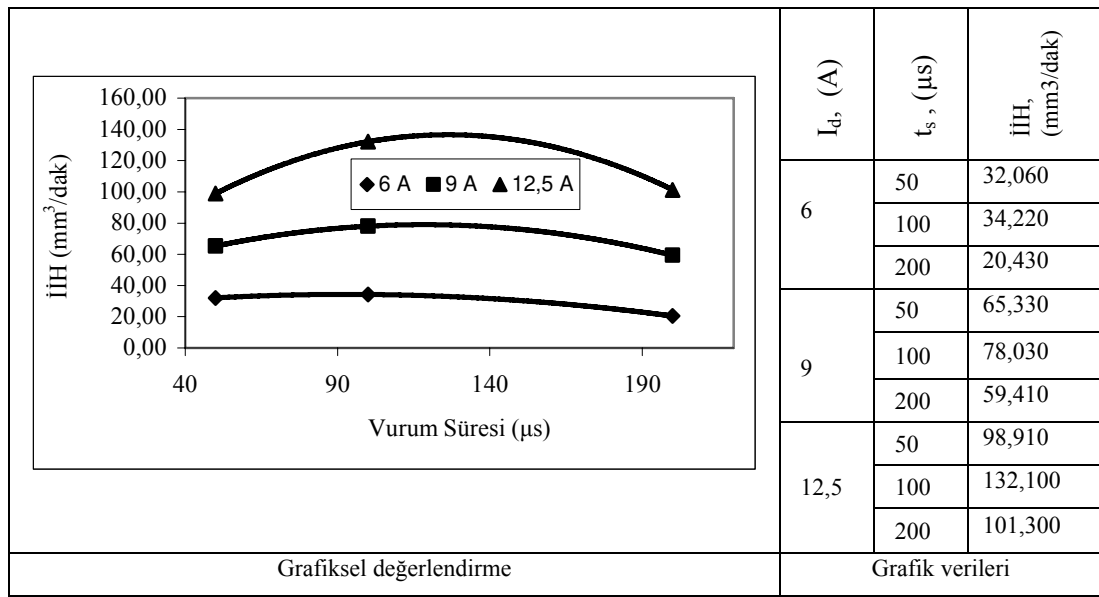


Şekil 5.27. $\text{AlMg1SiO}_6\text{TiH}_2\text{O}_8$ MMK malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Bu çalışmada, en yüksek İİH performansı 12,5 A'lık boşalım akımında ve 100 μ s'lik vurum süresinde 74,060 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük İİH performansı ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μ s'lik vurum süresinde 12,560 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımı değerlerinde 100 μ s'lik vurum süresinde elde edilen İİH performans

değerlerinin orantılı olarak yükseldiği (sırasıyla 23,150, 49,610 ve 74,060 mm³/dak) görülmüştür.

Şekil 5.28’de, ETIAL-20 malzemesinin İİH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH performans değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH performans değerinin ise 100 μs t_s değerindeki İİH değişikliği hariç azaldığı görülmektedir.

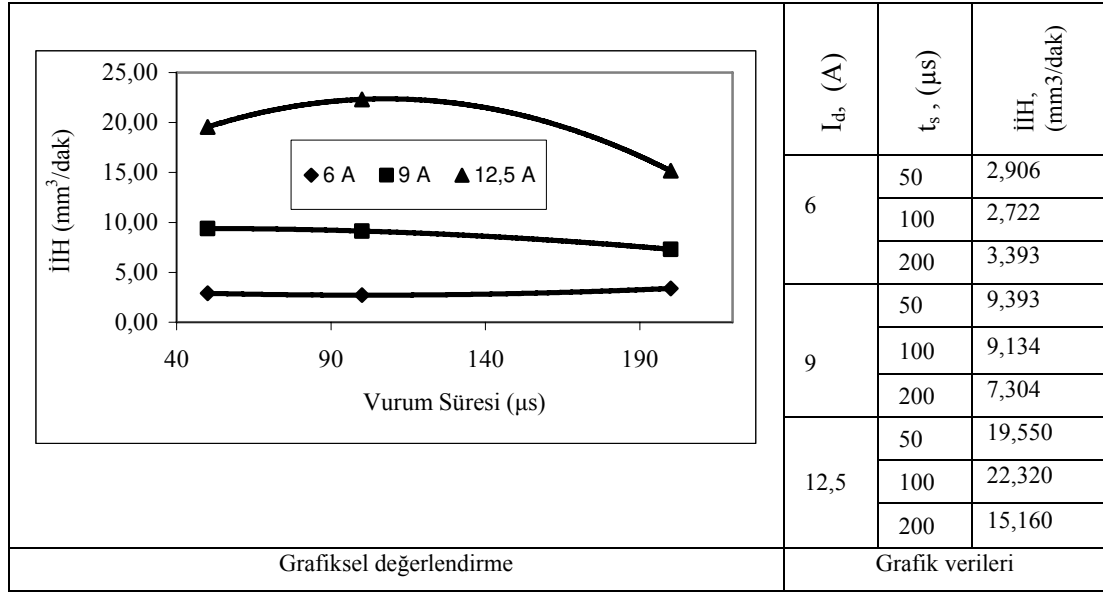


Şekil 5.28. ETIAL-20 malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Çalışma kapsamında, en yüksek İİH performansı 12,5 A’lık boşalım akımında ve 100 μs ’lik vurum süresinde 132,100 mm³/dak’lık bir değer olarak görülmüştür. En düşük İİH performansı ise, 6 A’lık boşalım akımında ve 200 μs ’lik vurum süresinde 20,430 mm³/dak’lık bir değer tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lik I_d değerlerinde 100 μs ’lik vurum süresinde elde edilen İİH performans değerlerinin orantılı olarak yükseldiği (sırasıyla 34,220, 78,030 ve 132,100 mm³/dak) elde edilmiştir. Bu değerler, diğer işleme şartlarına göre optimum performans sonuçlarını vermektedir.

Şekil 5.29’de, 1.2210 115CrV3 malzemesinin İİH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, İİH performans değerinin artmakta olduğu tespit

edilmiştir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, İİH performans değerinin ise bazı İİH değişiklikleri hariç azaldığı görülmektedir.

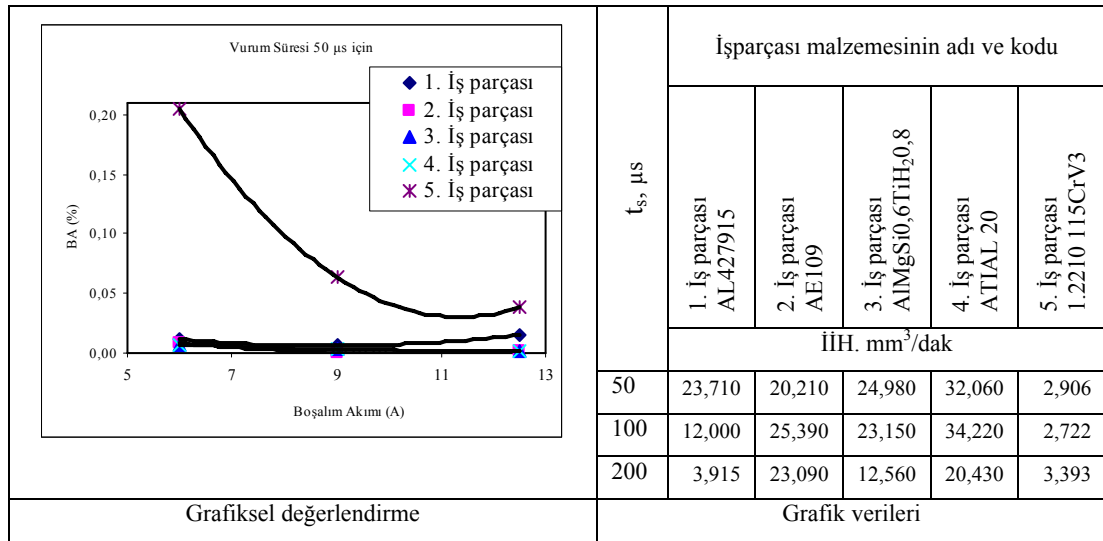


Şekil 5.29. 1.2210 115CrV3 malzemesinin işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

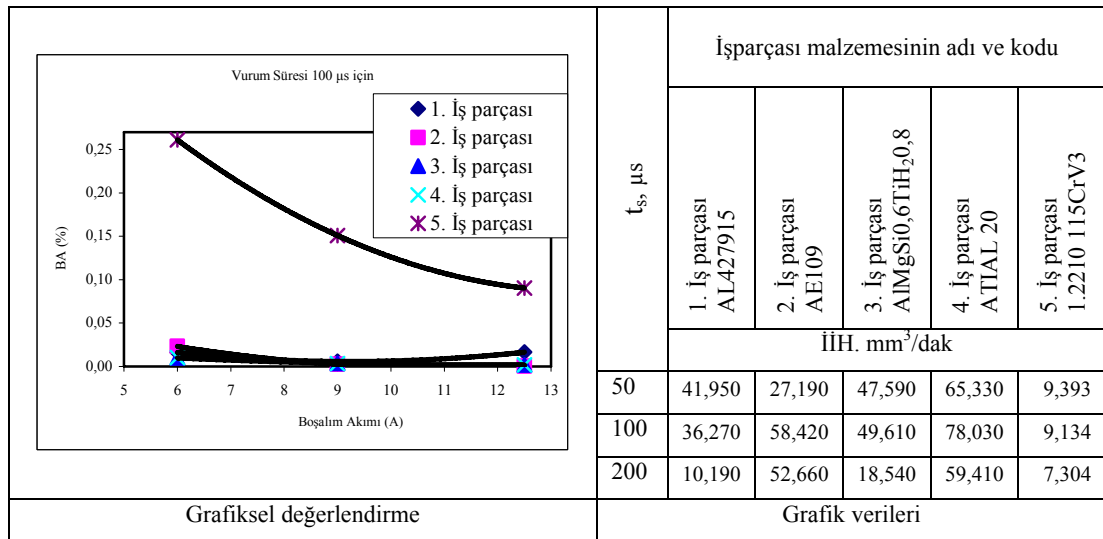
Bu çalışmada, en yüksek iş parçası işleme hızı performansı 12,5 A'lık boşalım akımında ve 100 μ s'lik vurum süresinde 22,320 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük iş parçası işleme hızı performansı ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 100 μ s'lik vurum süresinde 2,722 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6, 9 ve 12,5 A'lık boşalım akımı değerlerinde 100 μ s'lik vurum süresinde elde edilen İİH performans değerlerinin orantılı olarak yükseldiği (*sırasıyla* 2,722, 9,134 ve 22,320 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.30. – Şekil 5.32'de ise, deneysel çalışmada kullanılan işparçası malzemeleri için 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımında İİH'nın t_s ile değişiminin ilişkisi gösterilmiştir.

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin kullanıldığı deneysel numunelerde, t_s değişiminin İİH üzerine olan etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün vurum süresinde boşalım akımının artışı ile ters orantılı olarak İİH ile ilişkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, en yüksek iş parçası işleme hızı performansı 12,5 A'lık

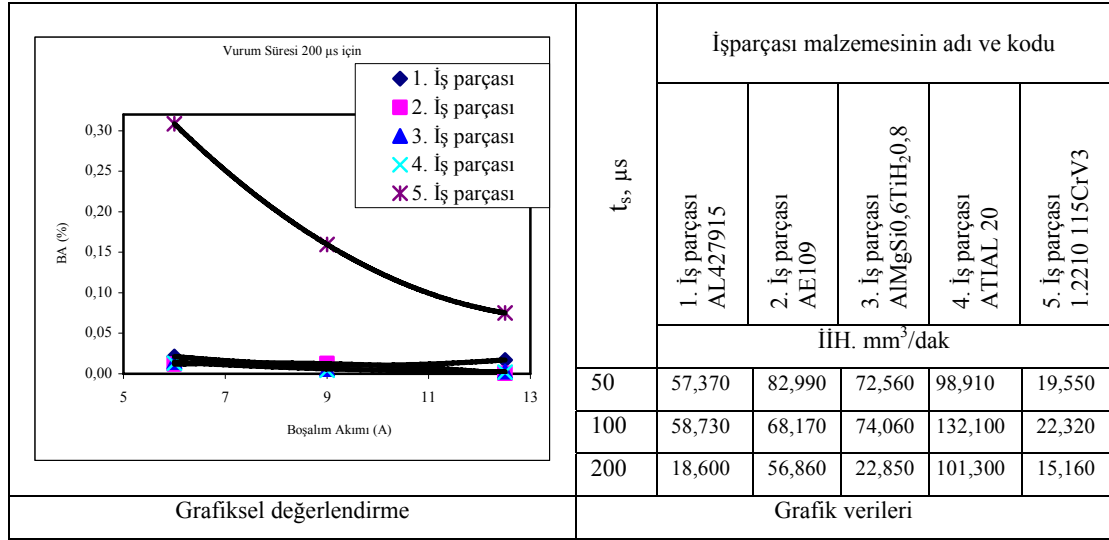


Şekil 5.30. Farklı iş parçası malzemelerinin 6 A'lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi



Şekil 5.31. Farklı iş parçası malzemelerinin 9 A'lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde işparçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

boşalım akımında ve 100 μ s'lik vurum süresinde 58,730 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük iş parçası işleme hızı performansı ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μ s'lik vurum süresinde 3,915 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.32. Farklı iş parçası malzemelerinin 12,5 A'lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde iş parçası işleme hızının (İİH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

AE109 Al-MMK malzemenin işlenmesi sürecinde ise, en yüksek iş parçası işleme hızı performansı 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μ s'lik vurum süresinde 82,990 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük iş parçası işleme hızı performansı ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 50 μ s'lik vurum süresinde 20,980 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir.

Bu durum, AlMg1Si0,6TiH20,8 MMK malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusudur. Mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 malzeme ile 1.2210 115CrV3 malzemenin deneysel sonuçları da benzer performans çıktıları vermiştir.

Genel olarak, MMK türü malzemelerde olmak üzere bütün I_d değerleri dikkate alınarak her bir t_s değeri için bir değerlendirme yapıldığında; 6 A / 50 μ s için en yüksek İİH performans değeri 24,980 mm^3/dak 'lık bir değer olarak 3. iş parçasında elde edilmiştir. En düşük İİH performans değerinin ise, 6 A / 50 μ s için 20,210 mm^3/dak 'lık bir değer olarak 2. iş parçasında elde edilmiştir. Bu değerlendirmeyi bütün işleme parametrik değerleri bakımından yaptığımız da ise; 12,5 A / 50 μ s için en yüksek İİH performans değeri 82,990 mm^3/dak 'lık bir değer olarak 3. iş parçasında

elde edilmiştir. En düşük İİH performans değerinin ise, 6 A / 200 μ s için 3,915 mm³/dak'lık bir değer olarak 1. işparçasında elde edilmiştir.

Mukayese amaçlı 4 ve 5. işparçası malzemelerinin genel performans değerleri göz önüne alınarak bir değerlendirme yapıldığında, EEİ yönteminin MMK malzemelerin işlenmesinde İİH yönüyle uygun olduğu ifade edilebilir. MMK malzemelerin matris malzemesinin alüminyum olması ise, MMK malzemelerin EEİ ile işlenmesini olumlu olarak etkilemiştir.

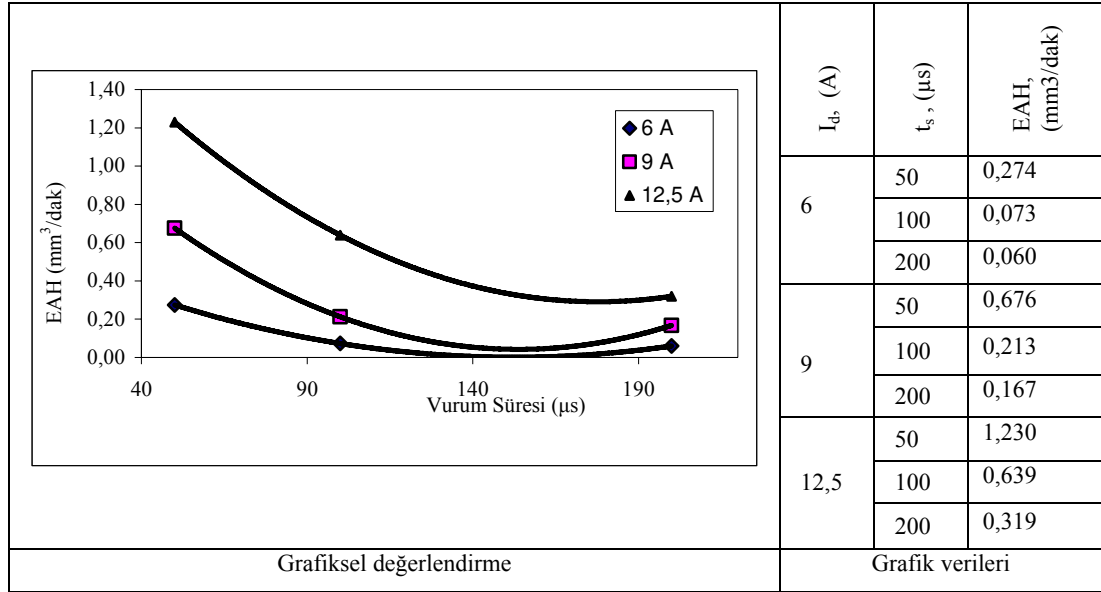
5.3.2. Elektrot aşınma hızının vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.33. – Şekil 5.37’de vurum süresine bağlı olarak beş farklı işparçası malzemesi için (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al-MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH20,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin*) kullanılan elektrot takımı EAH’nın t_s ile değişimleri gösterilmiştir.

Şekil 5.33’de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH’nın da artmakta olduğu görülmektedir.

Bu yaklaşımın tersi olarak I_d sabit alınıp, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 12,5 A’lık I_d ve 50 μ s’lik t_s işleme parametrik şartlarında 1,230 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 6 A’lık boşalım akımında ve 200 μ s’lik vurum süresinde 0,060 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lık I_d değerlerinde 100 μ s’lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin oransal olarak yükseldiği (sırasıyla 0,073 mm³/dak, 0,213 mm³/dak ve 0,639 mm³/dak) görülmüştür.



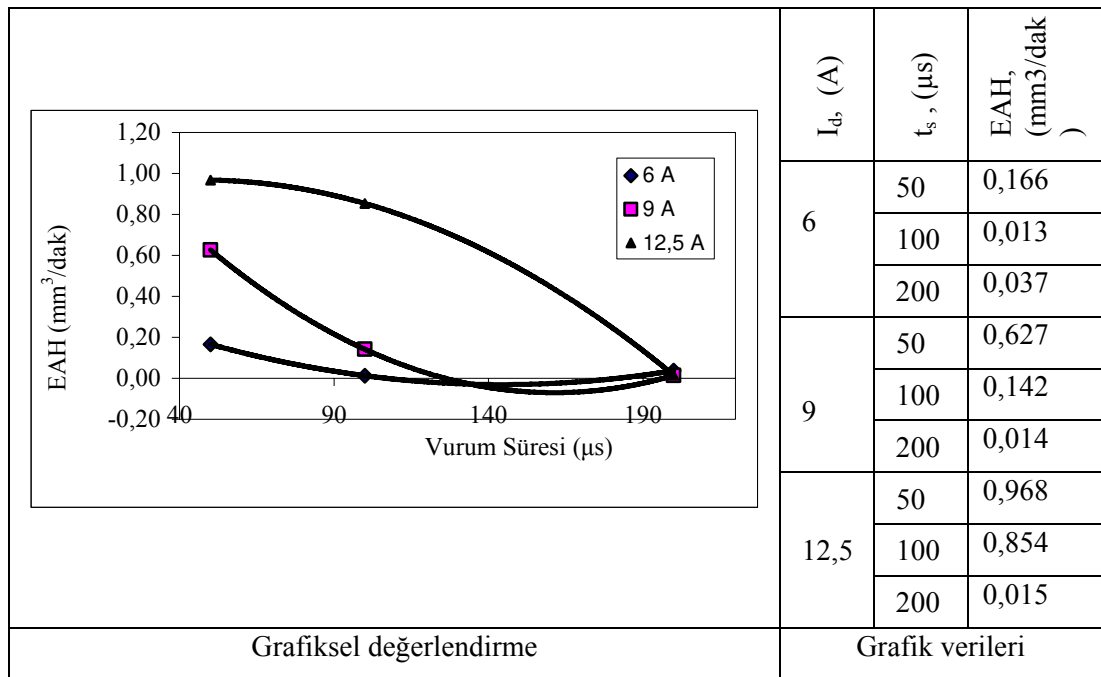
Şekil 5.33. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.34’de, AE109 Al-MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde ise, t_s sabit olarak alınıp I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH’nın bütün boşalım akımlarının 50 μs ve 100 μs vurum süreleri için artmakta olduğu görülmektedir.

Aynı çalışma kapsamında, I_d sabit olarak alınıp, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Bunun muhtemel nedeni, bu malzemenin üretim yöntemi ile MMK malzemenin poroziteli yapısı olarak ifade edilebilir.

