



**B₄C TAKVİYELİ Al₂O₃ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN VAKUMLU
İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ELEKTRO EROZYON
İŞLEME YÖNTEMİ İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL
ARAŞTIRILMASI**

Omid FARİD AHMADİNİA

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Omid FARİD AHMADINIA tarafından hazırlanan "B4C TAKVİYELİ Al2014 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN VAKUMLU İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Can ÇOGUN

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Hakan GÜRÜN

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 03/07/2019

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

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Omid FARİD AHMADİNİA

02/08/2019

B₄C TAKVİYELİ Al₂O₃ MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN VAKUMLU İNFİLTRASYON
YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ İLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Omid FARİD AHMADİNİA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Metal matrisli kompozitler (MMK), metal alaşımlara kıyasla yüksek elastisite modülüne, yüksek mukavemete, yüksek tokluğa, düşük yoğunluğa ve yüksek aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Bu çalışmada Al₂O₃ matrisli ve B₄C takviyeli kompozit malzemeler %0, %5 ve %10 takviye-hacim oranlarında vakumlu infiltrasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde optimum üretim parametreleri kullanılmıştır. Üretilen işparçaları geleneksel EEİ ve toz katkılı elektro erozyonla işleme (TK/EEİ) yöntemi kullanılarak işlenmiş ve sonuçlar EEİ yöntemi ile işlenmiş işparçalarının sonuçları ile kıyaslanmıştır. İşlemelerde kullanılan akım ve işparçası malzemesinin takviye-hacim oranının işparçası işleme hızı (İİH) ve elektrot aşınma hızı (EAH) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun yanı sıra taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak işleme sonrası meydana gelen yüzey değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, işleme performansını etkileyen parametrelerin önem sırasını belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. TK/EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilirliğin daha kararlı hale geldiği, daha yüksek işleme hızı ve daha düşük elektrot aşınması elde edildiği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Metal matrisli kompozit, toz katkılı EEİ, vakumlu infiltrasyon, takım aşınma hızı, malzeme kaldırma hızı, B₄C/2014Al
Sayfa Adedi : 118
Danışman : Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PRODUCTION OF B₄C REINFORCED
Al₂₀₁₄ MATRIX COMPOSITES WITH VACUUM INFILTRATION METHOD AND
MACHINABILITY OF COMPOSITES BY USING ELECTRO DISCHARGE
MACHINING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Omid FARID AHMADINIA

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
July 2019

ABSTRACT

Metal matrix composites (MMK) are materials that have high elastic modulus, high strength, high toughness, low density and high wear resistance compared to metal alloys. In this study, Al₂₀₁₄ matrix and B₄C reinforced composite materials were produced by vacuum infiltration method at 0%, 5% and 10% reinforcement ratios. Optimum production parameters were used in the production of composite materials. The produced workpieces were machined with normal EDM and Powder Mixed Electro Discharge Machining (PM/EDM) and the results were compared with the workpieces that machined with EDM method. The effect of the processing parameters such as current and reinforcement ratio on Material Removal Rate (MRR) and Tool Wear Rate (TWR) were investigated. Furthermore, surface electron microscopy (SEM) were used to investigate surface changes after machining. Moreover, variance analysis was performed to determine the parameters effecting the machining performance. By using PM/EDM method, more stable machinability, higher machining speed and lower electrode wear has been obtained.

Science Code : 91417
Key Words : Metal Matrix Composite, Powder Mixed EDM, Vacuum Infiltration, Tool Wear Rate, Material Removal Rate, B₄C/2014Al
Page Number : 118
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları süresince beni yönlendiren, değerli görüş ve tavsiyelerini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince deneylerin yapılmasına yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Hakan GÜRÜN'e, deney parçaların üretiminde büyük yardımı dokunan Sayın Prof. Dr. Recep ÇALIN'a ve Duran KAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak ve en önemlisi, her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme ve Sayın Gözde ATAĞUL'a teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretilmesinde Kullanılan Sıvı ve Katı Faz İşlemler.....	5
2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilmesi	8
2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Geleneksel İmalat Yöntemleri ile İşlenmesi	13
2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Alışılmamış İmal Usulleri ile İşlenmesi	15
2.5. Metal Matrisli Kompozitlerin EEİ yöntemi ile İşlenmesi.....	19
2.6. Alaşımların ve Metal Matrisli Kompozitlerin TK/EEİ yöntemi ile işlenmesi	25
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	33
3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	35
3.2. İnfiltrasyon Yöntemi	37
3.2.1. Basıncılı infiltrasyon	37
3.2.2. Basıncısız infiltrasyon	38
3.2.3. Vakumlu infiltrasyon	39

	Sayfa
3.3. İnfiltrasyonu Etkileyen Parametreler	39
3.3.1. Takviye-hacim oranı (T-H %).....	39
3.3.2. Takviye tane boyutu.....	41
3.3.3. İnfiltrasyon basıncı.....	41
3.3.4. İnfiltrasyon sıcaklığı	41
3.3.5. Islatma	41
3.3.6. İnfiltrasyon süresi.....	43
4. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ) TEKNOLOJİSİ	45
4.1. Elektro Erozyonun Tanımı	46
4.2. EEİ Yönteminin Sınıflandırılması.....	48
4.2.1. Kuru ve yarı kuru EEİ.....	48
4.2.2. Mikro EEİ	50
4.2.3. Tel EEİ	50
4.3. EEİ Yöntemini Etkileyen Parametreler	51
4.3.1. Elektriksel işleme parametreleri.....	52
4.3.2. Kutuplama (polarite)	53
4.3.3. Takım malzemesi	54
4.3.4. İşparçası malzemesi	55
4.3.5. Dielektrik sıvı.....	56
4.4. EEİ Yönteminde Performans Kriterleri	57
4.5. Toz Karışımli Elektro Erozyonla İşleme (TK/EEİ) Yönteminin Esasları	58
5. KULLANILAN MALZEME VE ÜRETİM METODU.....	63
5.1. Kullanılan Malzeme	63
5.1.1. Bor karbür (B ₄ C).....	63

	Sayfa
5.1.2. Al2014 alaşıımı	64
5.2. Üretim Metodu	65
5.2.1. Birinci deneme	65
5.2.2. İkinci deneme	66
5.2.3. Deneylerin yapılması	69
5.3. Mikroyapı Görüntüleri	70
5.4. Aşınma Deneyi.....	72
6. KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENMESİ	75
6.1. EEİ Tezgahı.....	75
6.2. Elektrot.....	76
6.3. İşparçası.....	76
6.4. Dielektrik Sıvı	77
6.5. İşleme Parametreleri.....	77
6.6. Deneyler Sırasında Yapılan Ölçümler	79
6.6.1. İşleme süresi.....	79
6.6.2. İİH değerinin hesaplanması.....	79
6.6.3. EAH değerinin hesaplanması.....	79
7. DENEY SONUÇLARI	81
7.1. Aşınma Testi Sonuçları	81
7.2. İşlem Parametrelerin İşparçası İşleme Hızı (İİH) Üzerindeki Etkisi	82
7.3. İşlem Parametrelerin Elektrot Aşınma Hızı (EAH) Üzerindeki Etkisi	85
7.4. İşlenmiş Yüzey Görüntüleri	88
7.5. ANOVA Analizi.....	90
7.5.1. İşparçası işleme hızı (İİH).....	90

	Sayfa
7.5.2. Elektrot aşınma hızı (EAH).....	94
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
8.1. Sonuçlar.....	97
8.2. Öneriler	99
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	113
EK-1. Aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayısı diyagramları	114
EK-2. Kullanılan işleme parametreleri ve elde edilen sonuçlar	117
ÖZGEÇMİŞ	118