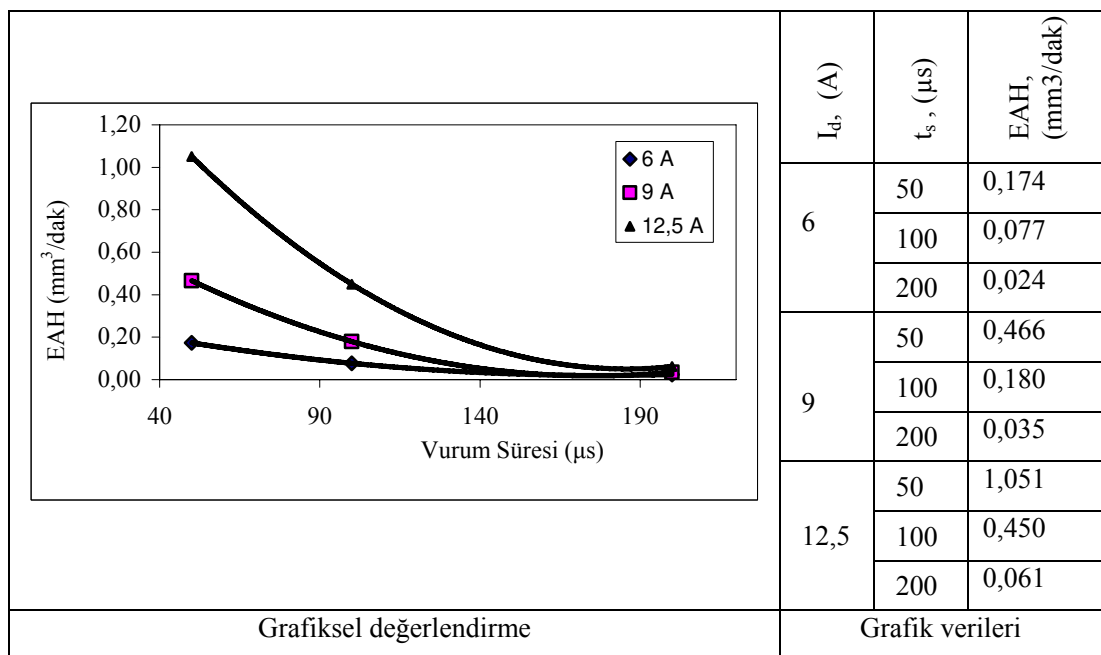
Bu çalışmada, en yüksek EAH, 6 A’lık boşalım akımında ve 200 μs ’lik vurum süresinde 0,968 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 9 A’lık boşalım akımında ve 50 μs ’lik vurum süresinde 0,013 mm^3/dak ’lık bir değer olarak elde edilmiştir.

Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A’lık boşalım akımı değerlerinde 100 μs ’lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin azaldığı (sırasıyla 0,627 mm^3/dak , 0,142 mm^3/dak ve 0,014 mm^3/dak) görülmüştür.



Şekil 5.34. AE109 Al-MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot takımının elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.35’de, AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının EAH’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d

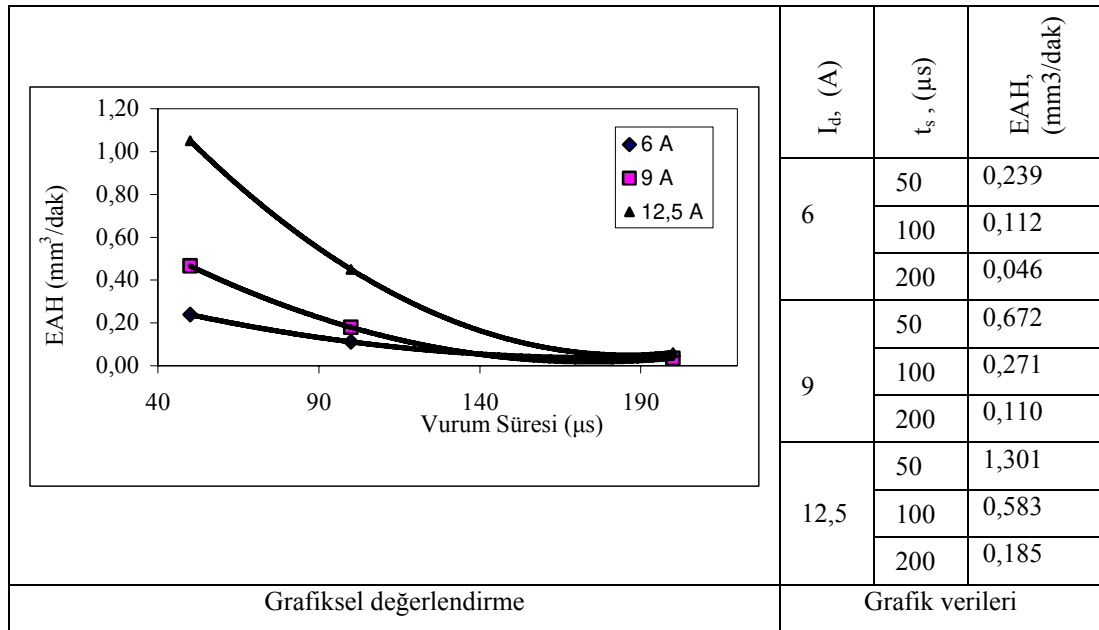


Şekil 5.35. AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

arttırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın azalmakta olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, I_d sabit olarak alınıp t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, en yüksek EAH, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μs 'lik vurum süresinde 1,051 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μs 'lik vurum süresinde 0,024 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımı değerlerinde 100 μs 'lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin arttığı (sırasıyla 0,077 mm^3/dak , 0,180 mm^3/dak ve 0,450 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.36'da, ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH'nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp, I_d arttırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın artmakta olduğu görülmektedir. Aynı şekilde I_d sabit olarak alınıp, t_s arttırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, en yüksek EAH, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 50 μs 'lik vurum süresinde 1,301 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μs 'lik vurum süresinde 0,046 mm^3/dak 'lık



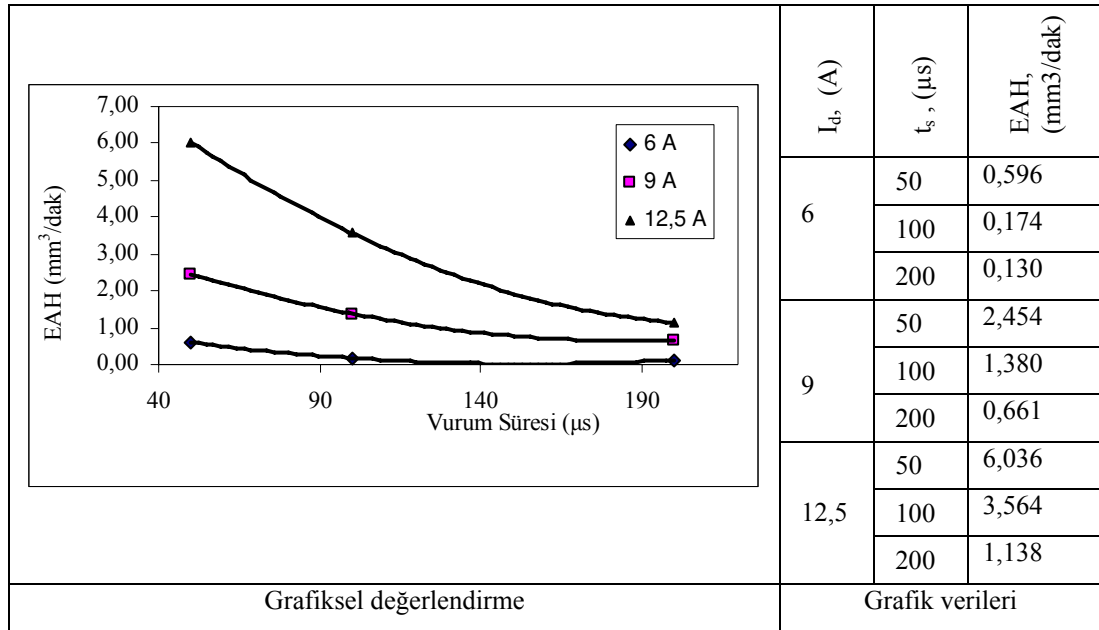
Şekil 5.36. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

bir değer olarak elde edilmiştir. Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımı değerlerinde 100 μ s'lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin arttığı (sırasıyla 0,112 mm^3/dak , 0,271 mm^3/dak ve 0,583 mm^3/dak) görülmüştür.

Şekil 5.37'de, cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımı EAH'nın t_s ile değişimi incelendiğinde, t_s sabit olarak alınıp I_d artırıldıkça, elektrot takımı EAH'nın artmakta olduğu görülmektedir. Aynı şekilde I_d sabit olarak alınıp, t_s artırıldıkça, elektrot takımı EAH değerinin azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

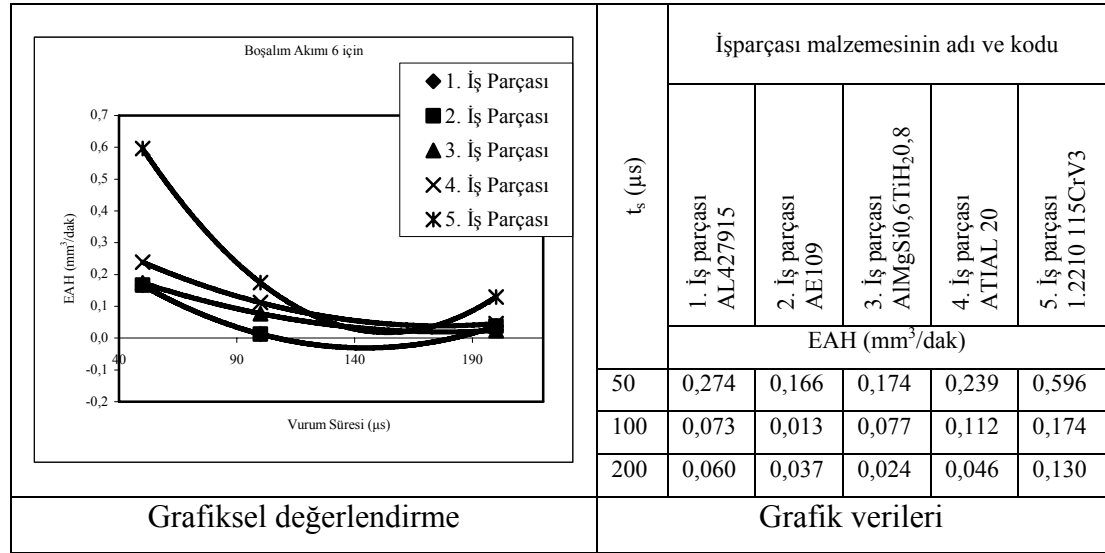
Bu çalışmada, en yüksek EAH, 12,5 A'lık boşalım akımında ve 200 μ s'lik vurum süresinde 6,036 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir. En düşük EAH ise, 6 A'lık boşalım akımında ve 200 μ s'lik vurum süresinde 0,130 mm^3/dak 'lık bir değer olarak elde edilmiştir.

Aynı çalışmada, 6 A, 9 A ve 12,5 A'lık boşalım akımı değerlerinde 100 μ s'lik vurum süresinde elde edilen EAH değerlerinin arttığı (sırasıyla 0,174 mm^3/dak , 1,380 mm^3/dak ve 3,564 mm^3/dak) görülmüştür.



Şekil 5.37. Cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin EEİ tekniği ile işlenmesinde elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.38 – Şekil 5.40’da da beş farklı işparçası malzemesi için 6 A, 9 A ve 12,5 A’lık boşalım akımında elektrot takımı EAH’nın t_s ile değişimi gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi t_s değişiminin, EAH üzerine etkisi olduğu görülmüştür.



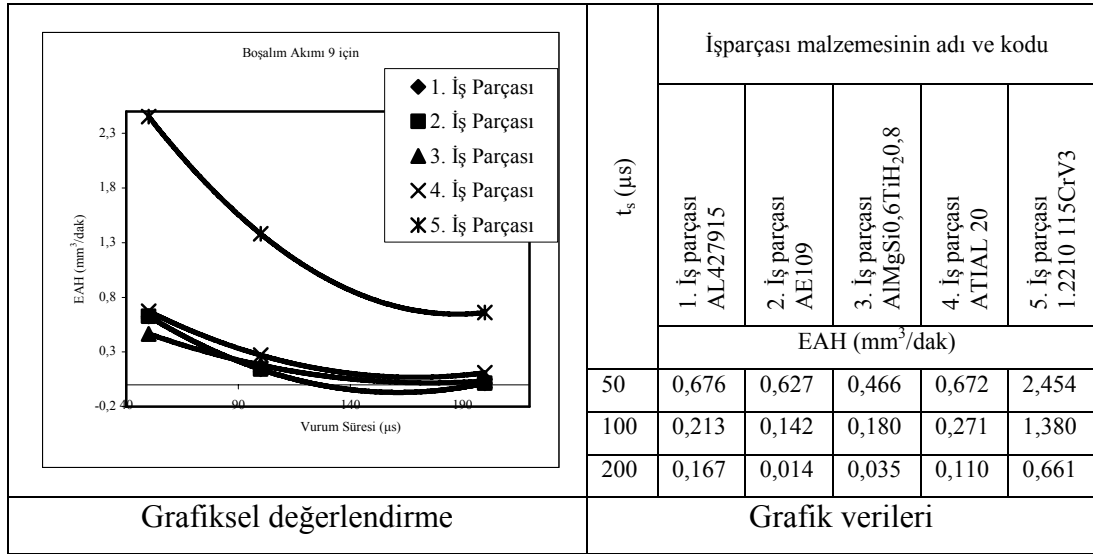
Şekil 5.38. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 6 A’lık boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

AL427915 Al/Cu MMK malzemenin kullanıldığı deneysel numunelerde, t_s değişiminin elektrot takımı EAH üzerine olan etkisi incelenip değerlendirildiğinde; uygulanan bütün vurum süresinde boşalım akımının artışı ile doğru orantılı olarak elektrot takımı EAH’nın artış sergilediği görülmüştür.

Bu çalışmada, en yüksek EAH performansı, 12,5 A’lık boşalım akımında ve 50 μ s’lik vurum süresinde 1,230 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir (Şekil 5.40). En düşük EAH performansı ise, 6 A’lık boşalım akımında ve 200 μ s’lik vurum süresinde 0,060 mm³/dak’lık bir değer olarak belirlenmiştir (Şekil 5.38).

AE109 Al-MMK malzemenin işlenmesi sürecinde ise, en yüksek EAH performansı, yine 12,5 A’lık boşalım akımında ve 50 μ s’lik vurum süresinde 0,968 mm³/dak’lık bir değer olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.40). En düşük EAH performansı ise, 6 A’lık boşalım akımında ve 100 μ s’lik vurum süresinde 0,013 mm³/dak’lık bir değer olarak elde edilmiştir (Şekil 5.38).

Bu durum, Şekil 3.38 – Şekil 5.40’da verilen grafik ve verileri incelendiğinde; $AlMg1SiO,6TiH_20,8$ MMK malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de tespit edilmiştir. Mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 malzeme ile 1.2210 115CrV3 malzemenin deneysel sonuçları eşdeğer performans çıktıları vermiştir.

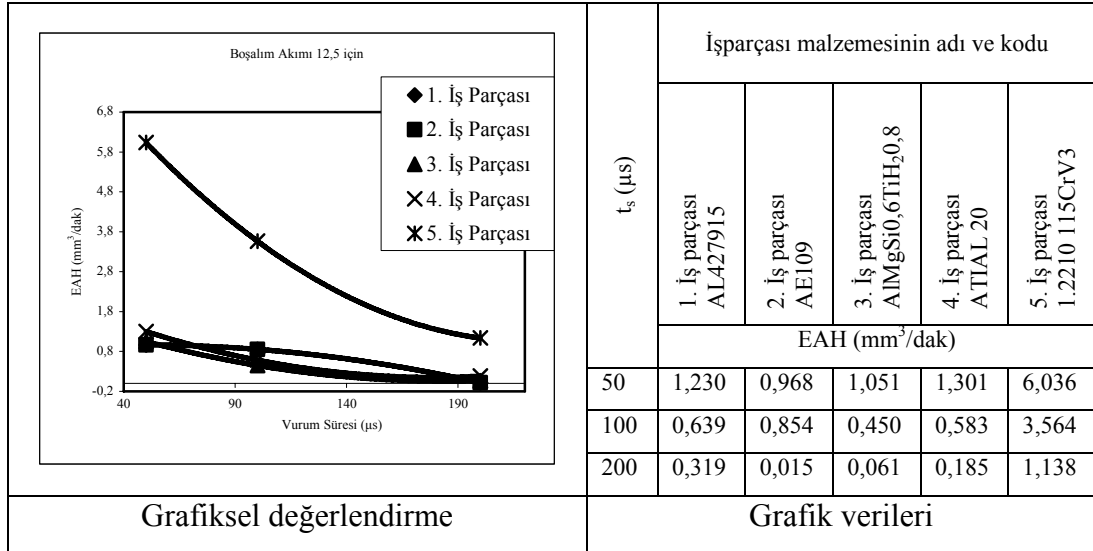


Şekil 5.39. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 9 A’lik boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Genel olarak, MMK türü malzemelerde olmak üzere bütün t_s değerleri dikkate alınarak her bir t_s değeri için bir değerlendirme yapıldığında; 12,5 A / 50 µs için en yüksek EAH performans değeri 1,230 mm³/dak’lık bir değer olarak 1.nci işparçasında elde edilmiştir (Şekil 5.40). En düşük EAH performans değerinin ise, 6 A / 100 µs için 0,013 mm³/dak’lık bir değer olarak 2. işparçasında belirlenmiştir (Şekil 5.38). Bu değerlendirmeyi bütün işleme parametrik değerleri bakımından yaptığımız da ise; 12,5 A / 50 µs için en yüksek EAH performans değeri 6,036 mm³/dak’lık bir değer olarak 5. işparçasında görülmüştür (Şekil 5.40). En düşük İİH performans değerinin ise, 6 A / 100 µs için 0,013 mm³/dak’lık bir değer olarak 2. işparçasında tespit edilmiştir (Şekil 5.38).

Mukayese amaçlı 4. ve 5. işparçası malzemelerinin genel olarak, elektrot takımı EAH performans değerleri göz önüne alınarak bir değerlendirme yapıldığında; EEİ

yönteminin MMK malzemelerin işlenmesi sürecinde, elektrot takımı EAH performansı bakımından uygun olduğu belirlenmiştir.



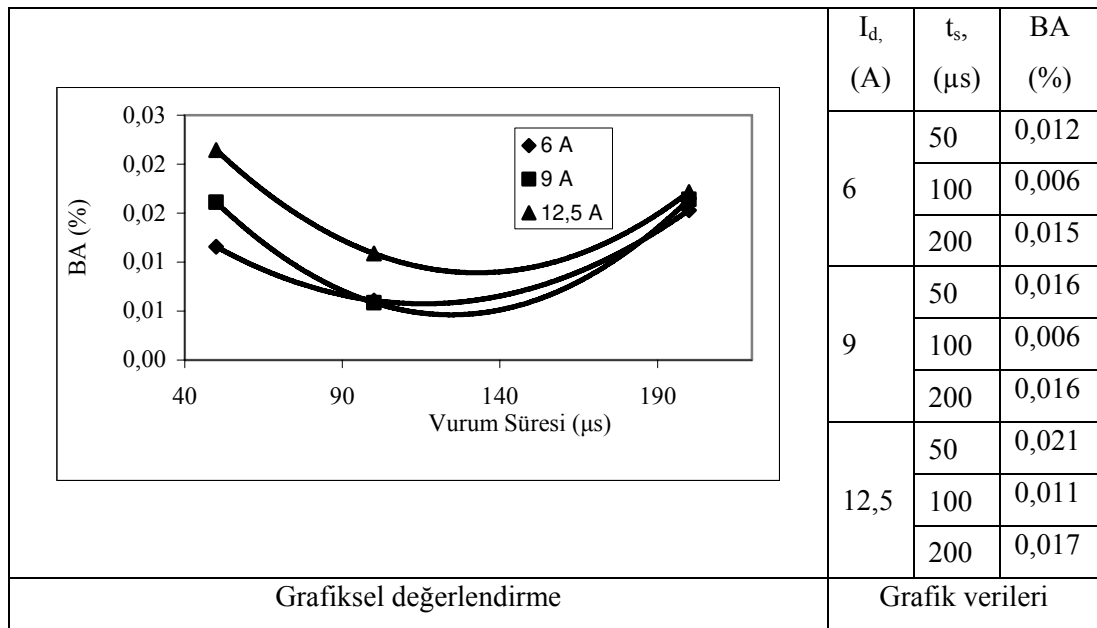
Şekil 5.40. Farklı işparçası malzemelerinin işlenmesinde kullanılan elektrot takımının 12,5 A'lık boşalım akımında elektrot aşınma hızının (EAH) vurum süresi (t_s) ile değişimi

5.3.3. Bağlı aşınmanın vurum süresi ile değişiminin değerlendirilmesi

Şekil 5.41. – Şekil 5.45’de vurum süresine bağlı olarak beş farklı işparçası malzemesi için (AL427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al-MMK malzeme, AlMgSi0,6TiH2,0,8 MMK malzeme, ETIAL 20 ticari alüminyum malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin) BA’nın t_s ile değişimleri gösterilmiştir.

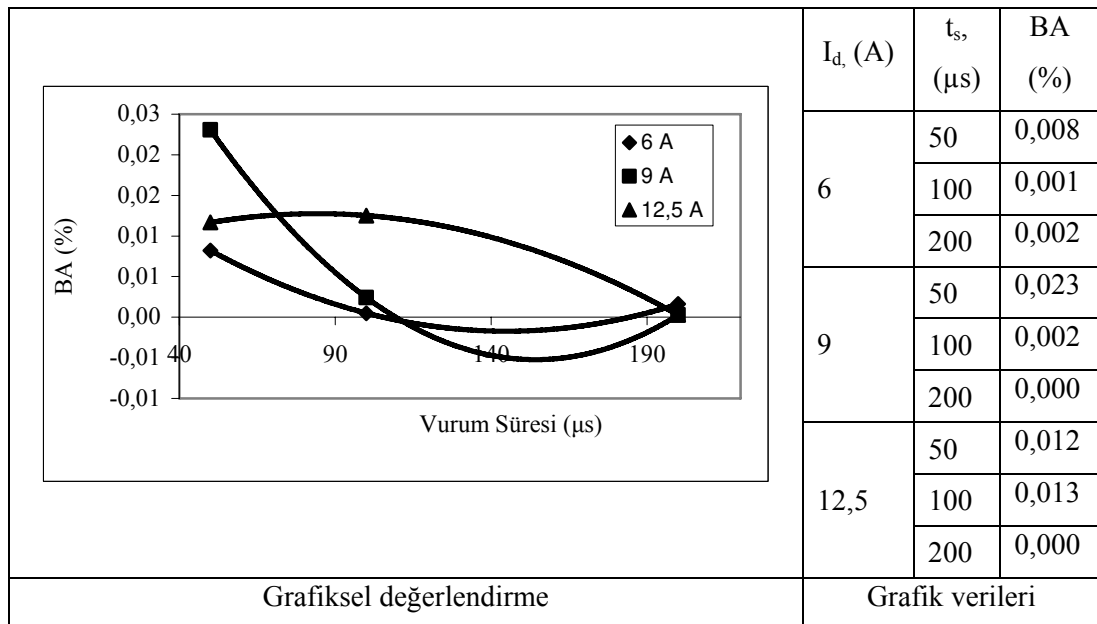
Şekil 5.41’de, AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde BA’nın vurum süresi ile değişimi gösterilmiştir.

Bu deneysel çalışmada elde edilen bütün grafik verileri incelendiğinde, 50 µs ve 200 µs t_s ile 6 A ve 9 A’lık boşalım akımı değerleri birbirine çok yakın bağlı aşınma performans sonuçları vermiştir. Bu deneysel numune işparçası malzemesi için en yüksek BA değeri, 50 µs vurum süresinde 12,5 A boşalım akımında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.41. AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.42’de AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır elektrot takımıyla işlenmesi sürecinde bağıl aşınmanın t_s ile değişimi incelendiğinde ise, 100 μs ve 200 μs

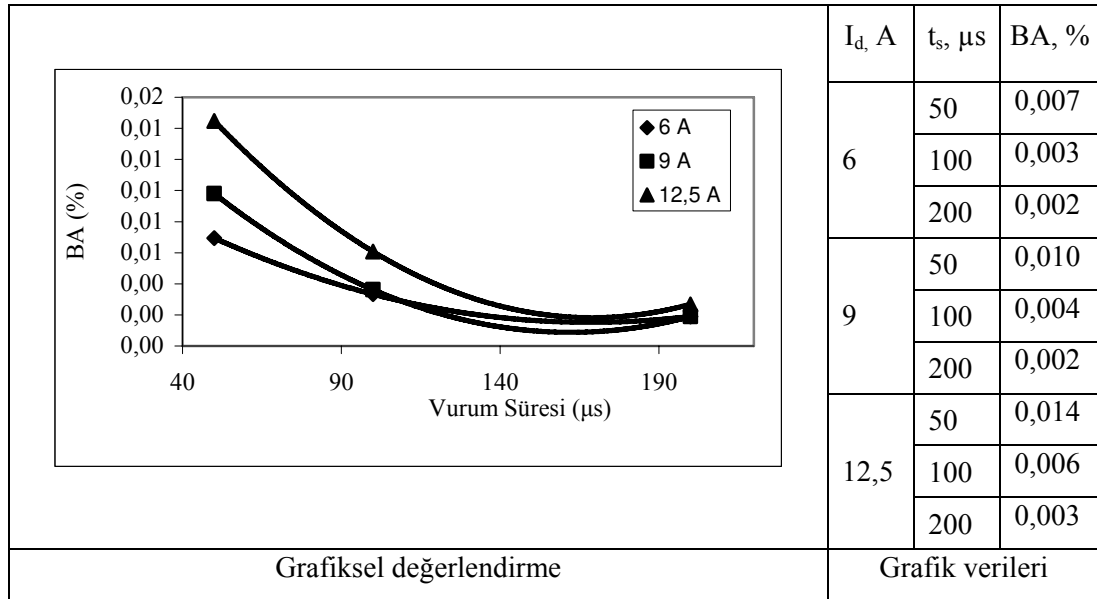


Şekil 5.42. AE109 MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

parametrik değerleri için tüm boşalım akımlarında eşdeğer BA sonuçları vermiştir. Sadece 12,5 A / 100 μ s parametrik değerlerle işlemede BA değeri yükselmesi elde edilmiştir.

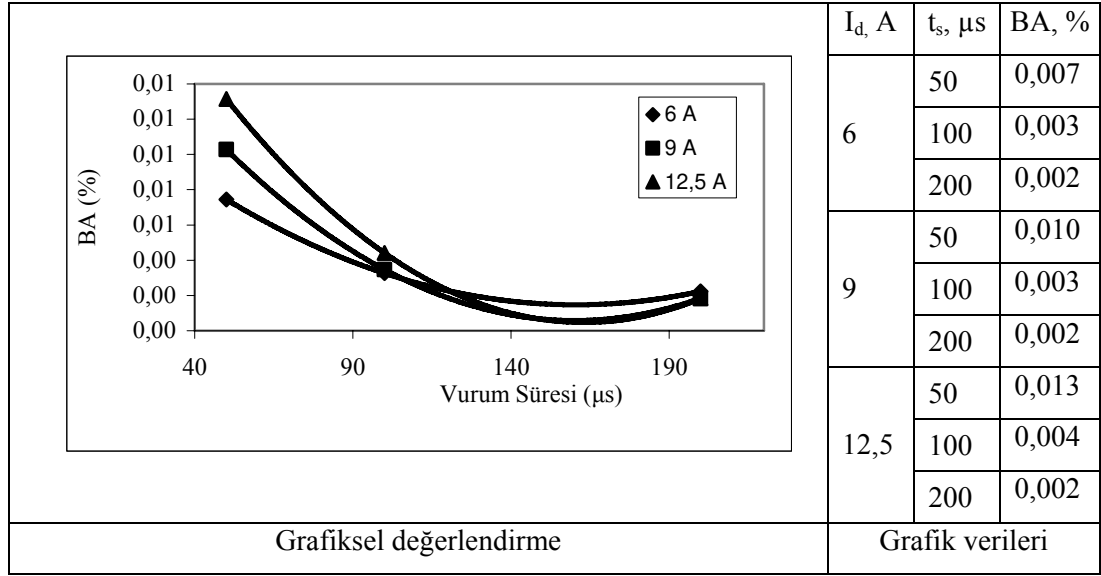
Bu değerlendirmenin yanında, 50 μ s vurum süresi için I_d artmasıyla belli bir değere kadar BA'nın arttığı belirlenmiştir. 200 μ s vurum süresi için ölçülen bütün I_d değerleri için BA'nın sıfıra çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.43'de $AlMg1SiO,6TiH_2O,8$ MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın t_s ile değişimi gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, vurum süresinin büyüklüğü ile BA ters orantılıdır. Kullanılan üç t_s değeri için de BA'nın da düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir.



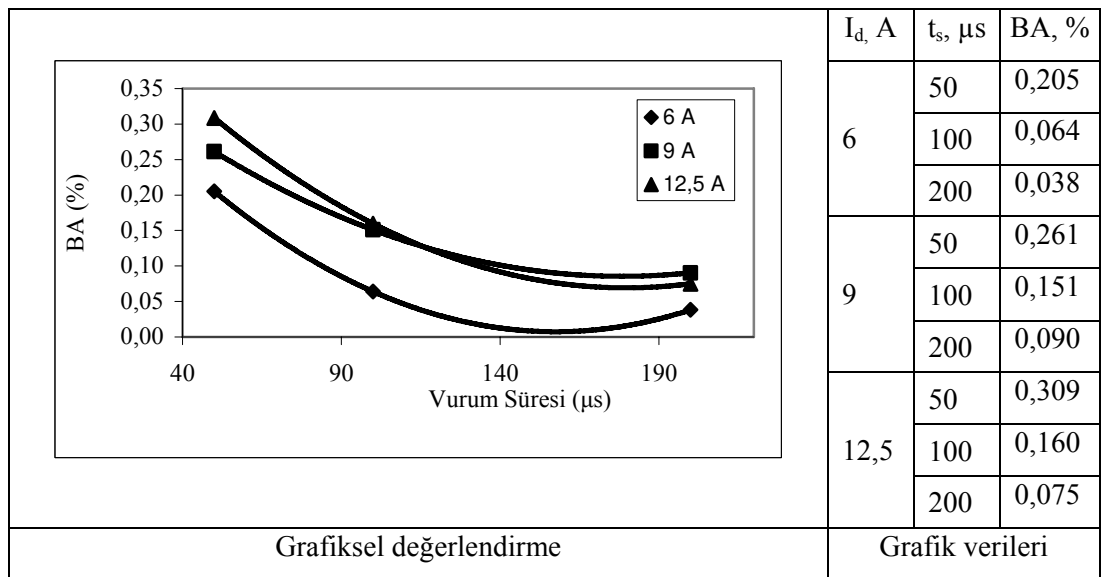
Şekil 5.43. $AlMg1SiO,6TiH_2O,8$ MMK malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.44'de ise ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın t_s ile değişimi verilmiştir. Tüm grafik verileri ayrıntılı olarak incelendiğinde, $AlMg1SiO,6TiH_2O,8$ MMK malzemesinin bağlı aşınma sonuçlarıyla eşdeğer olduğu görülmüştür.



Şekil 5.44. Ticari alüminyum ETIAL 20 malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

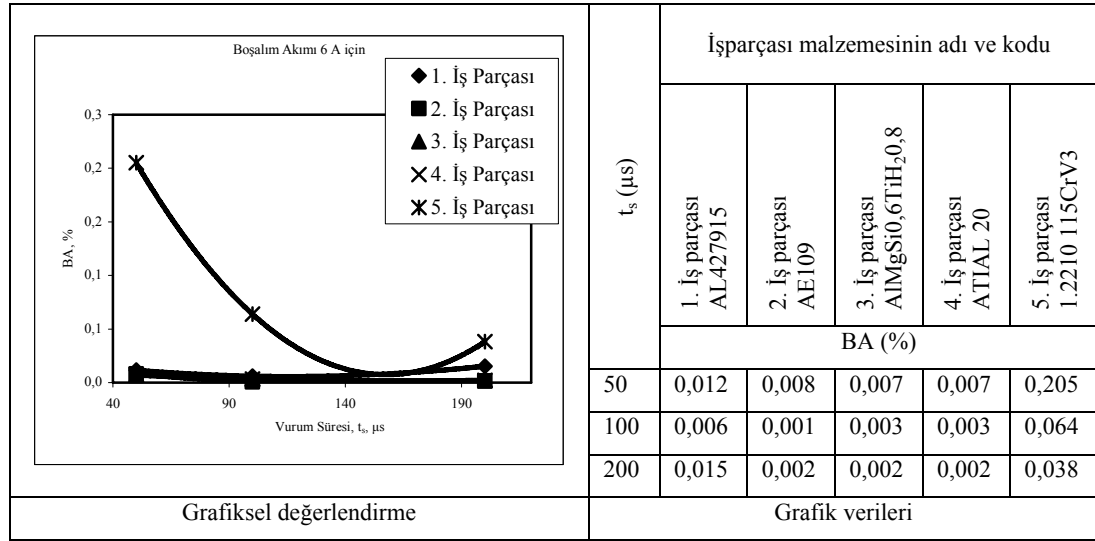
Şekil 5.45’de, cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde BA’nın t_s ile değişimi incelendiğinde, vurum süresinin büyüklüğü ile BA’nın ters orantılı olduğu görülmüştür. 50 μs , 100 μs ve 200 μs t_s işleme parametrik değerleri için boşalım akımının artması, BA’da bir azalışa neden olmuştur.



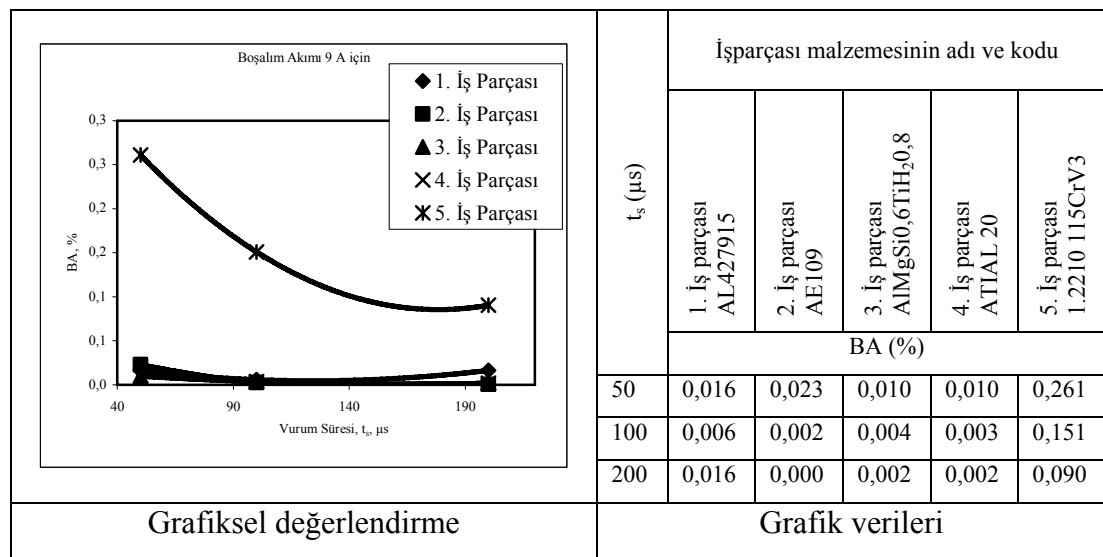
Şekil 5.45. Cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemesinin elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağlı aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

Şekil 5.46. – Şekil 5.48’de beş farklı iş parçası malzemeleri için 6 A, 9 A ve 12,5 A’lık, boşalım akımında BA’nın t_s ile değişimi gösterilmiştir.

Tüm verilerin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, t_s değişiminin, BA üzerine etkisi olduğu bütün iş parçası malzemeleri için belirlenmiştir.



Şekil 5.46. Farklı iş parçası malzemelerinin 6 A’lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

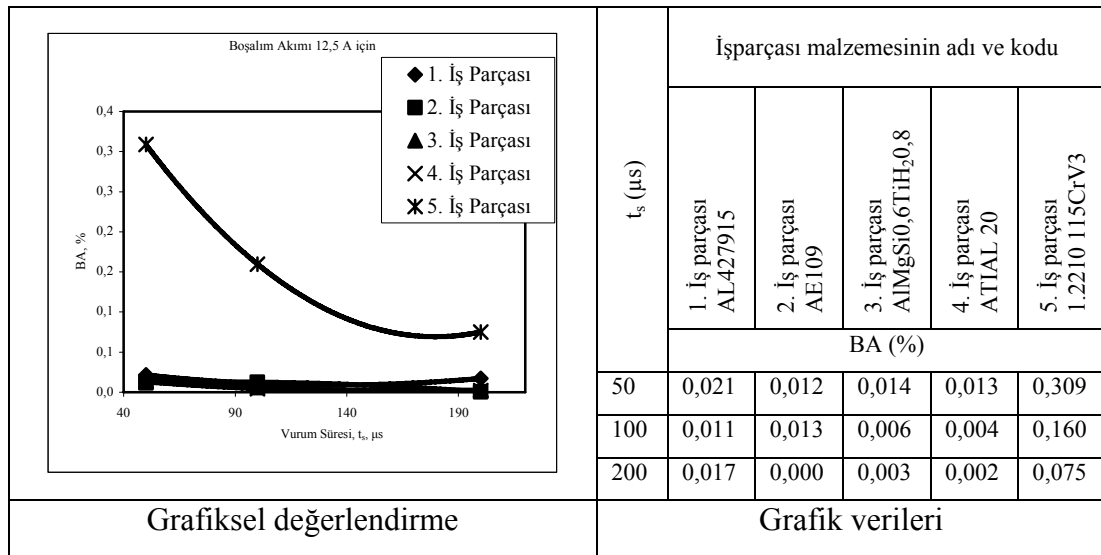


Şekil 5.47. Farklı iş parçası malzemelerinin 9 A’lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

AL427915 Al/Cu MMK malzemesinin iş parçası olarak kullanıldığı bu deneysel numunelerde, t_s değişiminin I_d değeri ile ilişkili olarak BA üzerine etkisi incelenip değerlendirildiğinde; BA'nın birbirine çok yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Bu durum, diğer MMK malzemelerden olan AlMg1SiO,6TiH₂0,8 MMK malzeme ile AE109 Al-MMK malzemenin iş parçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusudur.

Mukayese amaçlı işlenen ETIAL 20 malzeme için de performans çıktıları benzerlik gösterirken; 1.2210 115CrV3 malzemenin deneysel sonuçları, diğer iş parçası malzemelerinin sonuçlarına göre daha yüksek performans çıktısı vermiştir.



Şekil 5.48. Farklı iş parçası malzemelerinin 12,5 A'lık boşalım akımında elektrolitik bakır ile işlenmesinde bağıl aşınmanın (BA) vurum süresi (t_s) ile değişimi

5.4. Malzeme Çiftlerine Göre Deneysel Olarak Bulunan EAH, İİH ve BA Değişimlerinin YSA ile Elde Edilen Değerlerinin Performans Çıktıları

Boşalım akımının değiştirilerek yapıldığı deneysel çalışmada, 6, 9 ve 12,5 amperlik boşalım akım değerleri kullanılmıştır. Her bir boşalım akım değerleri için, 50, 100 ve 200 μs 'lik vurum süresi ayrı ayrı dikkate alınmıştır. İşleme derinliği 7 mm ile sınırlandırıldı ve her bir deney işlemi için ortalama işlem süresi ($t_{işleme}$), süre ölçer kullanılarak tespit edilmiştir. Her bir deney seti analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Yapılan bu analizde her malzeme çifti için yapay sinir ağları ile EAH, İİH ve BA analitik ifadeler elde edilmiştir. Bu denklemlerin elde edilmesinde logistik sigmoid (logsig) fonksiyonu kullanılmıştır (Eş.5.11).