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Alışılmamış malzeme kaldırma yöntemlerin sınıflandırılması.....	45
Çizelge 4.2. Geleneksel EEİ ve Mikro EEİ arasındaki farklar	50
Çizelge 4.3. Farklı malzemelere göre kutuplama dağılımı	54
Çizelge 4.4. Takım elektrot özellikleri	55
Çizelge 5.1. B ₄ C malzemesinin kimyasal bileşeni.....	64
Çizelge 5.2. B ₄ C malzemesinin teknik özellikleri	64
Çizelge 5.3. Al ₂ O ₃ alaşımının kimyasal bileşenleri	65
Çizelge 5.4. Al ₂ O ₃ alaşımının teknik özellikleri	65
Çizelge 5.5. Farklı takviye-hacim oranları için gereken matris ve takviye ağırlıkları ...	67
Çizelge 5.6. Aşınma testinde kullanılan parametreler	73
Çizelge 6.1. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	78
Çizelge 6.2. Deney tasarımı	78
Çizelge 7.1. İİH varyans analiz sonuçları	91
Çizelge 7.2. İİH denklemi için elde edilen katsayılar	92
Çizelge 7.3. Yapılan doğrulama deney sonucu İİH'ında meydana gelen sapma.....	92
Çizelge 7.4. EAH varyans analiz sonuçları	94
Çizelge 7.5. EAH denklemi için elde edilen katsayılar	95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal matrisli kompozitlerin geleneksel yöntemler ile işlenmesi	14
Şekil 2.2. Malzeme kaldırma sırasında Al_2O_3 kesici takımında meydana gelen aşınma	14
Şekil 2.3. Lazer ile işleme sırasında meydana gelen yüzey özellikleri.....	17
Şekil 2.4. Lazer ile işleme sonucu elde edilen yüzeyin kesitsel mikro yapısı	18
Şekil 2.5. Yeniden oluşmuş katmanın kesitsel görüntüsü	21
Şekil 2.6. Geliştirilen yüksek hassasiyetli mikro EEİ sistemi	23
Şekil 2.7. Tel EEİ sırasında farklı işleme parametrelerin (a) İİH (b) Ra üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 2.8. Geleneksel EEİ ve TK/EEİ yöntemiyle elde edilen mikro yarıkların mikroyapı görüntüsü.....	26
Şekil 2.9. Grafit tozunun (a) Boşalım boşluğu, (b) İİH, (c) EAH, (d) Ra üzerindeki etkisi, (e) dalma ve (f) frezeleme yüzey görüntüsü	28
Şekil 2.10. Farklı toz katkıları kullanılarak elde edilen mikroyapı (a) Grafit tozu, (b) Bakır tozu.....	29
Şekil 2.11. EEİ ve TK/EEİ sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	30
Şekil 2.12. Farklı işleme parameteler uygulanarak TK/EEİ sonucu meydana gelen yeniden katılmış katman.	30
Şekil 2.13. Kullanılan takımın şematik gösterimi	31
Şekil 3.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit grupları, Parçacık takviyeli kompozitler.....	31
Şekil 3.2. Kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin Al ve çelik alaşımları ile kıyaslanması	34
Şekil 3.3. Basıncılı infiltrasyon yöntemi	38
Şekil 3.4. Basıncsız infiltrasyon yöntemi	38
Şekil 3.5. Vakumlu infiltrasyon yöntemi	39
Şekil 4.6. Takviye parçacıkların cam kap içerisine yerleştirildikten sonra kapsadığı hacim	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. Bir sıvı damlasının katı yüzey ile temas sonucu meydana gelen temas açısı ve yüzey enerjileri	42
Şekil 3.8. Sıvı damlasının şekli ve temas açısı	43
Şekil 4.1. EEİ yönteminin şematik gösterimi	46
Şekil 4.2. EEİ yönteminin malzeme kaldırma mekanizmasının şematik gösterimi	47
Şekil 4.3. EEİ yönteminin işleme tipleri	48
Şekil 4.4. Kuru EEİ yöntemi	49
Şekil 4.5. Yarı kuru EEİ yöntemi	49
Şekil 4.6. Tel EEİ yönteminin şematik gösterimi	51
Şekil 4.7. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	52
Şekil 4.8. Farklı elektrot kutuplamaları (a) Pozitif kutuplama (b) Negatif kutuplama...	54
Şekil 4.9. Farklı malzemelerin Elektriksel İletkenlik değerleri	55
Şekil 4.10. Dielektrik sıvısı uygulama yöntemleri	57
Şekil 4.11. TK/EEİ yönteminin şematik gösterimi	59
Şekil 4.12. Parçacıkların davranış şekilleri	59
Şekil 4.13. TK/EEİ çalışma mekanizması	60
Şekil 4.14. Tek bir boşalım sonucu elde edilen boşalım aralığı (a) saf dielektrik, (b) toz ilaveli dielektrik.....	60
Şekil 4.15. Malzeme uzaklaştırma mekanizması (a) saf dielektrik (b) toz ilaveli dielektrik.....	61
Şekil 5.1. Vakumlu infiltrasyon deney düzeneği	69
Şekil 7.1. Farklı takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerde aşınma testi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları	81
Şekil 7.2. Farklı takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerden aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayıları	82
Şekil 7.3. %0 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması	83

Şekil	Sayfa
Şekil 7.4. %5 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması	84
Şekil 7.5. %10 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması	84
Şekil 7.6. Tüm deneylerin klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması	85
Şekil 7.7. %0 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması	86
Şekil 7.8. %5 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması	87
Şekil 7.9. %10 B ₄ C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması	87
Şekil 7.10. Tüm deneylerin klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 7.11. İİH'ın normal dağılım eğrisi.....	91
Şekil 7.12. İşleme parametrelerin İİH üzerindeki etkisi	93
Şekil 7.13. İşleme parametrelerin İİH üzerindeki etkileri.....	93
Şekil 7.14. EAH 'ın normal dağılım eğrisi	94
Şekil 7.15. İşleme parametrelerin EAH üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 7.16. İşleme parametrelerin EAH üzerindeki etkisi.....	96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. İlk denemede başarısız şekilde üretilen Al ₅ Si ₄ /B ₄ C kompozitleri.....	66
Resim 5.2. Al ₅ Si ₄ /B ₄ C kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlenmesi sırasında ark oluşumu.....	66
Resim 5.3. Argon gaz korumalı fırın	67
Resim 5.4. İnfiltrasyon işleminin yapılması için hazırlanmış cam tüpler.....	68
Resim 5.5. Deneylerin üretilmesinde kullanılan ergitme ocağı ve sıcaklık kontrol ünitesi.....	69
Resim 5.6. Farklı takviye-hacim oranlarından elde edilen mikroyapı görüntüleri.....	71
Resim 6.1. Deneylerin işlenmesinde kullanılan EEİ tezgahı	75
Resim 6.2. Elektrot malzemesi	76
Resim 6.3. İşparçası malzemesi	76
Resim 6.4. TK/EEİ yöntemi için kullanılan karıştırma mekanizması	77
Resim 7.1. %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerden işleme sonucu alınan SEM görüntüleri	89
Resim 7.2. Vakumlu infiltrasyon yöntemi sonucunda meydana gelen ıslatma	89
Resim 7.3. %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitin TK/EEİ sırasında meydana gelen seramik parçacık topaklanması	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C_p (g/L)	Toz konsantrasyonu
F (mm/dak)	Tel ilerleme hızı
f_p	Vurum frekansı
i_e (A)	Boşalım akımı
P_e (W)	Boşalım gücü
R_a (μm)	Yüzey pürüzlülük oranı
T_{au}	Görev döngüsü
t_d (μs)	Gecikme süresi
t_e (μs)	Boşalım süresi
t_i (μs)	Vurum süresi
t_o (μs)	Bekleme süresi
t_p (μs)	Vurum çevrim süresi
u_e (V)	Boşalım gerilimi
u_i (V)	Açık devre gerilimi
V_f	Fiber hacmi
V_m	Matris hacmi
W_e	Vurum enerjisi
W_f	Fiber ağırlığı
W_m	Matris ağırlığı
W_k	Kompozitin ağırlığı
γ_{LV}	Sıvı/buhar arayüzey enerjisi
γ_{SL}	Katı/sıvı arayüzey enerjisi
γ_{SV}	Sıvı/buhar arayüzey enerjisi
θ	Temas açısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ASJİ	Aşındırıcı su jeti ile işleme
BA	Bağıl aşınma
CMK	Cam matrisli kompozit
EAH	Elektrot aşınma hızı
EDS	Energy Dispersive Spectrometer (Enerji dağınımlı görüngen ölçer)
EEİ	Elektro erozyon ile işleme
EKEİ	Elektro kimyasal erozyon ile işleme
EKİ	Elektro kimyasal işleme
İİH	İşparçası işleme hızı
İMK	İntermetalik matrisli kompozit
KBN	Kübik bor nitrür
KBN K	Kaplamalı kübik bor nitrür
K-K	Karbon-karbon kompozitler
MA	Mekanik alaşımlama
MMK	Metal matrisli kompozit
PMK	Polimer matrisli kompozit
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SK	Sementit karbür
SMK	Seramik matrisli kompozit
T-H	Takviye hacim oranı
TM	Toz metalurjisi