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-E_i}} \quad (5.11)$$

Al427915 Al/Cu MMK malzeme

Elektrolitik bakır malzeme ile Al427915 Al/Cu MMK malzeme çifti için EAH, İİH ve BA'nın YSA yöntemlerinden SCG algoritması ve gizli katmanda 3 nöron bulunan ağ yapısı ile elde edilen bağıntıları, sırasıyla Eş.5.12, Eş.5.13 ve Eş.5.14'de verilmiştir. Ayrıca, bu eşitliklerde bulunan F_i değerlerinin hesaplanması için gerekli olan katsayılar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

$$EAH = \frac{1}{1 + e^{-(6.0579 F_1 - 11.6742 F_2 + 5.5038 F_3 + 0.3954)}} \quad (5.12)$$

$$İİH = \frac{1}{1 + e^{-(8.7233 F_1 - 18.3696 F_2 + 10.009 F_3 + 0.94)}} \quad (5.13)$$

$$BA = \frac{1}{1 + e^{-(2.3012 F_1 - 0.7159 F_2 - 9.1396 F_3 + 7.6828)}} \quad (5.14)$$

Çizelge 5.1. Eşitlik 5.12, 5.13 ve 5.14' de bulunan F değerlerine ait katsayılar

i	$E_i = C_{1i} * I_d + C_{2i} * t_s + C_{3i}$		
	C_{1i}	C_{2i}	C_{3i}
1	6.1426	-12.0302	-12.8742
2	-0.5184	0.3743	0.7985
3	11.2841	11.3094	11.4439

AE 109 Al MMK malzeme

Elektrolitik bakır malzeme ile alüminyum metal matrisli kompozit (AE 109 Al-MMK) malzeme çifti için EAH, İİH ve BA' nın YSA yöntemlerinden SCG algoritması ve gizli katmanda 3 nöron bulunan ağ yapısı ile elde edilen bağıntıları sırasıyla Eş. 5.15, Eş. 5.16 ve Eş. 5.17'de verilmiştir. Bu eşitliklerde bulunan F_i değerlerinin hesaplanması için gerekli olan katsayılar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

$$EAH = \frac{1}{1 + e^{-(7.8603 F_1 - 8.677 F_2 + 6.3946 F_3 + 4.0049)}} \quad (5.15)$$

$$İİH = \frac{1}{1 + e^{-(3.9374 F_1 - 3.7253 F_2 + 7.2442 F_3 - 6.7358)}} \quad (5.16)$$

$$BA = \frac{1}{1 + e^{-(4.2067 F_1 + 1.13 F_2 - 1.1821 F_3 - 16.399)}} \quad (5.17)$$

Çizelge 5.2. Eş. 5.15, Eş. 5.16 ve Eş. 5.17 için sabit katsayılar

i	$E_i = C_{1i} * I_d + C_{2i} * t_s + C_{3i}$		
	C_{1i}	C_{2i}	C_{3i}
1	14.4017	3.9928	-3.7231
2	-11.7524	2.4752	-12.4937
3	1.4739	-0.2254	-1.6588

AlMg1SiO6-TiH₂0.8 MMK malzeme

Elektrolitik bakır malzeme ile alüminyum metal matrisli kompozit (Al-MMK-AlMg1SiO₆-TiH₂0,8) malzeme çifti için EAH, İİH ve BA' nın YSA yöntemlerinden SCG algoritması ve gizli katmanda 3 nöron bulunan ağ yapısı ile elde edilen bağıntıları sırasıyla Eş. 5.18, Eş. 5.19 ve Eş. 5.20'de verilmiştir. Bu eşitliklerde

bulunan F_i değerlerinin hesaplanması için gerekli olan katsayılar Çizelge 5.3’de verilmiştir.

$$EAH = \frac{1}{1 + e^{-(5.0305 F_1 + 0.849 F_2 + 6.6105 F_3 - 2.3253)}} \quad (5.18)$$

$$\ddot{I}H = \frac{1}{1 + e^{-(8.8875 F_1 + 2.5532 F_2 - 10.4178 F_3 - 1.685)}} \quad (5.19)$$

$$BA = \frac{1}{1 + e^{-(1.0057 F_1 - 0.0773 F_2 + 6.0384 F_3 - 2.1381)}} \quad (5.20)$$

Çizelge 5.3. Eş. 5.18, Eş. 5.19 ve Eş. 5.20 için sabit katsayılar

i	$E_i = C_{1i} * I_d + C_{2i} * t_s + C_{3i}$		
	C_{1i}	C_{2i}	C_{3i}
1	2.8637	-6.5239	-9.1402
2	5.1409	-4.7401	-1.6887
3	0.7012	-11.3318	-1.3082

ETIAL 20 malzeme

Elektrolitik bakır malzeme ile ticari alüminyum (ETIAL 20) malzeme çifti için EAH, $\ddot{I}H$ ve BA’ nın YSA yöntemlerinden SCG algoritması ve gizli katmanda 3 nöron bulunan ağ yapısı ile elde edilen bağıntıları sırasıyla Eş. 5.21, Eş. 5.22 ve Eş. 5.23’de verilmiştir. Bu eşitliklerde bulunan F_i değerlerinin hesaplanması için gerekli olan katsayılar Çizelge 5.4’de verilmiştir.

$$EAH = \frac{1}{1 + e^{-(2.5468 F_1 - 5.3048 F_2 - 1.7499 F_3 + 1.9531)}} \quad (5.21)$$

$$\ddot{I}H = \frac{1}{1 + e^{-(5.055 F_1 - 8.5551 F_2 - 9.6879 F_3 + 1.6381)}} \quad (5.22)$$

$$BA = \frac{1}{1 + e^{-(2.2254 F_1 + 6.7782 F_2 + 1.1371 F_3 - 0.7911)}} \quad (5.23)$$

Çizelge 5.4. Eş. 5.21, Eş. 5.22 ve Eş. 5.23 için sabit katsayılar

i	$E_i = C_{1i} * I_d + C_{2i} * t_s + C_{3i}$		
	C_{1i}	C_{2i}	C_{3i}
1	-9.1492	16.6388	5.6624
2	5.6345	4.7404	-11.1497
3	-2.7546	0.2485	2.3648

1.2210 115CrV3 malzeme

Elektrolitik bakır malzeme ile 1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme çifti için EAH, İİH ve BA' nın YSA yöntemlerinden SCG algoritması ve gizli katmanda 3 nöron bulunan ağ yapısı ile elde edilen bağıntıları sırasıyla Eş. 5.24 Eş. 5.25ve Eş. 5.26'da verilmiştir. Bu eşitliklerde bulunan F_i değerlerinin hesaplanması için gerekli olan katsayılar Çizelge 5.5'de verilmiştir.

$$EAH = \frac{1}{1 + e^{-(8.9609 F_1 - 2.8654 F_2 + 48.0018 F_3 + 0.1217)}} \quad (5.24)$$

$$İİH = \frac{1}{1 + e^{-(3.136 F_1 - 7.9265 F_2 + 7.6652 F_3 + 5.9294)}} \quad (5.25)$$

$$BA = \frac{1}{1 + e^{-(5.6018 F_1 - 3.639 F_2 + 31.3718 F_3 + 2.0455)}} \quad (5.26)$$

Çizelge 5.5. Eş. 5.24 Eş. 5.25ve Eş. 5.26 için sabit katsayılar

i	$E_i = C_{1i} * I_d + C_{2i} * t_s + C_{3i}$		
	C_{1i}	C_{2i}	C_{3i}
1	3.5757	-4.7009	-14.3361
2	1.8130	-3.7605	14.5473
3	1.9535	-2.4272	-3.5185

Çalışmada kullanılan 5 farklı malzeme için boşalım akımları (6 A, 9 A ve 12,5 A), vurum süreleri (50 μ s, 100 μ s ve 200 μ s) ve ortalama işleme sürelerine bağlı olarak deneysel ve YSA ile bulunan elektrot aşınma hızı (EAH, mm^3/dak) karşılaştırmalı olarak Şekil 5.49'da verilmiştir. Benzer şekilde aynı malzemeler için deneysel işleme parametrelerinin işparçası işleme hızı (İİH, mm^3/dak) ve bağıl aşınma (BA, %) olarak

değişimini veren karşılaştırmalı YSA performans eğrileri sırasıyla Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de verilmiştir.

YSA’nın giriş ve çıkışlarında kullanılan değişkenler (X_i) Eş.5.27’ye göre [0,1] aralığında normalize edilmiştir.

$$X_i = 0,8 \left[\frac{X_{ölçülen} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right] + 0,1 \quad (5.27)$$

YSA ile analizi yapılan deney sonuçlarına ait çıktılar için istatistiksel hata sonuçları Çizelge 5.6’de verilmiştir. Bu değerler ($0,96 < R^2 < 1$) YSA’nın yapılan deneylerin analitik olarak ifade edilme kabiliyetlerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

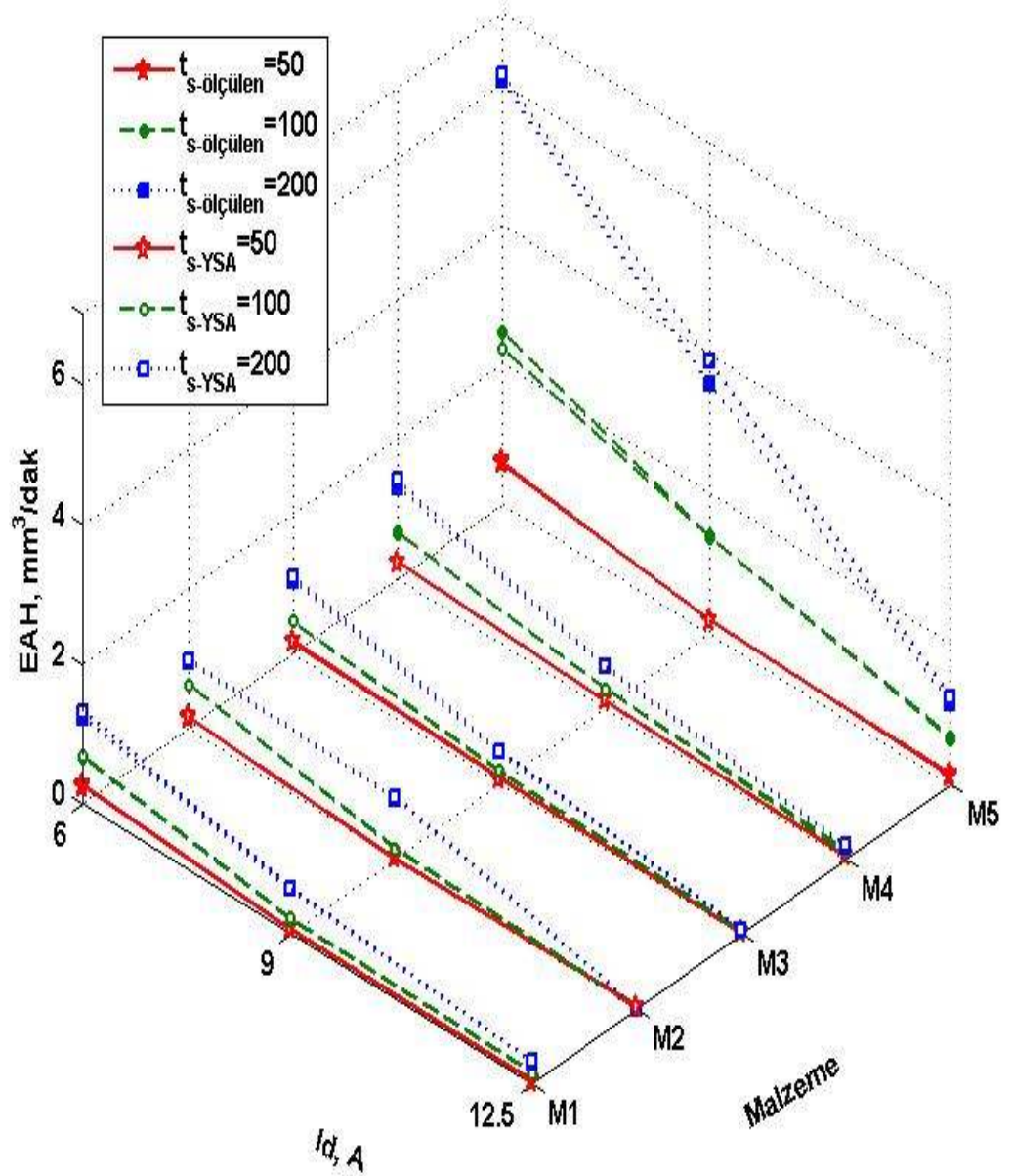
Böylelikle seçilen malzemeler için deney yapmaksızın vurum süresi ve boşalım akımına bağlı olarak EAH, İİH ve BA değerlerinin yüksek doğrulukla hesaplanabileceği analitik ifadeler türetilmiş ve literatüre sunulmuştur.

Bu üç performans sonucu çerçevesinde bir değerlendirme yapıldığında; EAH, İİH ve BA değerleri için yapılan analizle önerilen modelin çok doğru ve anlamlı değerler verdiği bulunmuştur.

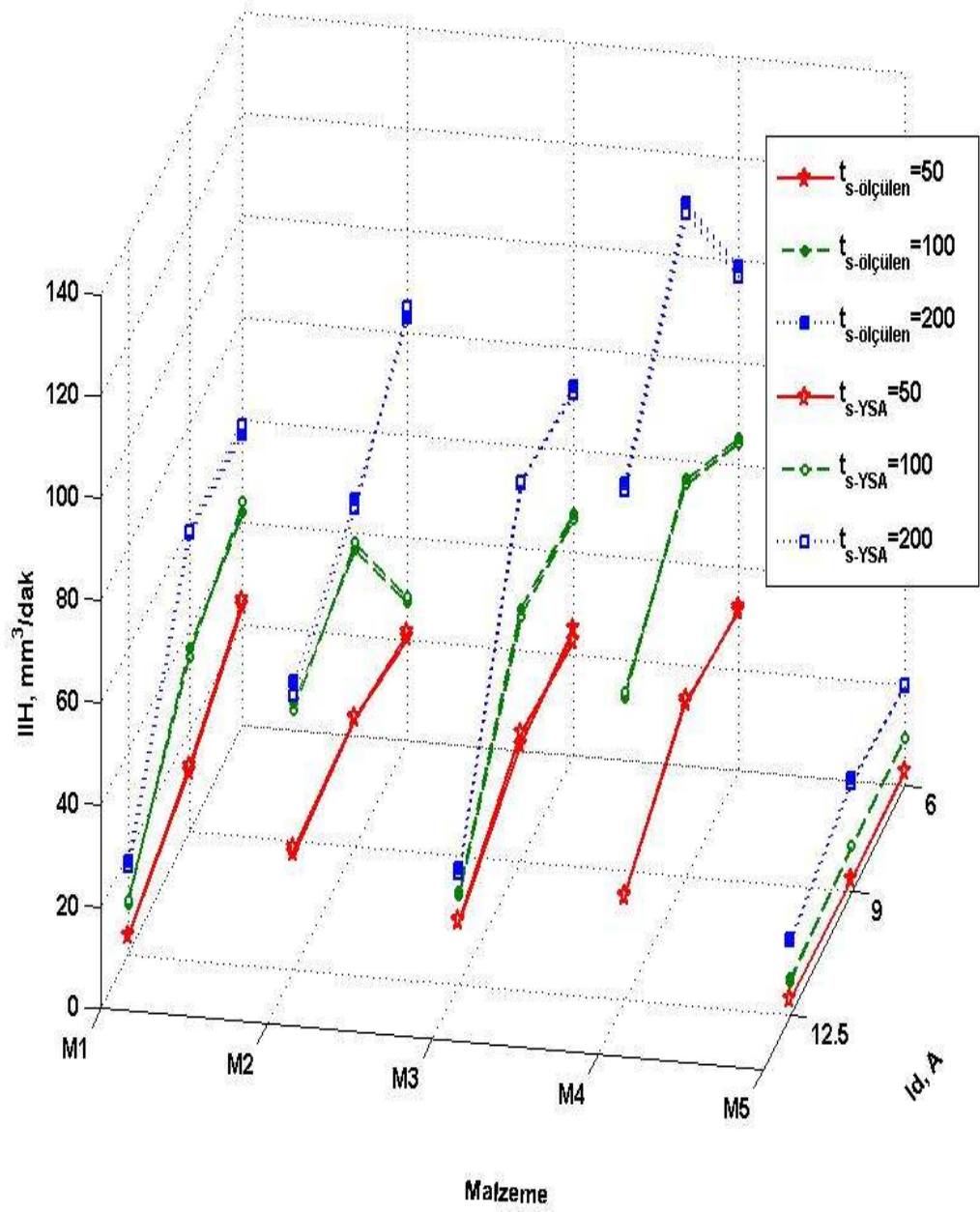
Geliştirilen bu modelle, deneysel ve beklenen değerlerin kullanılarak çizilen grafiklerin (Şekil 5.49 - Şekil 5.51) ayrıntılı incelemesiyle, sonuçların belli bir korelasyona sahip olduğu gözlenmektedir. Tüm analiz için geliştirilen model, her iki performans değeri içinde hiçbir uyumsuzluk göstermemiştir.

Şekil 5.49’da verilen grafik dikkatlice incelendiğinde, yüksek boşalım akımının ve düşük vurum süresinin kombinasyonundan az elektrot takım aşınması sonucu çıkmaktadır. Bu durum, elektrot aşınması olayında, vurum süresinin boşalım akımından daha önemli olduğu sonucunu doğurmaktadır. Vurum süresi değerinin artışı ile birlikte EAH’nın da arttığı gözlenmiştir. Elektrot aşınma hızı en yüksek değerleri ile en düşük değerleri, tüm işlenen malzemeler için ayrı sonuç vermektedir. Bu değerlendirme, bütün malzemeleri kapsayacak şekilde boşalım akımı 9 A, vurum süresi 100 μ s değeri için yapıldığında, en yüksek değerlerin genelde M5 olarak kısaca ifade ettiğimiz cıva çeliğinde 1.380 mm³/dak

olarak elde edildiğini, MMK malzemeler de ise, sonucun $0,213 \text{ mm}^3/\text{dak}$ ile kısaca M1 olarak belirtilen AL427915 Al/Cu MMK malzemede olduğu tespit edilmiştir. En düşük değerin ise, $0,142 \text{ mm}^3/\text{dak}$ ile M2 olarak ifade edilen AE109 malzemede olduğu belirlenmiştir.



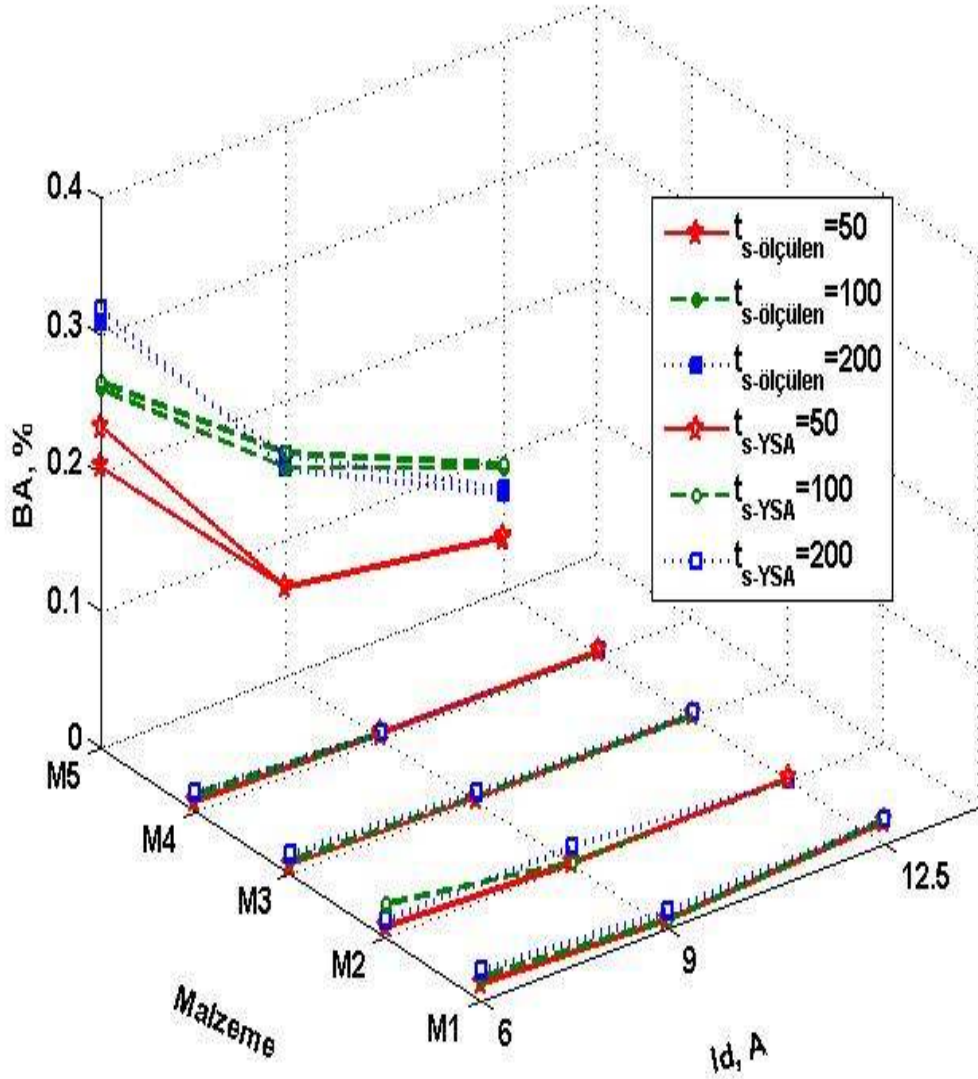
Şekil 5.49. Seçilen malzemeler için elektrot aşınma hızı (EAH)'nın deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri



Şekil 5.50. Seçilen malzemeler için iş parçası işleme hızı (İİH)'nın deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri

Ayrıca, Şekil 5.50'de verilen grafikte dikkatlice incelendiğinde, boşalım akımının ve vurum süresinin kombinasyonundan işparçası aşınma hızının her bir malzemenin kompozisyonuna göre farklı performans sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bu durum,

işleme parametresi olarak boşalım akımının, işlenen malzeme kompozisyonuna bağlı olarak, vurum süresiyle ilişkili önemli bir parametre olduğu sonucunu vermektedir.