1. GİRİŞ

Son yıllarda Metal Matrisli Kompozitler (MMK) yüksek özgül mukavemet ve yüksek aşınma direnci gibi önemli malzeme özellikleri nedeniyle, özellikle havacılık ve otomotiv sanayisinde büyük bir ilgi görmektedir. Bu malzemeler uçak ve otomobillerin tükettiği yakıt miktarını azaltmakta, taşıyabilecekleri yük kapasitesini artırarak verimliliğin artmasında önemli bir rol oynamaktadırlar [1].

MMK üretiminde bir çok malzeme, matris ve takviye elemanı olarak kullanılabilmektedir. Bunların arasında Alüminyum, Magnezyum ve Bakır matris olarak en sık kullanılan metal malzemeler olmakla birlikte SiC, B₄C ve MgO en fazla tercih edilen takviye elemanlarıdır. Alüminyum gibi hafif, sünek ve yüksek korozyon direncine sahip matris malzemeler, takviye elemanları sayesinde, matris malzemesine kıyasla daha yüksek aşınma direncine, mukavemete ve ısıl kararlılığa sahip olabilmektedirler [2].

MMK malzemeler birçok farklı yöntem kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntemler sıvı hal, katı hal ve in-situ işlemleri olarak dört farklı grupta sınıflandırılmıştır. Katı hal işlemlerine toz metalurjisi, sıvı hal işlemlerine ise infiltrasyon, döküm ve karıştırmalı döküm yöntemi örnek olarak gösterilebilmektedir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçanın ikincil işlemlere ihtiyaç duyması ve bu nedenle pahalı olması, bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Döküm yönteminde toz parçacıkların topaklanması, çökmesi ve gözeneklerin oluşması, karıştırmalı döküm yönteminde ise takviye-hacim oranlarında sınırlamaların olması (en fazla %30) sıvı hal işlemlerinin başlıca sorunlarıdır [2]. Diğer taraftan infiltrasyon yöntemi, katı hal işlemlerine kıyasla daha ekonomik olması, %50 'ye varan takviye-hacim oranlarını başarılı bir şekilde üretebilmesi ve yüksek maliyetli altyapılara ihtiyaç duymaması gibi avantajlar nedeniyle özellikle alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde büyük ilgi görmektedir [3-5].

İnfiltrasyon yöntemi; vakumlu, basınçlı ve basınçsız olarak üç farklı şekilde uygulanabilmektedir. Vakumlu infiltrasyon yöntemi diğer sıvı hal yöntemlerine kıyasla daha basit ve ekonomik bir yöntemdir. Uygulanan negatif basınç nedeniyle ıslatmanın daha iyi gerçekleşmesinden ötürü, yüksek yoğunluktaki gözeneksiz kompozitlerin üretiminde tercih edilebilmektedir [2]. Ancak infiltrasyon işleminin normal atmosferde gerçekleşmesi,

matris ve takviye arayüzeyinde oksit tabakasının oluşmasına yol açabilmektedir. Bu olay, takviye elemanların sıvı matris tarafından yeterli derecede ıslatılamamalarına sebep olduğu bilinmektedir.

Günümüzde kompozit malzemelerinin geleneksel yöntemler ile işlenmesi zorluk taşımaktadır. Seramik takviyeli kompozit malzemelerde, takım aşınması nedeniyle meydana gelen yüksek işleme maliyeti ve işleme sırasında oluşabilecek tehlikeler, bu malzemelerin geleneksel yöntemler ile işlenmesinde bilinen sorunların başında gelmektedir. Buna ek olarak günümüz endüstrisinde daha karmaşık şekillere, mikro işlemlerde sıkı toleranslara ve iyi yüzey kalitesine ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Geleneksel işleme yöntemleri istenilen bu özellikleri sağlamada yeterli olamamasından dolayı, farklı malzeme kaldırma mekanizması kullanılan alışılmamış imalat yöntemleri geliştirilmiştir.

Alışılmamış imalat yöntemleri kullanılarak, sert parçacıklı kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında rastlanılan zorluklar aşılabilmekte ve daha iyi işparçası işleme hızları (İİH) elde edilebilmektedir. Aşınırıcı Su Jeti ile İşleme, Lazer Işını ile İşleme, Elektro Kimyasal İşleme ve Elektro Erozyon ile işleme (EEİ) alışılmamış imalat yöntemlerine örnek olarak gösterilebilmektedir. EEİ yöntemi elektrot ve elektrik iletken işparçası arasında mekanik temas olmaksızın gerçekleşen bir alışılmamış imalat yöntemidir. Bu yöntemde kutuplar arasında uygulanan gerilim farkı elektrik boşalımlarının oluşmasına yol açar. Bu boşalımlar işleme sırasında işparçası yüzeyine çarparak malzeme ergimesi ve buharlaşmasına sebep olur. Buharlaştıran ve/veya eriyen malzeme, işparçası yüzeyinden ayrılarak katılaşır ve işleme aralığından dielektrik sıvısı yardımıyla uzaklaştırılır. Bu döngü her bir boşalım için tekrarlanarak malzeme kaldırma işlemi gerçekleştirilir.

EEİ yöntemi kullanılarak yeterli elektriksel iletkenliğe sahip kompozitler başarılı bir şekilde işlenebilmektedir. Ancak B_4C , SiC ve Al_2O_3 gibi yüksek elektriksel dirence sahip seramik malzemeler takviye elemanı olarak kullanıldığında, kompozit malzemenin iletkenlik değerlerinin düşük olması nedeniyle EEİ sırasında başarılı işleme yapılamamaktadır. Bu malzemelerin işlenmesi sırasında kararsız işleme, düşük İİH ve yüksek takım aşınması gibi belirli sorunlar oluşabilmektedir. Söz konusu problemleri ortadan kaldırmak için dielektrik sıvısına belirli ölçüde elektrik iletken toz ilavesi birçok çalışmada denenmiştir. Toz Karışıklı Elektro Erozyon ile İşleme (TK/EEİ) sırasında uygulanan gerilim sonucu elektrik iletken tozlar elektrotlar arasında köprü oluşturarak dielektrik sıvının yalıtıcılık direncini düşürürler. Bunun neticesinde geleneksel EEİ

yöntemine kıyasla boşalımalar daha kolay oluşur. Yapılan araştırmalar bu yöntemin yüksek elektrik direncine sahip malzemelerin işleminde pozitif etki yarattığını ortaya koymuştur.