Şekil 5.51. Seçilen malzemeler için bağlı aşınma (BA)'nın deneysel olarak elde edilen değerleri ile YSA ile modellenerek hesaplanan değerlerin performans eğrileri

Çizelge 5.6 incelendiğinde, her malzeme türü ve 3 farklı işleme parametresi için, çalışma kapsamında önerilen eşitliklerin kabul edilebilirlik göstergelerinden biri sayılan R^2 değerlerinin, 0,90 alt sınırını aşacak şekilde kaldığı görülmektedir. MMK malzemeler içerisinde bir değerlendirme yapıldığında, BA'ya göre en büyük R^2

değerinin M3’de 0,997875 olduğu, en küçük değerin ise M2’de 0,965464 olarak elde edildiği görülmüştür. Bu da çalışma kapsamında dikkate alınan matematiksel modelin uygun olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.6. Deneysel olarak elde edilen değerler ile YSA ile elde edilen değerler arasındaki istatistiksel sonuçlar

İşparçası Malzemesinin Adı ve kodu	İstatistiksel Hata	EAH, mm ³ /dak	İİH, mm ³ /dak	BA, %
Al427915 Al/Cu MMK malzeme, M1	RMS	0,01548	0,027656	0,009599
	R ²	0,99019	0,989918	0,994308
	MAPE	9,639537	8,619167	7,0844
AE109 Al-MMK malzeme, M2	RMS	0,029634	0,05353	0,114419
	R ²	0,958775	0,978415	0,965464
	MAPE	18,01493	12,55397	10.98
Al-MMK (AlMg1SiO,6- TiH ₂ 0,8), M3	RMS	0,012334	0,019715	0,005143
	R ²	0,992229	0,996361	0,997875
	MAPE	7,338938	4,749578	3,192523
Ticari Alüminyum (ETİAL 20) malzeme, M4	RMS	0,012053	0,019189	0,012687
	R ²	0,993977	0,998552	0,986916
	MAPE	6,191679	4,198918	9,468481
Cıva Çeliği (1.2210 115CrV3) malzeme, M5	RMS	0,069822	0,027909	0,067427
	R ²	0,968293	0,969086	0,976271
	MAPE	27,56532	14,72428	16,82483

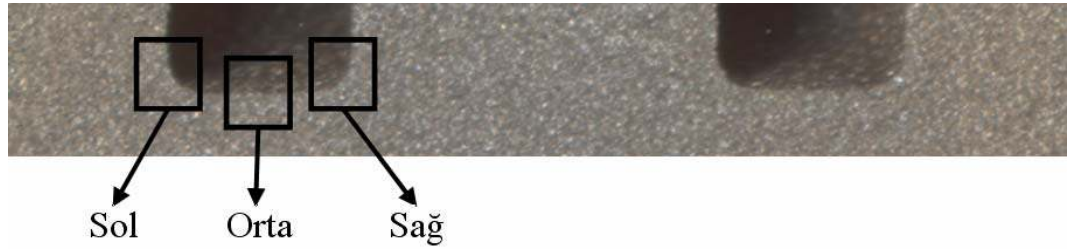
5.5. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile Metalografik İncelemeler ve Mikroyapı Fotoğrafları

Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ve Leica DFC-320 dijital kamera bağlantılı Leica marka DM4000M model optik mikroskop ile elde edilen görüntüler üzerinden metalografik incelemeler gerçekleştirilmiştir. İnceleme kapsamı, deneysel çalışmada kullanılan AL427915 kodlu Al/Cu MMK malzemesi deney seti (*dokuz adet*) ile diğer dört malzemenin I_d değeri 9 A, t_s değeri 100 μ s olan işleme şartlarını içeren deney numuneleri ile sınırlandırılmıştır.

Beş işparçası malzemenin I_d ve t_s işleme parametrik değeri 9 A / 100 μ s olanlar için, diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla işleme şartlarını içeren deney numuneleri kapsamında, jet püskürtme kullanılarak EEİ'ye tabi tutulmuş işparçalarının, beyaz tabaka kalınlığı (BTK) ile ergimiş ve sonra soğutma esnasında tekrar katılmış bölgede dahil olmak üzere ısı etkisi incelemek ve değerlendirmek için mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

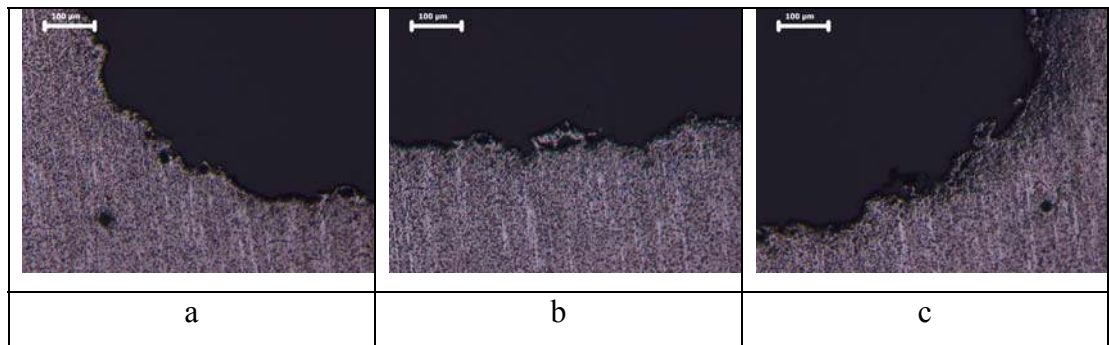
5.5.1. Mikroyapı Fotoğrafları ve İncelemeleri

Mikroyapı görüntüleri, deneysel numunelerin Şekil 5.1'de gösterildiği gibi üç noktasından alınmıştır. Görüntüleme yeri, şekilde gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Resimde de görüldüğü gibi, işlenmiş işparçasının bir tarafından, seçilmiş bir bölgesinden görüntü alınmasına özen gösterilmiştir.

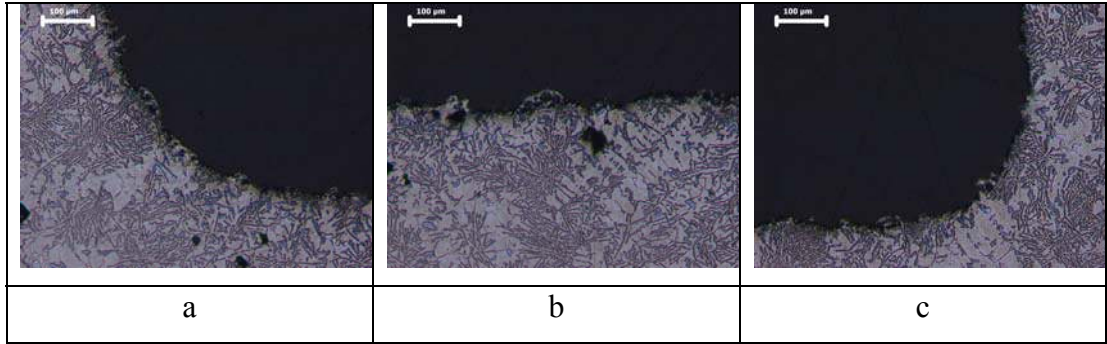


Resim 5.1. Görüntüleme için tanımlanmış bölgenin gösterilişi

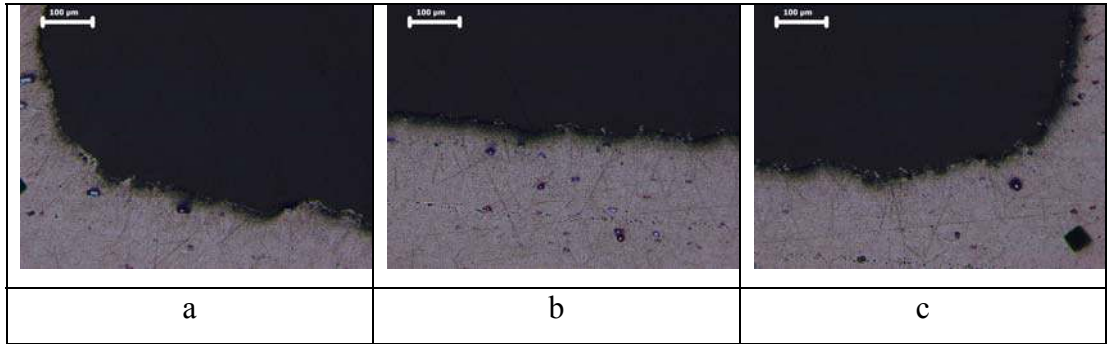
Beş malzemenin mikroyapı fotoğrafları Resim 5.2 - Resim 5.6'da verilmiştir.



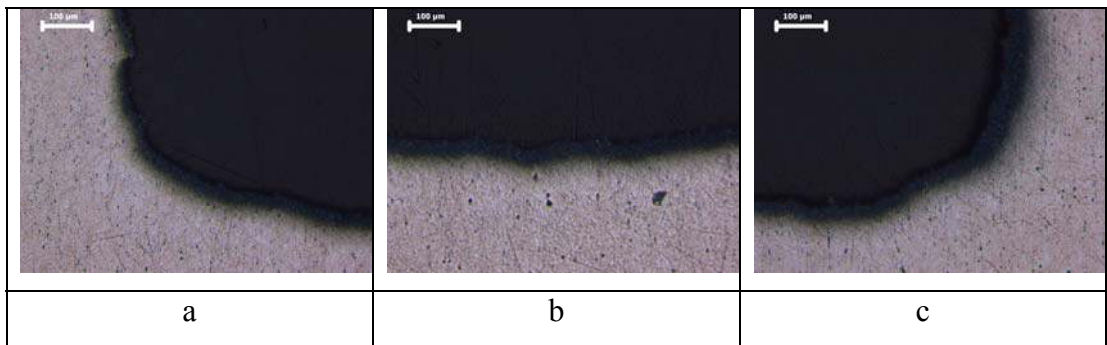
Resim 5.2. AL427915 Al/Cu MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta



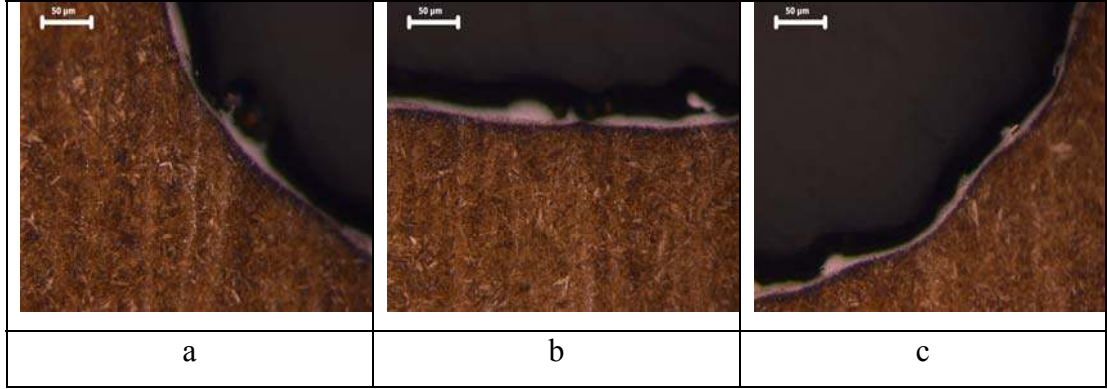
Resim 5.3. AL109 Al-MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta



Resim 5.4. AlMg1SiO,6-TiH₂0,8 Al- MMK malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta



Resim 5.5. ETİAL 20 Ticari alüminyum malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta



Resim 5.6. 1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzemenin Leica DM4000M model optik mikroskop ile alınan mikroyapı görüntüleri, a) Sol, b) Sağ ve c) Orta

Resim 5.2 - Resim 5.6’de verilen mikroyapı görüntüleri detaylı bir şekilde gözlenip incelendiğinde, EEİ’de işlenen yüzeylerinin en üst tabakasının yüksek sıcaklığa maruz kalıp hızlı soğumaya tabii olmasından kaynaklanan yapı değişimi görülmektedir.

EEİ sürecinde oluşan ısı, işlenen işparçası yüzeyinde, oldukça sert, ergimiş ve tekrar katılaşmış beyaz tabakadan oluşmuş küçük bir katman ve ısıdan etkilenmiş bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. İşparçası malzemelerinin işlenen yüzeylerinde oluşan bu ısı etki, genellikle I_d enerjisine bağlıdır.

EEİ işlem sürecinde, işleme parametrelerinden kaynaklanan boşalım akımının yükselmesi, ısı enerjisinin etkisinin artmasına, bu durumun oluşumu da, hem işparçasında, hem de elektrot takımında ergime ve buharlaşmaya neden olmaktadır. Bunun yanında, vurum süresinin artırılması da işparçasına daha fazla ısının aktarılmasına neden olur.

EEİ yöntemiyle işleme uygulamalarında, dielektrik sıvı, ergiyen malzemenin tamamını işleme yüzeyinden uzaklaştıramamaktadır. Bu olayların bir sonucu olarak beyaz tabaka, bir çok parametrenin birleşmesi sonucu oluşan ergimiş malzemenin uygun olmayan soğuma şartlarında tekrar katılaşması ile oluşmaktadır.

Beyaz tabaka ve ısıdan etkilenmiş bu bölgelerin fiziksel, kimyasal ve mikro yapısal karakteristikleri ana malzemeden farklıdır ve bu görülen mikro yapısal değişim, doğrudan işparçası malzemesinin yüzey kalitesini de etkilemektedir.

Şekil 5.3 – Şekil 5.5’de verilen mikro yapılarına bakıldığında, yüzey pürüzlülük farklılıklarının yanında işleme bölgesinde, yüzeyde ortalama 2-4 μm arasında yanma benzeri bir etkinin olduğu görülmüştür.

Yapılan bu deneysel çalışmada; dielektrik sıvının, işlenen yüzeye belli bir basınç altında püskürtme şeklinde yapılmasının, oluşan ısı etkinin, işparçası işleme bölgesindeki yüzeyin ergime, buharlaşma ve tekrar katılaşma çevrimine etkisinde değişime neden olduğu, mikro yapı görüntülerinin incelenmesi sonucunda görülebilmektedir.

Birincil derecede üzerinde durulan Al427915 Al/Cu MMK malzemesinin tüm mikroyapı görüntülerinin incelenmesi neticesinde, deneysel çalışmada kullanılan işleme parametrelerinin, işparçası malzemesinin işlenen yüzeyinde ve ısı etkiye maruz bölgesinde, belirgin bir mikroyapı değişikliğinin oluşmadığı görülmektedir.

Mikroyapı görüntülerinin yanında, Bölüm 5.6’da verilen, Resim 5.8 - Resim 5.12’de görülen SEM görüntülerinin incelenmesi sonucunda, işlem sonrasında yüzeyde yaklaşık 7 μm -25 μm kalınlığında beyaz bir tabakanın varlığı belirlenmiştir.

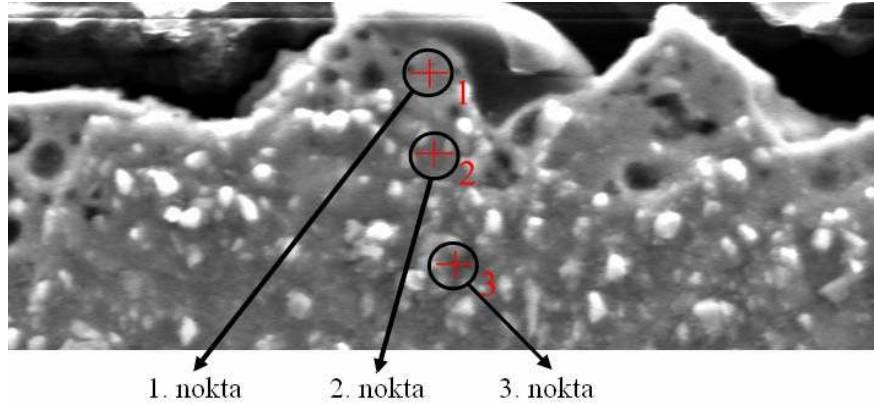
Çok yüksek t_s ve I_d değerlerinin kullanılması durumunda, işparçası mikro yapısında ve BTK değerinde, Resim 5.8’de verilen elektrolitik bakır - Al427915 Al/Cu MMK malzeme çifti SEM görüntüsünden de anlaşıldığı üzere, daha belirgin değişiklik olabileceği görülebilir.

Bu SEM görüntüsü, işleme parametrik değerleri bakımından 9 A’lik I_d değeri ile 100 μs ’lik t_s değerinin etkin işleme parametresi olarak kullanılan bir deneysel uygulamanın sonucudur.

5.6. İş Parçası Yüzeyinin ve Enine Kesitlerinin Mikro İncelemesi

EEİ ile işlenmiş işparçası malzemelerinin element kompozisyonunu (*bileşeni*) tespit etmede, SEM cihazı ile birlikte Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılmıştır. Bunun için ölçüm yapılacak deneysel numenin üç noktasında analiz yapılmıştır.

EDS ile yapılan incelemeler, deneysel çalışmada kullanılan AL427915 kodlu Al/Cu MMK malzemesi deney seti (*dokuz adet*) ile diğer dört malzemenin I_d değeri 9 A ve t_s değeri 100 μs olan işleme şartlarına ait uygulama numuneleri kapsamında yapılmıştır.

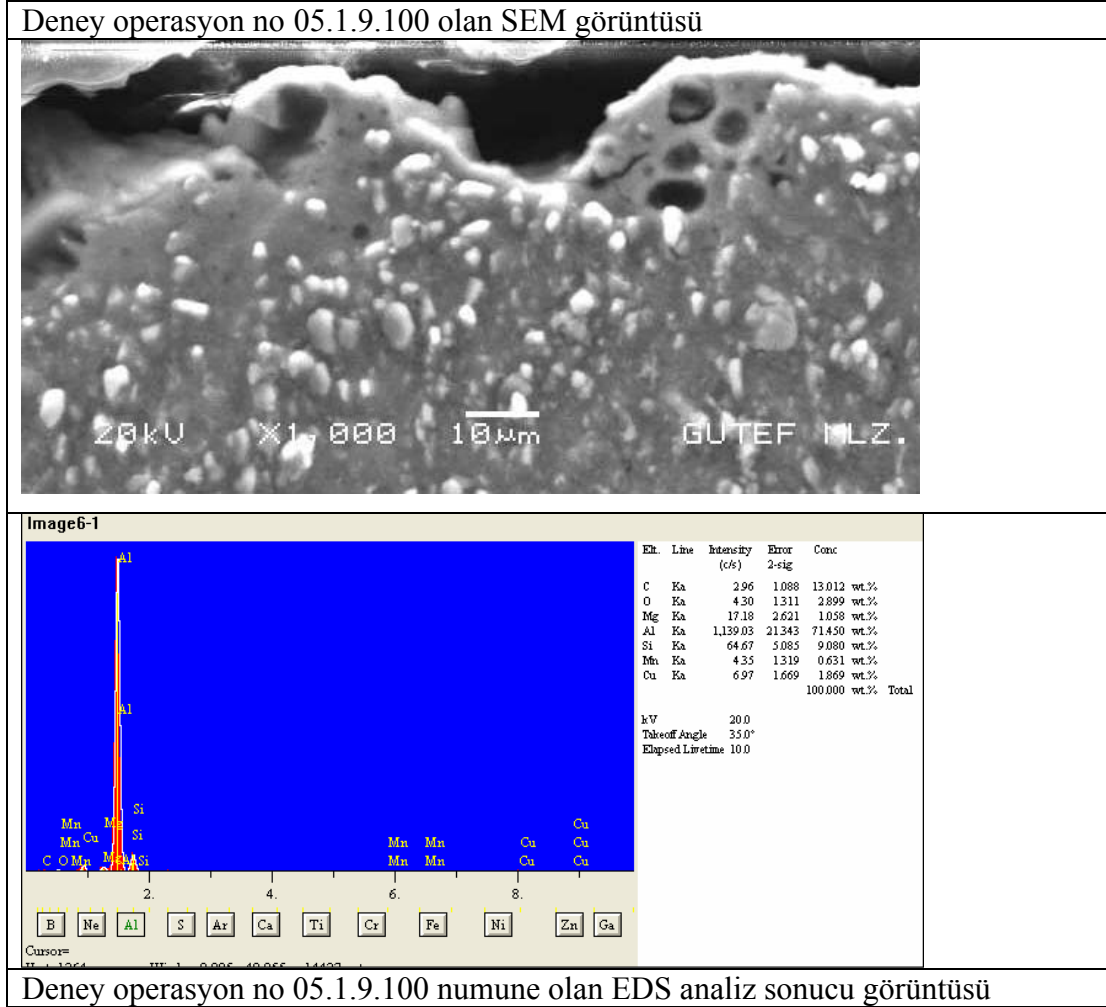


Resim 5.7. EDS analizi yapılan bir numunenin analiz noktalarının SEM görüntüsü üzerinde gösterilişi

Her bir malzeme için I_d değeri 9 A ve t_s değeri 100 μs olan işleme şartlarına ait örnek birer adet SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Elektrolitik bakır - AL427915 Al/Cu MMK malzeme çifti için Resim 5.8’de, Elektrolitik bakır – AE 109 Al-MMK Alüminyum MMK malzeme çifti için Resim 5.9’da, Elektrolitik Cu – AlMg1SiO,6-TiH₂0,8 Al-MMK malzeme çifti için Resim 5.10’da, Elektrolitik bakır – Ticari Alüminyum ETİAL 20 malzeme çifti için Resim 5.11’de, Elektrolitik bakır – 1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme çifti için Resim 5.12’de verilmiştir.

Elektrolitik bakır elektrot takımı kullanarak EEİ sürecinde malzeme çiftinden birbirlerine doğru gerçekleşen madde hareketlerinin incelenmesi öncesi deneysel

numune olarak kullanılan malzemelerin kompozisyonuna bakılmış ve referans değer olarak kullanılmak üzere, işlem görmemiş işparçalarının EDS analiz sonucunda elde edilen var olan Cu element kompozisyonu yüzde oranı olarak belirlenmiştir.

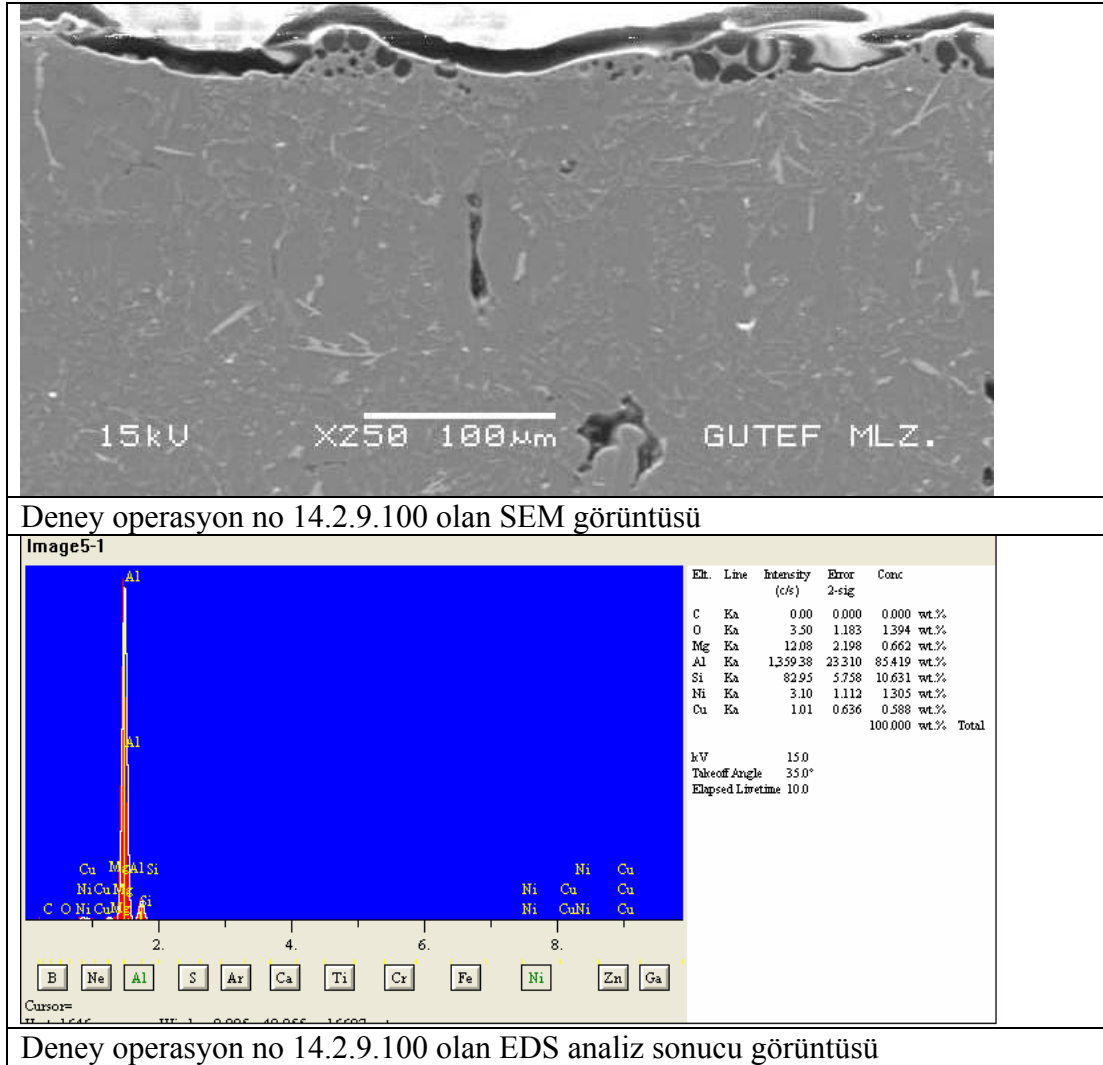


Resim 5.8. Elektrolitik bakır - Al427915 Al/Cu MMK malzeme çifti SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü

Deneyisel malzemelerin Cu element kompozisyon değerleri Çizelge 5.7’de % ağırlık cinsinden verilmiştir.

Çizelge 5.7. Deneyisel malzemelerin Cu element kompozisyon değerleri

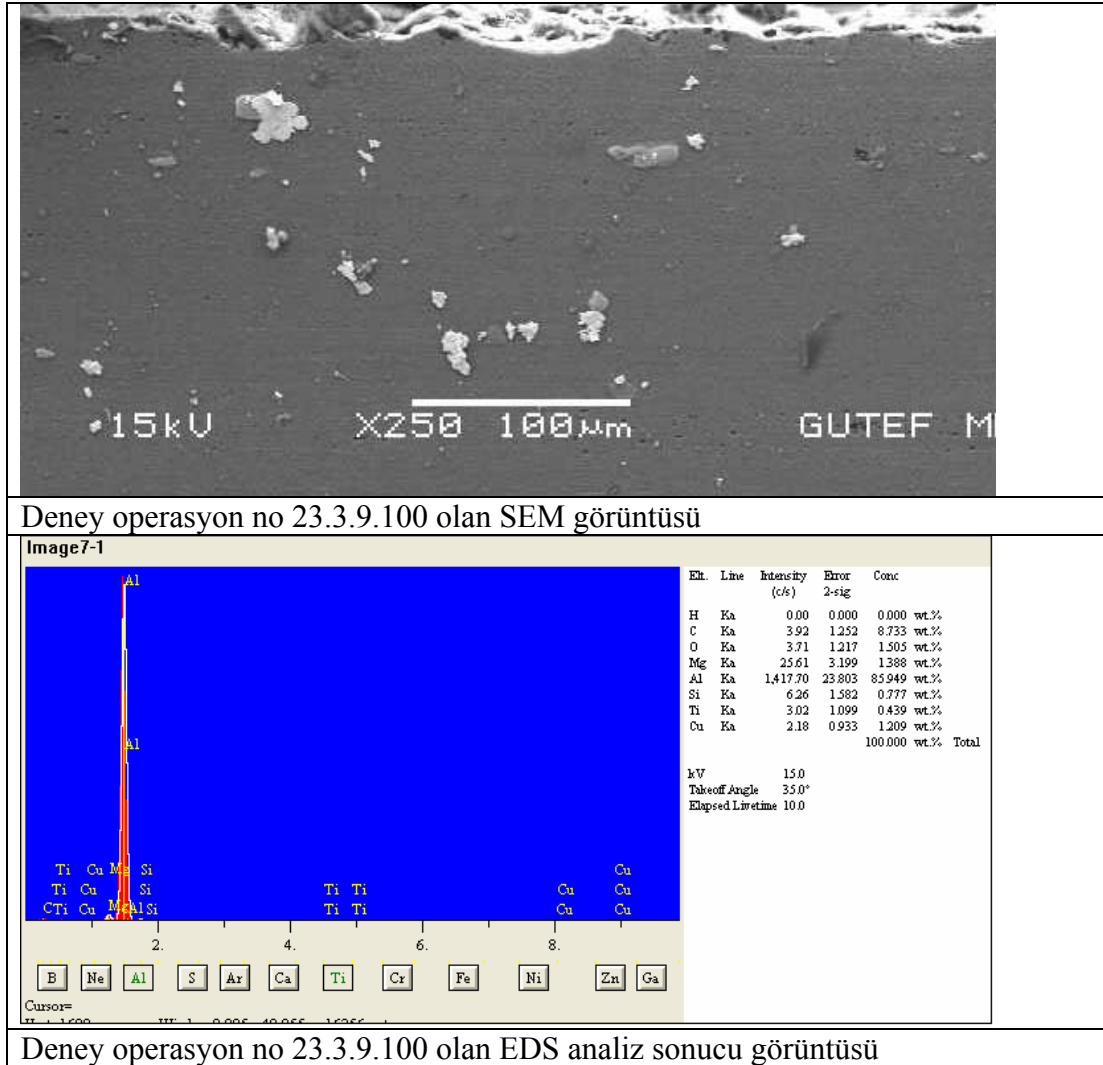
Deneyisel Malzemenin adı	Cu referans değeri, % ağırlığı cinsinden
Al427915 Al/Cu MMK malzeme	0,281
AE 109 Al-MMK malzeme	3,522
AlMg1SiO ₆ -TiH ₂ 0,8 Al-MMK malzeme	0,000
Ticari Alüminyum ETİAL 20	0,000
1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme	0,000



Resim 5.9. Elektrolitik bakır – AE 109 Al-MMK malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü

Şekil 5.52 – Şekil 5.54, pozitif kutuplu elektrolitik bakır elektrot takımı ile işlenen AL427915 kodlu Al/Cu MMK malzeme deney numunelerinde; 6 A, 9 A ve 12,5 A boşalım akımı değeri için, 50 μs, 100 μs ve 200 μs vurum süresi değerindeki işleme şartlarında, elektrot takımından deney numunesine Cu malzeme difüzyonu yüzde oranı grafiğini göstermektedir.

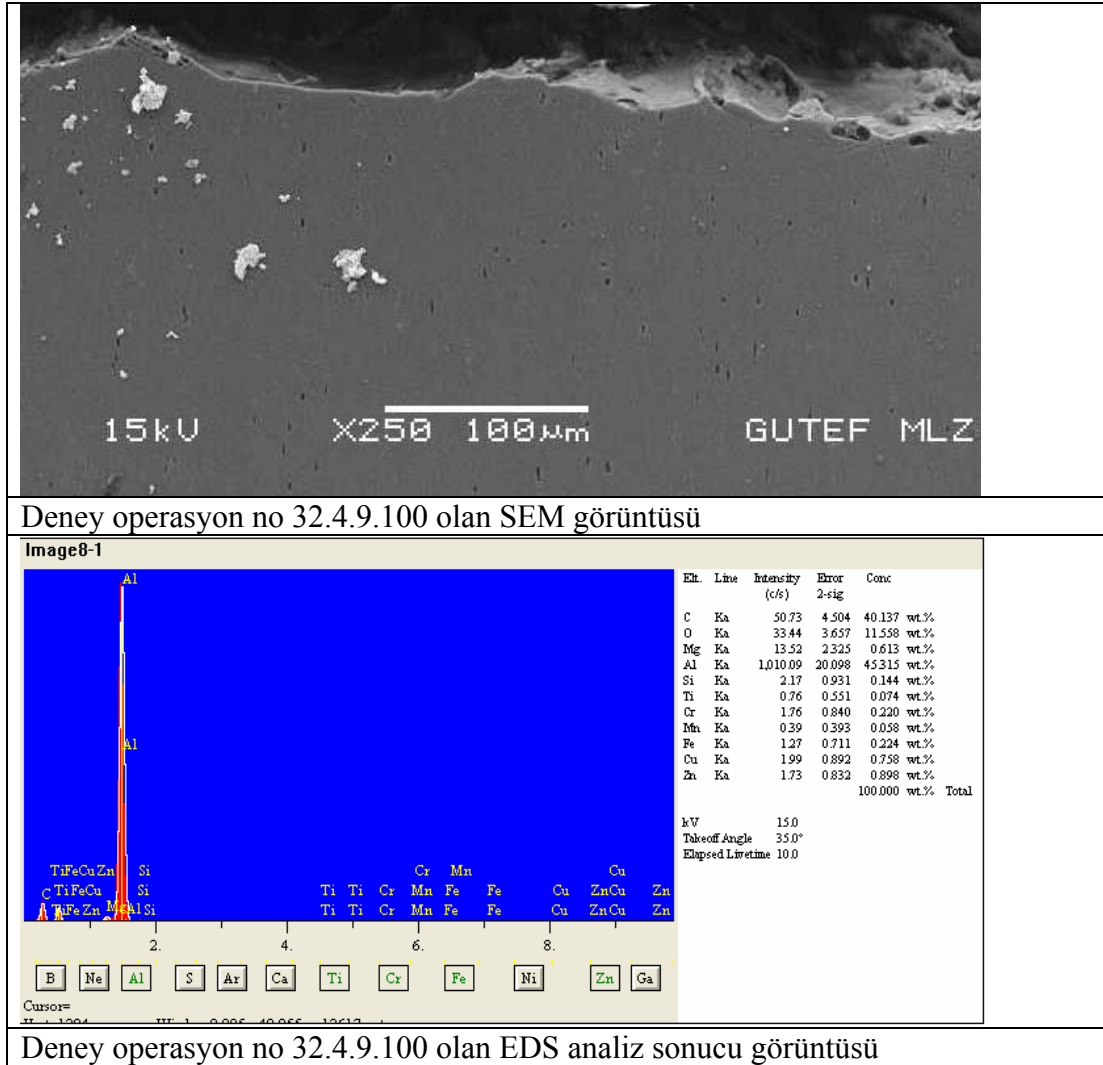
Şekil 5.55’te ise, beş farklı işparçası deney numunelerinin, boşalım akımı 9 A ve vurum süresi 100 μs olan işleme şartlarındaki elektrot takımından işparçasına malzeme Cu difüzyonu yüzde oranları grafiği verilmiştir.



Resim 5.10. Elektrolitik bakır – AlMg1SiO,6-TiH₂O,8 Al-MMK malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü

Şekil 5.52 - Şekil 5.54’de verilen deneysel verilere dayalı grafiksel sonuçlar ile, çalışmada kullanılan işparçası malzemelerine ait elde edilen veriler; işlenmemiş deney malzemelerinin referans değerleri baz alınarak incelendiğinde, vurum süresine göre ölçüm noktalarına bağlı kalarak, elektrot takımından işparçasına malzeme difüzyonu olduğu tespit edilmiştir.

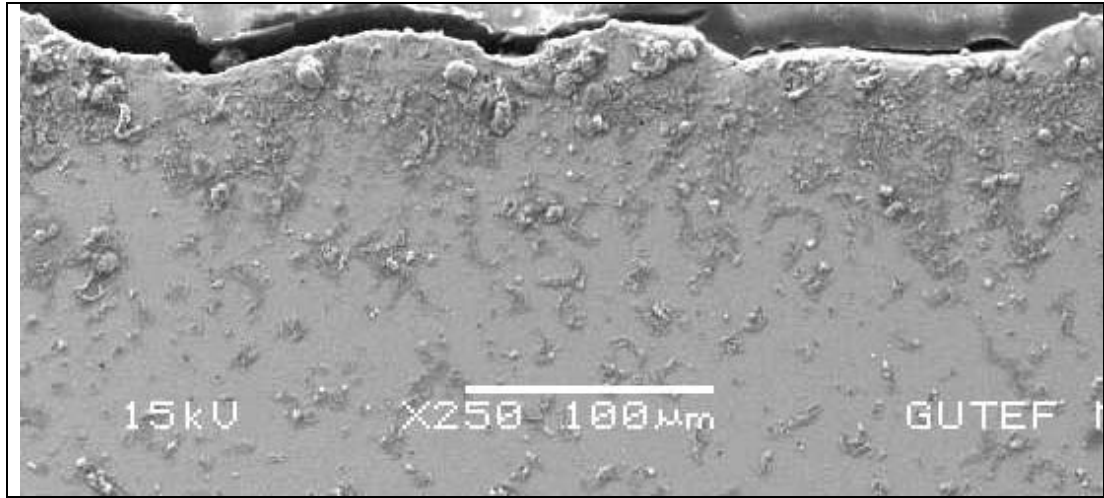
İşlenmiş deneysel malzeme numunelerinin kimyasal bileşimdeki bu değişim; elektrolitik bakırın elektrot takımı olarak kullanarak elektro erozyon ile işleme sürecinde, malzeme çiftinden birbirlerine doğru gerçekleşen madde hareketlerinden dolayı olmaktadır.



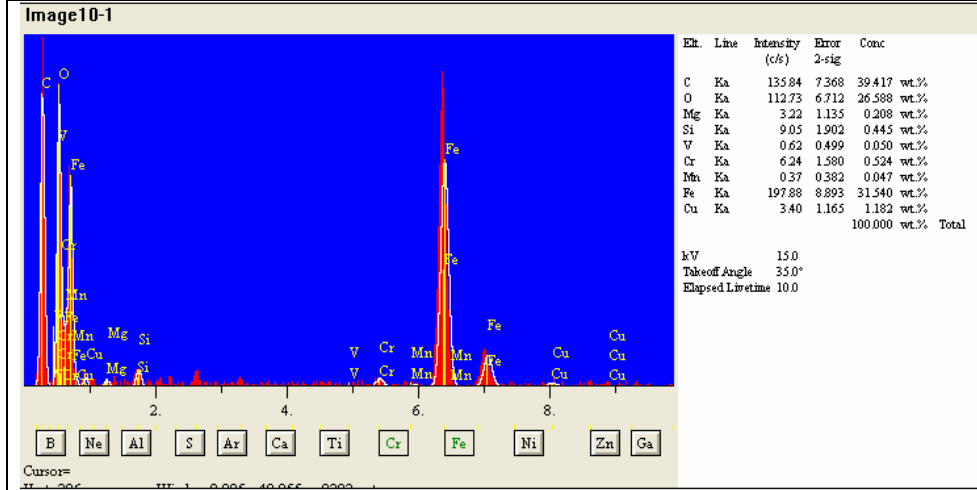
Resim 5.11. Elektrolitik bakır –Ticari Alüminyum ETİAL 20 malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü

Malzeme difüzyonu, iş parçası malzemelerinin işlenme özellikleri, I_d ve t_s gibi işleme parametrik değerleriyle olan ilişkinin yanında, voltaj, dielektrik sıvı ve elektrot takımı malzemeleri gibi çeşitli parametrelere de bağlıdır. Bu olayı etkileyen söz konusu parametrelere, diğer elektriksel olan veya olmayan parametrelerde eklenebilir.

Farklı vurum süresi değerleri için, EDS analizi ile işlenen işparçalarının kompozisyonundaki, elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu yüzde oranları referans değerleri, boşalım akımı için % ağırlığı cinsinden Çizelge 5.8 ile Çizelge 5.11’de ayrı ayrı verilmiştir.



Deney operasyon no 41.5.9.100 olan SEM görüntüsü



Deney operasyon no 41.5.9.100 olan EDS analiz sonucu görüntüsü

Resim 5.12 Elektrolitik bakır –1.2210 115CrV3 kodlu civa çeliği malzeme çifti için SEM ve EDS analiz sonuçları görüntüsü

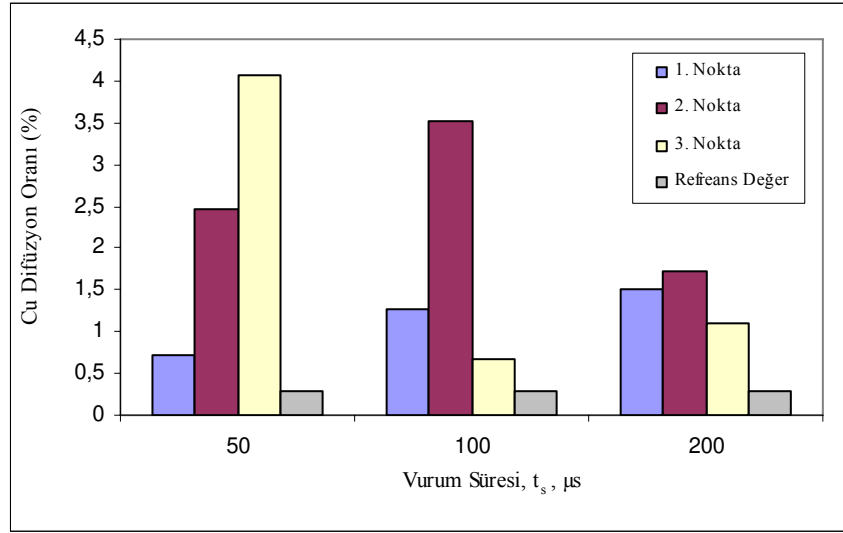
Yapılan değerlendirmelerde boşalım akımına bağlı olarak malzeme transfer değişiminin olduğu görülmektedir.

Bu değişim vurum süresine göre de söz konusudur. Bütün ölçüm yapılan bölgelerin her bir noktasında, malzeme transfer değişimi gözükmemektedir.

Bunun nedeni olarak, yapılan dielektrik püskürtmenin işleme bölgesindeki fonksiyonuna bağlı olarak, farklı malzeme difüzyonun olduğu sanılmaktadır.

Çizelge 5.8. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 6 A için)

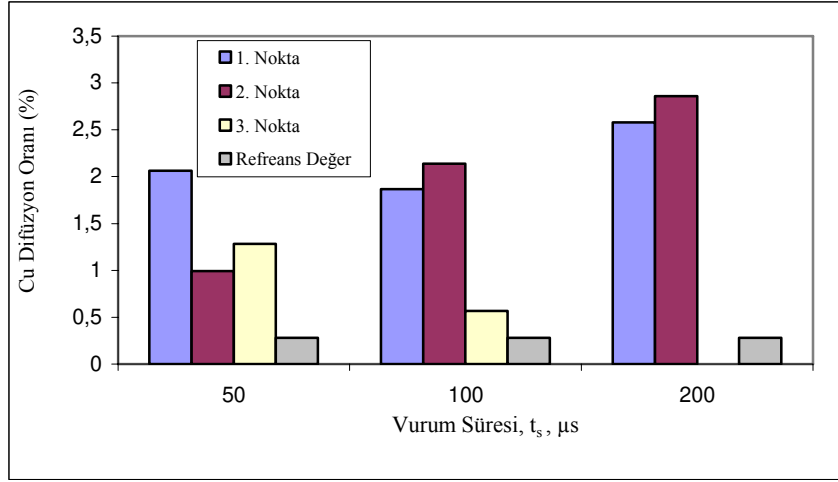
Cu referans değeri, % ağırlığı cinsinden				
Vurum süresi, $t_s, \mu s$	Ölçüm yapılan nokta değerleri			
	1. nokta	2. nokta	3. nokta	Referans değeri
50	0,719	2,475	4,059	0,281
100	1,26	3,524	0,674	0,281
200	1,506	1,713	1,095	0,281



Şekil 5.52. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (6 amper için)

Çizelge 5.9. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 9 A için)

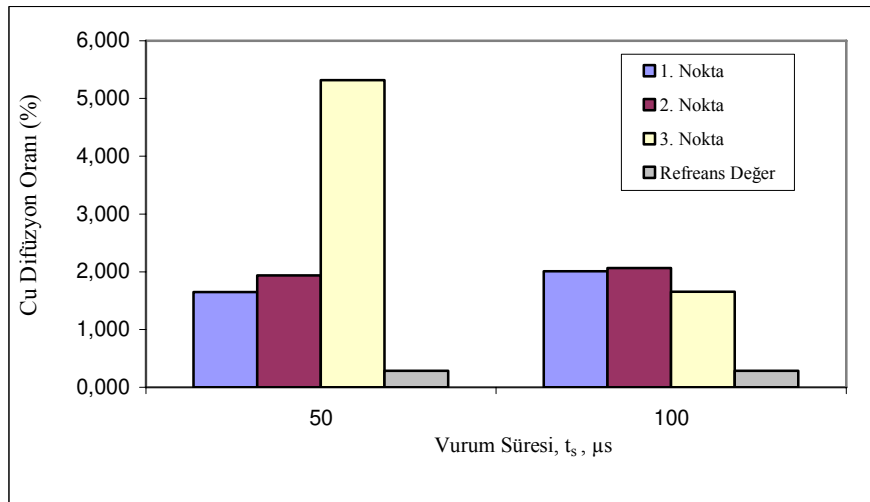
Cu referans değeri, % ağırlığı cinsinden				
Vurum süresi, $t_s, \mu s$	Ölçüm yapılan nokta değerleri			
	1. nokta	2. nokta	3. nokta	Referans değeri
50	2,062	0,991	1,283	0,281
100	1,869	2,140	0,569	0,281
200	2,579	2,859	0,000	0,281



Şekil 5.53. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (9 amper için)

Çizelge 5.10. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değeri (I_d , 12,5 A için)

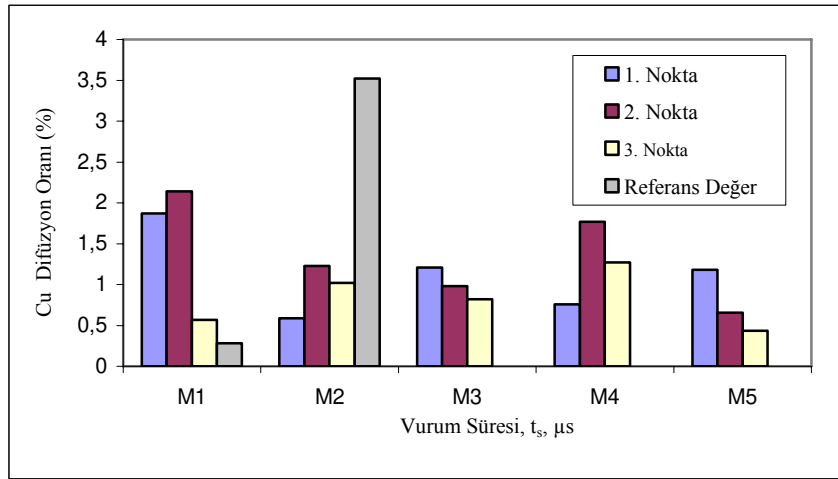
Cu referans değeri, % ağırlığı cinsinden				
Vurum süresi, t_s , μs	Ölçüm yapılan nokta değerleri			
	1. nokta	2. nokta	3. nokta	Referans değeri
50	1,650	1,938	5,319	0,281
100	2,009	2,067	1,655	0,281



Şekil 5.54. Farklı vurum süreleri için elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları (12,5 amper için)

Çizelge 5.11. Farklı t_s değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme transferi % ağırlığı cinsinden referans değeri (t_s , 100 μ s, I_d , 9 A için)

Cu referans değeri, % ağırlığı cinsinden				
Malzeme adı ve kodu	Ölçüm yapılan nokta değerleri			
	1. nokta	2. nokta	3. nokta	Referans değeri
Al427915 Al/Cu MMK malzeme, M1	1,869	2,140	0,569	0,281
AE 109 Al-MMK malzeme, M2	0,588	1,226	1,019	3,522
AlMg1SiO,6-TiH ₂ 0,8 Al-MMK malzeme, M3	1,209	0,980	0,820	0,000
Ticari Alüminyum ETİAL 20 malzeme, M4	0,758	1,767	1,271	0,000
1.2210 115CrV3 kodlu cıva çeliği malzeme, M5	1,182	0,655	0,437	0,000



Şekil 5.55. Boşalım akımı 9 A, vurum süresi 100 μ s olan işleme şartlarında elektrot takımından işparçasına malzeme (Cu) difüzyonu yüzde oranları

Resimlerde verilen EDS analiz görüntüleri incelendiğinde yüzeyde mevcut olan elementler, onların enerji seviyelerindeki tepe noktalarında gösterilmiştir. Çizelgelerde verilen farklı t_s ve I_d değerleri için elektrot takımından işparçasına Cu malzeme difüzyonu % ağırlığı cinsinden referans değerleri, elektrot takımı olarak kullanılan elektrolitik bakırla mukayese edildiğinde, işlenen parçaya elektrottan bakır göçü farklılık göstermektedir.

Referans değere göre, ölçüm yapılan noktalarda farklı değerler tespit edilmiştir. 50 ve 100 μ s'lik her bir vurum sürelerinde ölçüm yapılan noktalarda artış olduğu görülmüştür. 200 μ s'lik vurum süresinde ise, ölçüm yapılan bölgelerde çok ciddi bir artış olduğu gözlenmiştir.

5.7. Elektriksel İletkenlik Değerinin Etkisinin İncelenmesi

5.7.1. EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve I_d değerlerine göre İİH ve EAH değişiminin değerlendirilmesi

Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'te EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve I_d değerlerine göre beş malzemenin (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme, AE109 al- MMK malzeme, AlMg1SiO,6TiH₂O,8 MMK malzeme, ticari alüminyum ETIAL 20 malzeme ve soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin*) İİH ve EAH'nın I_d ile değişimlerinin değerlendirilmesine yönelik tablo bilgileri verilmiştir. Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'te verilen tablo bilgileri, deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, I_d , t_s ve İİH ile EAH veri tabanına göre oluşturulmuştur.

Deneysel malzemelerin elektriksel iletkenlik ($\sigma_{iletkenlik}$) değerleri ve İİH performans sonuçları deneysel çalışmada kullanılan işparçası malzemelerine göre incelendiğinde; Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'te de görüldüğü üzere, AL427915 Al/Cu MMK malzemenin işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, I_d ve $\sigma_{iletkenlik}$ değişiminin İİH üzerine etkisi, uygulanan bütün boşalım akımının t_s artışı ile doğru orantılı olarak İİH'nın yükseldiği belirlenmiştir. Bu yükseliş, t_s değerinin sabit kabul edildiği zaman ise I_d değerinin yükselişinin aksine bir düşüş olduğu gözlenmektedir. Bu durum, AlMg1SiO,6TiH₂O,8 MMK malzeme ile AE109 Al-MMK malzemenin işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusudur. Yalnız her iki malzeme için de 100 μs 'lik t_s değeri, en az elektrot aşınma hızında en yüksek işparçası işleme hızı edilebildiği görülebilmektedir.

Mukayese amaçlı kullanılan ETIAL 20 ticari alüminyum malzemenin deneysel sonuçlarına da bakıldığında, M2 ve M3 kodlu malzemelerin performans sonuçlarının, I_d değeri yükseldikçe, İİH değerlerinin benzer oranlarda azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin deneysel sonuçlarına da bakıldığında performans çıktıları, benzer sonuçlar vermektedir.

Çizelge 5.12. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{\text{iletkenlik}}$, t_s ve I_d ile İİH değerleri

Vurum süresi, t_s , μs	Boşalım Akımı, I_d , A	Deneysel Malzemelerin Kodu (M1-M5)				
		M1	M2	M3	M4	M5
		Elektriksel İletkenlik ($\sigma_{\text{iletkenlik}}$) Değerleri				
		0,0860	0,0555	0,0599	0,0873	0,0876
		İİH Performans Sonuçları				
t_s , 50 μs	6	23,710	20,210	24,980	32,060	2,906
	9	12,000	25,390	23,150	34,220	2,722
	12,5	3,915	23,090	12,560	20,430	3,393
t_s , 100 μs	6	41,950	27,190	47,590	65,330	9,393
	9	36,270	58,420	49,610	78,030	9,134
	12,5	10,190	52,660	18,540	59,410	7,304
t_s , 200 μs	6	57,370	82,990	72,560	98,910	19,550
	9	58,730	68,170	74,060	132,100	22,320
	12,5	18,600	56,860	22,850	101,300	15,160

Çizelge 5.13. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{\text{iletkenlik}}$, t_s ve I_d ile EAH değerleri

Vurum süresi, t_s , μs	Boşalım Akımı, I_d , A	Deneysel Malzemelerin Kodu (M1-M5)				
		M1	M2	M3	M4	M5
		Elektriksel İletkenlik ($\sigma_{\text{iletkenlik}}$) Değerleri				
		0,0860	0,0555	0,0599	0,0873	0,0876
		EAH Performans Sonuçları				
t_s , 50 μs	6	0,274	0,166	0,174	0,239	0,596
	9	0,073	0,013	0,077	0,112	0,174
	12,5	0,060	0,037	0,024	0,046	0,130
t_s , 100 μs	6	0,676	0,627	0,466	0,672	2,454
	9	0,213	0,142	0,180	0,271	1,380
	12,5	0,167	0,014	0,035	0,110	0,661
t_s , 200 μs	6	1,230	0,968	1,051	1,301	6,036
	9	0,639	0,854	0,450	0,583	3,564
	12,5	0,319	0,015	0,061	0,185	1,138

5.7.2. EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve t_s değerlerine göre İİH ve EAH değişiminin değerlendirilmesi

Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15'te EEİ'de işparçası malzemelerinin elektriksel iletkenlikleri ve t_s değerlerine göre beş malzemenin (*Al427915 Al/Cu MMK malzeme*, *AE109 al- MMK malzeme*, *AlMg1SiO,6TiH20.8 MMK malzeme*, *ticari alüminyum ETIAL 20 malzeme* ve *soğuk iş takım çeliği veya diğer adıyla cıva çeliği (1.2210 115CrV3) malzemenin*) İİH ve EAH'nın t_s ile değişimlerinin değerlendirilmesine

yönelik tablo bilgileri gösterilmiştir. Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15'te verilen ilgili tablo bilgileri, deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, I_d , t_s ve İİH ile EAH veri tabanına göre oluşturulmuştur.

Çizelge 5.14. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile İİH değerleri

Boşalım Akımı, I_d , A	Vurum süresi, t_s , μs	Deneysel Malzemelerin Kodu (M1-M5)				
		M1	M2	M3	M4	M5
		Elektriksel İletkenlik ($\sigma_{iletkenlik}$) Değerleri				
		0,0860	0,0555	0,0599	0,0873	0,0876
		İİH Performans Sonuçları				
6	50	23,710	20,210	24,980	32,060	2,906
	100	12,000	25,390	23,150	34,220	2,722
	200	3,915	23,090	12,560	20,430	3,393
9	50	41,950	27,190	47,590	65,330	9,393
	100	36,270	58,420	49,610	78,030	9,134
	200	10,190	52,660	18,540	59,410	7,304
12,5	50	57,370	82,990	72,560	98,910	19,550
	100	58,730	68,170	74,060	132,100	22,320
	200	18,600	56,860	22,850	101,300	15,160

Çizelge 5.15. Deneysel malzemelerinin $\sigma_{iletkenlik}$, t_s ve I_d ile EAH değerleri

Boşalım Akımı, I_d , A	Vurum süresi, t_s , μs	Deneysel Malzemelerin Kodu (M1-M5)				
		M1	M2	M3	M4	M5
		Elektriksel İletkenlik ($\sigma_{iletkenlik}$) Değerleri				
		0,0860	0,0555	0,0599	0,0873	0,0876
		EAH Performans Sonuçları				
6	50	0,166	0,166	0,174	0,239	0,596
	100	0,013	0,013	0,077	0,112	0,174
	200	0,037	0,037	0,024	0,046	0,130
9	50	0,627	0,627	0,466	0,672	2,454
	100	0,142	0,142	0,180	0,271	1,380
	200	0,014	0,014	0,035	0,110	0,661
12,5	50	0,968	0,968	1,051	1,301	6,036
	100	0,854	0,854	0,450	0,583	3,564
	200	0,015	0,015	0,061	0,185	1,138

Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15'te görüldüğü üzere, AL427915 Al/Cu MMK malzemenin işparçası olarak kullanıldığı deneysel numunelerde, t_s değeri ile $\sigma_{iletkenlik}$ değişiminin İİH üzerine etkisi, uygulanan bütün I_d değerlerinde t_s artışı ile doğru

orantılı olarak İİH'nın düştüğü tespit edilmiştir. Bu düşüş, t_s değerinin sabit kabul edildiği zaman ise, I_d değerinin yükselişine paralel İİH değerinde de bir yükseliş olduğu görülmektedir. Bu durum, işparçası olarak kullanılan diğer deneysel numunelerin performans çıktıları için de söz konusudur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışma için üç farklı MMK malzeme belirlenmiştir. Bu çalışma için kıyaslama yapmak üzere iki farklı metal malzeme de seçilmiştir. MMK ve diğer malzemelerin işleme parametrelerine bağlı olarak, İİH, EAH ve BA üzerine etkileri ile SEM kullanılarak mikro yapıların ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada, tek bir elektrot takımı ile yapılan beş farklı malzemenin işlenebilirlikleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. EEİ sürecinde, deneysel çalışmada kullanılan iş parçalarının malzeme aşınma mekanizmalarında boşalım akımı ve vurum süresinin, etkin ve önemli bir işleme parametresi olduğu görülmüştür. Bu sonucu, literatürde yer alan çalışma sonuçları da doğrulamaktadır [2, 4, 7-17].
2. Al/SiC_p takviyeli MMK malzemelerin, EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilir özelliklere sahip olduğu görülmüştür. EEİ yöntemi, dikkate alınan işleme şartları altında elde edilen İİH, EAH ve BA performans sonuçlarıyla yayınlanan diğer araştırma sonuçları uyumludur [2, 4, 7-11, 14-17].
3. Performans ölçümlerinin değerlendirilmesi sonucunda İİH, I_d değerinin artışı doğrultusunda, artış eğilimi sergilemiştir. Bu durum, artan t_s değeri ile ilişkili olarak belli bir değere kadar artmakta, daha sonra da bu değerin, yeniden azalmaya başlamakta olduğu görülmektedir.
4. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü değerleri rakamsal değere dönüşecek şekilde ölçülmemiştir. Ancak, SEM ile elde edilen mikroyapı görüntülerinin incelenmesi sonucunda, numunelerin işlenen yüzeylerinde oluşan krater şekillerinin biçiminin, işparçasının işleme parametrelerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.
5. EEİ yönteminin uygunluk derecesini de gösteren BA, işleme parametreleri açısından malzemelerin işlenmesinden elde edilen sonuçlara göre; AL427915

Al/Cu MMK malzeme için 9 A boşalım akımının, 200 μ s vurum süresinin uygun olacağı görülmüştür. Bunun yanında, aynı malzeme için işleme süresi bakımından ise, 12,5 A boşalım akımının, 100 μ s vurum süresi değeri önerilebilir.

6. Deneysel çalışmada elektrotlar arası malzeme difüzyonun gerçekleştiği EDS analizi sonucunda belirlenmiştir. Elektrot takımından işlenen parçaya belli bir oranda malzeme geçişi olmaktadır. Bunun yanında, işlenen parçadan elektrotta belli bir miktar malzeme geçişinin de oluşacağı kabul edilmektedir. Bu çalışmada, kör delik işleme yapıldığından, komple delik işlemeye nazaran elektrottan işlenen parçaya daha fazla bakır difüzyonu olduğu sanılmaktadır.
7. Deneysel malzemelerin elektriksel iletkenlik ($\sigma_{iletkenlik}$) değeri ve İİH performans sonuçları deneysel çalışmada kullanılan işparçası malzemelerine göre incelendiğinde; I_d ve $\sigma_{iletkenlik}$ değişiminin İİH üzerine etkisi, uygulanan bütün boşalım akımının t_s artışı ile doğru orantılı olarak İİH'nın yükseldiği belirlenmiştir. Bu yükseliş, t_s değerinin sabit kabul edildiği zaman ise I_d değerinin yükselişinin aksine bir düşüş olduğu gözlenmektedir. Ayrıca; Deneysel numunelerde, t_s değeri ile $\sigma_{iletkenlik}$ değişiminin İİH üzerine etkisi, uygulanan bütün I_d değerlerinde t_s artışı ile doğru orantılı olarak İİH'nın düştüğü tespit edilmiştir. Bu düşüşün, t_s değerinin sabit kabul edildiği zaman ise, I_d değerinin yükselişine paralel İİH değerinde de bir yükseliş olduğu görülmüştür.
8. Tüm denemeler sonucunda, İİH, EAH ve BA ile ilgili matematiksel modelleme için, non-linear problemler için çok iyi çözümler sunan YSA modeli seçilmiş, bu modelin kullanılabilmesi için deneysel sonuçlar (0,1) aralığında normalize edilmiştir.
9. YSA modellemesinin sonuçlarına göre kabul edilebilirlik derecesi ($0,96 < R^2 < 1$) olan analitik ifadeler türetilmiştir.
10. YSA ile yapılan matematiksel modellemeyle elde edilen denklemler, EEİ sürecini hangi parametrenin birincil derecede etkilediğinin bir göstergesi olarak da

değerlendirilmiştir. Bu husus, EEİ sürecinde işleme parametrelerinin hangi sırada dikkate alınması açısından dikkate değer bulunmuştur.

11. Elde edilen analitik ifadeler yardımıyla deney yapılmaksızın yüksek doğrulukta İİH, EAH ve BA için tahminler yapılabilmesi mümkün olmuştur.

Daha sonra yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir:

Al-MMK malzemeler için önemli olan takviye elemanı parçacık boyutunun değişiminin EEİ tekniği ile işlenebilirliğe etkileri detaylı olarak araştırılabilir. Hali hazırda bu kapsamda yoğun araştırma faaliyetlerinin olduğu literatür incelemelerinden de anlaşılmaktadır.

MMK malzemenin EEİ yöntemiyle işlenmesinde, sadece bakır elektrot yerine, bakır tel takviyeli Al matrisli kompozit elektrot takımlarının kullanılabilirliği ve bağlı aşınma (BA) oranları açısından işleme performans çıktıları incelenebilir.

EEİ tekniği ile MMK malzemelerin işlenmesinde elektrot takım aşınmasını, sert seramik parçacıklar ile matris malzemesinin dayanımı da etkilemektedir. MMK malzemelere ısı işlemler uygulama halinde işlenebilirliğinin nasıl değiştiği araştırılabilir.

MMK malzemelerin işlenmesinde elektrot takımları aşınmaya maruz kaldığı için işlenen iş parçası boyutlarında istenilen ölçü tamlığı elde edilememektedir. Bu husus, yapılan deneysel çalışmada görülmüştür. Bu nedenle, hem boyutsal doğruluk hem de daha kaliteli bir yüzey gerektiği göz önüne alınarak, daha geniş kapsamlı ve elektro erozyon ile işleme de daha farklı işlem uygulama biçimli, örneğin elektro erozyon ile taşlama gibi alternatif işleme yöntemleri üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Gatto, A., Iuliano, L., “Cutting mechanisms and surface features of WED machined metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1 – 3): 209 – 214 (1997).
2. Hung, N.P., Yang, L.J., Leong, K.W., “Electrical discharge machining of cast metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 44 (3 – 4): 229 – 236 (1994).
3. Çiftçi, İ. “Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-30 (2003).
4. Hocheng, H., Lei, W.T., Hsu, H.S., “Preliminary study of material removal in electrical – discharge machining of SiC / Al”, *Journal of Materials Processing Technology*, 63 (1 – 3): 813 – 818 (Jan. 1997).
5. Ramulu, M., Komanduri, R., “Machining of advanced composites”, *ASME Publication*, New York, 45-66 (1993).
6. Komanduri, R., “Machining of fiber – reinforced composites”, *Machining Science and Technology*, 1 (1): 113 – 152 (Aug. 1997).
7. J.S. Soni, ve G. Chakraverti, “Experimental Investigation on Migration of Material During EDM of Die Steel”, *Journal of Materials Projecting Technology*, 56: 439-451 (1996).
8. B. Mohana, A. Rajadurai ve K.G. Satyanarayana, “Electric discharge machining of Al–SiC metal matrix composites using rotary tube electrode”, *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154: 978–985 (2004).
9. F. Müller ve J. Monaghan, “Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 1351–1366 (2000).
10. Biing Hwa Yan, Che Chung Wang, Han Ming Chow ve Yan Cherng Lin, “Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball burnishing for Al₂O₃/6061Al composite”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 1403–142 (2000).
11. B. H. Yan, C. C. Wang, W. D. Liu ve F. Y. Huang, “Machining Characteristics of Al₂O₃/6061Al Composite using Rotary EDM with a Disklike Electrode”, *Int. J Adv Manuf Technol*, 16: 322–333 (2000).
12. Chien-Cheng Liu ve Jow-Lay Huang, “Effect of the electrical discharge machining on strength and reliability of TiN/Si₃N₄ composites”, *Ceramics International*, 29 (6): 679-687 (2003).

13. K.M. Shu ve G.C. Tu, “Study of electrical discharge grinding using metal matrix composite electrodes” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 845–854 (2003).
14. R. Karthikeyan, P.R. Lakshmi Narayanan ve R.S. Naagarazan, “Mathematical modelling for electric discharge machining of aluminium–silicon carbide particulate composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 87: 59–63 (1999).
15. M. Ramulu, G. Paul ve J. Patel, “EDM surface effect on the fatigue strength of a 15 vol % SiC/Al metal matrix composite material”, *Composite Structure*, 54: 79-86 (2001).
16. P. Narender Singh, K. Raghukandan ve B.C. Pai, “Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al–10%SiC_p composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156: 1658-1661 (2004).
17. P. Narender Singh, K. Raghukandan, M. Rathinasabapathi ve B.C. Pai, “EDM of Al–10%SiC_p as-cast metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156: 1653–1657 (2004).
18. Ciftci, I., Turker, M. and Seker, U. “Evaluation of tool wear when machining SiC_p-reinforcedAl-2014 alloy matrix composites”, *Materials and Design*, 25: 251-255 (2004).
19. Sur, G., “Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 53-56 (2002).
20. Akbulut, H., “Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı özellik ilişkilerinin incelenmesi“, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 22-23 (1994).
21. Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J., “Particulate reinforced metal matrix composites – a review”, *Journal of Materials Science*, 26: 1137-1156 (1991).
22. Tosun, G., “2124 AL/SiC Kompozitinin işlenmesinde matris özelliklerinin işleme şartlarına etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-24 (2002).
23. Clyne, T.W. and Withers, P.J., An introduction to metal matrix composites, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 1-400 (1993).
24. Jawaid, A., Barnes, S. and Ghadimzadeh, S.R., “Drilling of particulate aluminium silicon carbide metal matrix composites”, Proceedings of the

- Machining of Composite Materials Symposium, *ASM Materials Week*, Chicago, Illinois, 35-47 (1992).
25. DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kohser, R.A., "Materials and processes in manufacturing", *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 214-652 (1997).
 26. Gül, F., "Seramik parçacık takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri ve özellikleri", *M.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 15: 101-114 (1999).
 27. Yusuf Şahin, "Kompozit Malzemelere Giriş", *Gazi Kitabevi*, Ankara, 1-36 (2000).
 28. Cole, G.S., and Sherman, A.M., "Lightweight materials for automotive applications", *Materials Characterisation*, 35: 3-9 (1995).
 29. Clyne, T.W. and Withers, P.J., An introduction to metal matrix composites, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 1-400, (1993).
 30. Kuruvilla, A.K., Prasad, K.S., Bhanuprasad, V.V. and Mahajan, Y.R., "Microstructure-property correlation in Al/TiB₂ (XD) composites", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 24: 873-878 (1990).
 31. Pandey, P. C., Shan, H. S., "Modern Machining Processes", *Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited*, New Delhi, 84-114 (1980).
 32. N. F. Petrofes ve A. M. Gadalla, "Processing Aspects of Shaping Advanced Materials by Electrical Discharge Machining", *Adv. Materials & Manufacturing Processes*, 3 (1): 27-53 (1988).
 33. Poco, *EDM Technology Manual*, Poco Graphite Inc., 1-45 (2000).
 34. K. H. Ho ve S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (13): 1287-1300 (October 2003).
 35. M. Bayramoglu and A.W. Duffill, "Systematic investigation on the use of cylindrical tools for the production of 3D complex shapes on CNC EDM machines.", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 34 (3): 327-339.
 36. A. Arthur, P.M. Dickens and R.C. Cobb, Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes. *Rapid Prototyping J.*, 2 (1): 4-12 (1996).
 37. Benedict, G. F., "Nontraditional Manufacturing Processes" , *Marcel Dekker Inc.*, New York and Basel, 207-255 (1987).

38. Roethel, F., Garbais, V. ve Kosec, L., “Contribution to the Micro-analysis of the Spark Eroded Surfaces”, *Ann CIRP*, 25 (1): 135-140 (1976).
39. A. Erden, “Effect of materials on the mechanism of electric discharge machining (EDM)”, *J. Eng. Mater. Technol.*, 105: 132–138 (1983).
40. A. Gangadhar, M.S. Sunmugam and P.K. Philip, “Pulse train studies in EDM with controlled pulse relaxation”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 32 (5): 651–657 (1992).
41. A. Singh and A. Ghosh, “A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 39 (4): 669–682 (1999).
42. A.M. Gadalla and W. Tsai, “Machining of WC–Co composites”, *Mater. Manuf. Processes*, 4 (3): 411–423 (1989).
43. T.C. Lee and W.S. Lau, “Some characteristics of electrical discharge machining of conductive ceramics”, *Mater. Manuf. Processes*, 6 (4): 635–648 (1991).
44. N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya and N. Saito, “Electrode wear process in electrical discharge machining”, *Ann. CIRP*, 44 (1): 165–168 (1995).
45. J. Marafona and C. Wykes, “A new method of optimising material removal rate using EDM with copper–tungsten electrodes”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40 (2): 153–164 (2000).
46. N. Mohri, H. Takezawa, K. Furutani, Y. Ito and T. Sata, “A new process of additive and removal machining by EDM with a thin electrode”, *Ann. CIRP*, 49 (1): 123–126 (2000).
47. L.C. Lee, L.C. Lim, V. Narayanan and V.C. Venkatesh, “Quantification of surface damage of tool steels after EDM”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 28 (4): 359–372 (1988).
48. L.C. Lee, L.C. Lim, Y.S. Wong and H.H. Lu, “Towards a better understanding of the surface features of electro-discharge machined tool steels”, *J. Mater. Process. Technol.*, 24: 513–523 (1990).
49. L.C. Lim, L.C. Lee, Y.S. Wong and H.H. Lu, “Solidification microstructure of electrodischarge machined surfaces of tool steels”, *Mater. Sci. Technol.*, 7: 239–248 (1991).
50. P.C. Pandey and S.T. Jilani, “Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM”, *Precision Eng.*, 8 (2): 104–110 (1986).

51. Y.C. Lin, B.H. Yan and F.Y. Huang, "Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 18 (9): 673–682(2001).
52. O.A. Abu Zeid, "On the effect of electro-discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel", *J. Mater. Process. Technol.*, 68 (1): 27–32 (1997).
53. J.P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen and B. Lauwers, "Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining", *Ann. CIRP*, 44 (1) :169–172 (1995).
54. J.D. Ayers and K. Moore, "Formation of metal carbide powder by spark machining of reactive metals", *Metal. Trans.*, A 15A: 1117–1127 (1984).
55. C.L. Lin, J.L. Lin and T.C. Ko, "Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 19 (4): 271–277 (2002).
56. J.L. Lin, K.S. Wang, B.H. Yan and Y.S. Tarng, "Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics", *J. Mater. Process. Technol.*, 102: 48–55 (2000).
57. Y.F. Tzeng and F.C. Chen, "A simple approach for robust design of high-speed electrical discharge machining technology", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43 (3): 217–227 (2003).
58. C. Cogun, "A technique and its applications for evaluation of material removal contributions of pulses in electrical discharge machining", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 30 (1): 19–31 (1990).
59. Y.S. Wong, L.C. Lim and L.C. Lee, "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", *J. Mater. Process. Technol.*, 48: 299–305 (1995).
60. Elmas, Ç., "Yapay Sinir Ağları", *Seçkin Yayınları*, Ankara, 21-187 (2003).
61. Harvey, L. R., "Neural Network Principles", *Prentice Hall*, New Jersey , 1-130 (1994).
62. Balcı, M.T., "Yapay sinir ağlarının modellenmesi ve uygulama alanları", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-60 (1995).
63. Kosko, B., "Neural networks and fuzzy systems", *Prentice Hall*, New Jersey, 1-90 (1992).
64. Fausett, L., "Fundamentals of Neural Networks", *Prentice Hall*, New Jersey, 1-210 (1994).
65. Sözen A, Arcaklıoğlu E., "Prospects for future projections of the basic energy sources in Turkey", *Energy Sources*, 2 (2): 183-201 (2007).

EKLER

Çizelge 1.1. İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

Deney Operasyon No	Malzeme Çifti		İşleme parametreleri											Elektrot Takımı		İş Parçası		Diğer Sonuçlar		
			Değişenler					Sabitler												
	Elektrot Malzemesi	İş Parçası Malzemesi	Boşalım Akımı [I _b , A]	Vurum Süresi [t _b , µs]	Deney Tekrar Sayısı	İşleme Derinliği [mm]	Ortalama İşleme Süresi [t _{işleme} , dak.]	Polarite [+/-]	Gerilim [V, L/H]	Dielektrik Uygulama Şekli	Püskürtme Basıncı [P, bar]	Deşarj (Vurum) Aralığı [µs]	Elektrot Geri Hareket Süresi [s]	Elektrot Takımı Çalışma Süresi [µs]	Bekleme Süresi [t _{be} , µs]	Elektrot Aşınma Miktarı [g]	Elektrot Aşınma Hızı [EAH, mm ³ /dak]	İş Parçası Aşınma Miktarı [g]	İş parçası İşleme Hızı [IIH, mm ³ /dak]	Bağıl Aşınma [BA, %]
01.1.6.50	ECu-Elektrolitik Bakır	Al427915 alüminyum / bakır MMK malzeme (Ø15 mmx10mm)	6	50	2	7	17,64	[Elektrot (+) / İş parçası (-)]	80	Püskürtme	0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,042	2,743E-01	1,192	2,371E+01	1,157E-02
02.1.6.100				100			34,73									0,022	7,299E-02	1,188	1,200E+01	6,081E-03
03.1.6.200				200			103,78									0,054	5,995E-02	1,158	3,915E+00	1,531E-02
04.1.9.50			9	50	2	7	10,23				0,06					6,758E-01	1,223	4,195E+01	1,611E-02	
05.1.9.100				100			11,92				0,022					2,127E-01	1,232	3,627E+01	5,864E-03	
06.1.9.200				200			41,31				0,06					1,674E-01	1,20	1,019E+01	1,642E-02	
07.1.12,5.50			12.5	50	2	7	7,40				0,079					1,230E+00	1,21	5,737E+01	2,144E-02	
08.1.12,5.100				100			7,39				0,041					6,392E-01	1,237	5,873E+01	1,088E-02	
09.1.12,5.200				200			22,37				0,062					3,193E-01	1,186	1,860E+01	1,717E-02	
10.2.6.50	ECu-Elektrolitik Bakır	AE109 Al-MMK malzeme (15x15 mmx10 mm)	6	50	2	7	20,13	[Elektrot (+) / İş parçası (-)]	80	Püskürtme	0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,029	1,660E-01	1,105	2,021E+01	8,213E-03
11.2.6.100				100			18,01									0,002	1,280E-02	1,242	2,539E+01	5,039E-04
12.2.6.200				200			18,45									0,006	3,747E-02	1,157	2,309E+01	1,623E-03
13.2.9.50			9	50	2	7	15,25				0,083					6,271E-01	1,126	2,719E+01	2,307E-02	
14.2.9.100				100			7,33				0,009					1,415E-01	1,163	5,842E+01	2,422E-03	
15.2.9.200				200			8,16				0,001					1,412E-02	1,167	5,266E+01	2,682E-04	
16.2.12,5.50			12.5	50	2	7	5,12				0,043					9,677E-01	1,154	8,299E+01	1,166E-02	
17.2.12,5.100				100			10,26				0,076					8,535E-01	1,159	6,817E+01	1,252E-02	
18.2.12,5.200				200			7,55				0,001					1,526E-02	1,166	5,686E+01	2,684E-04	

Ek -1 İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

Çizelge 1.1. (Devam) İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

Deneç Operasyon No	Malzeme Çifti		İşleme parametreleri												Elektrot Takımı		İş Parçası		Diğere Sonuçlar						
			Değişenler					Sabitler																	
	Elektrot Malzemesi	İş Parçası Malzemesi	Boşalım Akımı [I _b , A]	Vurum Süresi [t _b , µs]	Deneç Tekrar Sayısı	İşleme Derinliği [mm]	Ortalama İşleme Süresi [t _{işleme} , dak.]	Polarite [+/-]	Gerilim [V, L/H]	Dielektrik Uygulama Şekli	Püskürtme Basıncı [P, bar]	Deşarj (Vurum) Aralığı [µs]	Elektrot Geri Hareket Süresi [s]	Elektrot Takımı Çalışma Süresi [µs]	Bekleme Süresi [t _{bk} , µs]	Elektrot Aşınma Miktarı [g]	Elektrot Aşınma Hızı [EAH, mm ³ /dak]	İş Parçası Aşınma Miktarı [g]	İş parçası İşleme Hızı [İİH, mm ³ /dak]	Bağıl Aşınma [BA, %]					
19.3.6.50	ECu-Elektrolitik Bakır	Al-MMK (AlMg1SiO6-TiH ₂ 0.8) (20x20x5 mm)	6	50	2	7	9,30	[Elektrot (+) / İş parçası (-)]	80	Püskürtme	0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,014	1,735E-01	0,619	2,498E+01	6,942E-03					
20.3.6.100				100			10,46									0,007	7,711E-02	0,645	2,315E+01	3,331E-03					
21.3.6.200				200			19,28									0,004	2,390E-02	0,645	1,256E+01	1,904E-03					
22.3.9.50			9	50	2	7	5,19			0,5	Sabit					0,2	Sabit	1,6	0,021	4,662E-01	0,658	4,759E+01	9,796E-03		
23.3.9.100				100			5,13												0,008	1,797E-01	0,678	4,961E+01	3,622E-03		
24.3.9.200				200			13,16												0,004	3,502E-02	0,65	1,854E+01	1,889E-03		
25.3.12,5.50			12.5	50	2	7	3,29			0,5	Sabit					0,2	Sabit	1,6	0,03	1,051E+00	0,636	7,256E+01	1,448E-02		
26.3.12,5.100				100			3,33												0,013	4,498E-01	0,657	7,406E+01	6,074E-03		
27.3.12,5.200				200			11,27												0,006	6,134E-02	0,686	2,285E+01	2,685E-03		
28.4.6.50	ECu-Elektrolitik Bakır	Ticari Alüminyum (ETİAL 20) (Ø15 mmx10 mm)	6	50	2	7	13,03	[Elektrot (+) / İş parçası (-)]	80	Püskürtme	0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,027	2,388E-01	1,128	3,206E+01	7,446E-03					
29.4.6.100				100			12,38									0,012	1,117E-01	1,144	3,422E+01	3,263E-03					
30.4.6.200				200			20,20									0,008	4,563E-02	1,114	2,043E+01	2,234E-03					
31.4.9.50			9	50			2			7	6,52					0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,038	6,715E-01	1,15	6,533E+01	1,028E-02
32.4.9.100				100							5,53										0,013	2,709E-01	1,165	7,803E+01	3,471E-03
33.4.9.200				200							7,35										0,007	1,097E-01	1,179	5,941E+01	1,847E-03
34.4.12,5.50			12.5	50			2			7	4,34					0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	1,049	1,301E+00	1,159	9,891E+01	1,315E-02
35.4.12,5.100				100							3,36										0,017	5,830E-01	1,198	1,321E+02	4,415E-03
36.4.12,5.200				200							4,36										0,007	1,850E-01	1,193	1,013E+02	1,825E-03

Ek -1(Devam) İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

Çizelge 1.1. (Devam) İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

Deney Operasyon No	Malzeme Çifti		İşleme parametreleri											Elektrot Takımı		İş Parçası		Diğer Sonuçlar		
			Değişkenler					Sabitler												
	Elektrot Malzemesi	İş Parçası Malzemesi	Boşalım Akımı [I _b , A]	Vurum Süresi [t _b , µs]	Deney Tekrar Sayısı	İşleme Derinliği [mm]	Ortalama İşleme Süresi [t _{işleme} , dak.]	Polarite [+/-]	Gerilim [V, L/H]	Dielektrik Uygulama Şekli	Püskürtme Basıncı [P, bar]	Deşarj (Vurum) Aralığı [µs]	Elektrot Geri Hareket Süresi [s]	Elektrot Takımı Çalışma Süresi [µs]	Bekleme Süresi [t _{be} , µs]	Elektrot Aşınma Miktarı [g]	Elektrot Aşınma Hızı [EAH, mm ³ /dak]	İş Parçası Aşınma Miktarı [g]	İş parçası İşleme Hızı [IH, mm ³ /dak]	Bağıl Aşınma [BA, %]
37.5.6.50	ECu-Elektrolitik Bakır	Çelik (1.2210 115CrV3) (Ø15 mmx10 mm)	6	50	2	7	117,54	[Elektrot (+) / İş parçası (-)]	80	Püskürtme	0,5	Sabit	0,2	Sabit	1,6	0,608	5,960E-01	2,705	2,906E+00	2,051E-01
38.5.6.100				100			144,20									0,218	1,742E-01	3,108	2,722E+00	6,400E-02
39.5.6.200				200			120,00									0,135	1,296E-01	3,224	3,393E+00	3,821E-02
40.5.9.50			9	50			35,17									0,749	2,454E+00	2,616	9,393E+00	2,612E-01
41.5.9.100				100			36,58									0,438	1,380E+00	2,646	9,134E+00	1,510E-01
42.5.9.200				200			52,51									0,301	6,605E-01	3,037	7,304E+00	9,043E-02
43.5.12,5.50			12.5	50			16,32									0,855	6,036E+00	2,527	1,955E+01	3,087E-01
44.5.12,5.100				100			16,49									0,51	3,564E+00	2,914	2,232E+01	1,597E-01
45.5.12,5.200				200			26,22									0,259	1,138E+00	3,148	1,516E+01	7,507E-02

Ek -1(Devam) İşleme Değişkenlerine Ait Detaylar

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı ve Adı : Oğuz Poyrazoğlu
 Uyruğu : T. C.
 Doğum Tarihi ve Yeri : 20.08.1960 Osmaniye, Merkez (*Bahçe Köyü*)
 Medeni Hali : Evli, İki Çocuklu
 Cep Tel : (0505) 377 78 35 – (0532) 687 85 11
 e-Posta : opoyrazoglu@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Eğitimi	1993
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Bölümü	1982
Lise	Kayseri Teknik Lisesi/Makine	1978

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-.....	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2006–2007	MTEM Projesi	Ulusal Bölgelerarası İrtibat Uzmanı
2004-2006	MTEM Projesi	İstanbul Bölge Koordinatörü
1999-2000	Gazi Üniversitesi	BELTEK Proje Koordinatörü
1998-2004	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
1997-2000	Gazi Üniversitesi	Fakülte Sekreter V.
1987-1998	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
1985-1987	İskitler EML	Teknik Öğretmen, Müdür Yardımcısı
1982-1985	Gebze EML	Teknik Öğretmen, Bölüm Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

A- Tezler

1. POYRAZOĞLU, O., “Elektriksel Aşındırma ile İşleme Yönteminde (Elektro Erozyon (EDM) Kullanılan İşlem Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, Ocak 1993

B- Ulusal ve Uluslararası Konferans, Sempozyum ve Kongre Bildirileri, İnceleme ve Araştırma Yazıları

1. Güllü, A., Poyrazoğlu, O., GÜLDAŞ, A., ŞENTÜRK, A., “Tel Elektroerozyon ile İşleme Tekniği”, **Endüstriyel Teknoloji Dergisi**, Cilt II, Sayı:1, Sayfa: 20-25, Ocak 1996, Ankara
2. Poyrazoğlu, O., Nalbant, M., “Elektroerozyon ile İşlemede İşlem Parametrelerinin Performansa Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, 7. **Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı**, Sayfa: 515-525 1996, ODTÜ, Ankara
3. Poyrazoğlu, O., Gülesin, M. Ve Kayır, Y., "Uzman Sistem Tekniklerine Dayalı Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Tespiti" **GÜTEF Matik'97 Makine Tasarım Teorisi ve Modern İmalat Yöntemleri Konferansı**, 15-16 Eylül 1997, Ankara.
4. Güllü, A., Poyrazoğlu, O., "İmalatta Süper Bitirme İşlemi ve Taşlama ile Karşılaştırılması", **Teknoloji Dergisi**, Yıl : 3, Sayı 1, Mart 2000.
5. Çoğun, C. ve Poyrazoğlu, O., “ The Variation of Machining Performance with Machining Parameters in EDM “, **2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds**, June 21-23 2001, Kuşadası, Türkiye.

C- Projeler

1. Altındal, Ş., Çolakoğlu, K., Güner, M. E., Özer, M., Poyrazoğlu, O. ve Özdemir, A., "Yarıiletken Kristaller için Isı Kontrollü Orkidasyon Fırınının Yapımı" FEF.05/95-3 kodlu, **Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi**, 01.01.1995/31.10.1997, Ankara.