Tezin Amacı

Alüminyum matrisli ve B₄C takviyeli kompozit malzemeler, özellikle hafiflik ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerin aynı anda istenildiği uygulamalarda sıkça kullanılan malzemelerdendir. Bu kompozitlerin üretiminde vakumlu infiltrasyon gibi üretim maliyeti düşük yöntemlerin kullanılması önemli avantajların elde edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada Al₂O₃ ve B₄C toz parçacıkları, %0, %5 ve %10 takviye-hacim oranlarında, vakumlu infiltrasyon yöntemiyle optimum infiltrasyon parameteleri uygulanarak üretilmiştir. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra takviye elemanının matris tarafından ıslatılması ve kompozitin homojen olarak karışması kompozitlerden alınan mikroyapı görüntüleri yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca kompozitler üzerinde pin-on-disk aşınma testi yapılarak takviye-hacim oranı arttıkça ağırlık kaybı ve aşınma katsayısının değişimi araştırılmıştır. Üretilen parçalar üzerinde farklı boşalım akımları uygulanarak EEİ yöntemi ile işlenip, TK/EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilirliğinin kararlı hale getirebilmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen yüzeylerin SEM görüntüleri alınarak, farklı takviye-hacim oranlarında ve uygulanan akımlarda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bunun devamında, deneylerden elde edilen sonuçların analiz edilebilmesi ve işleme performansı üzerinde hangi işleme parametresinin daha etkili olduğunun belirlenmesi için varyans analizi kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretilmesinde Kullanılan Sıvı ve Katı Faz İşlemler

Yapılan literatür araştırmasına göre, toz metalürjisi (TM) yöntemi metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde diğer yöntemlere kıyasla daha yaygın şekilde kullanıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu yöntemde genellikle 10 μm - 100 μm boyutundaki tozların kullanıldığı, toz boyutların küçülmesiyle üretilen parçanın mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür [7]. TM yönteminin pahalı olması, ikincil işlemlere ihtiyaç duyması ve üretilmesi planlanan parça formu ve şeklinin kısıtlı olması, bu yöntemin başlıca dezavantajlarıdır.

Behera vd., (2018) TM yöntemi ile farklı takviye-hacim oranlarında Al matrisli, Ni ve silisyum karbür (SiC) takviyeli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yapılan bu çalışmada, kompozit malzemenin sertlik ve aşınma direnci artan SiC takviye-hacim oranıyla beraber artmıştır. Ayrıca, Ni elemanının kompozite ilavesi korozyon direncinin önemli derecede artmasına neden olmuştur [8]. Bodukuri vd., (2016) TM yöntemiyle Al matrisli SiC ve bor karbür (B_4C) takviyeli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yapılan araştırmalar sonucunda, üretilen kompozitlerdeki sertlik değerinin takviye-hacim oranıyla doğru orantılı olarak artmakta olduğu görülmüştür. Ayrıca kompozitlerde görünür yoğunluk, sıkıştırılmış yoğunluk ve ham yoğunluk gibi parametrelerin arasındaki farklar değişik oranlarda takviye elemanı kullanılarak incelenmiştir [9]. Çelik vd., (2017) yaptıkları çalışmada, Al/ B_4C tozlarını 350 MPa basınçta presleyip 580°C sıcaklıkta 90 dakika boyunca sinterleyerek kompozit malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, B_4C takviye-hacim oranı arttıkça malzeme sertliği ve sürtünme katsayısında da artış meydana geldiği anlaşılmıştır. Ayrıca sinterleme işlemi açık havada yapıldığı nedeniyle kompozitin dış yüzeyinde oksit tabakası görülmüştür [10]. Fathy vd., (2015) TM yöntemiyle Al matrisli % 0, %5, %10 ve %15 Fe takviyeli kompozitler üreterek, Al alaşımına kıyasla daha iyi mekanik özellikler elde etmişlerdir [11].

Günay, M. (2009) yaptığı çalışmada, matris malzemesi olarak Alumix (Al – Si alaşımı) tozu ve takviye elemanı olarak ise SiC toz parçacıkları kullanarak TM yöntemiyle % 5, %10 ve %15 takviye-hacim oranlarına sahip kompozit malzemeler üretmiştir. Üretilen

kompozitlerin mikroyapısını inceleyerek tüm kompozitlerde homojen karışımın meydana geldiğini, ancak çeşitli sebeplerden dolayı gözenekliliğin oluştuğunu tespit etmiştir. Ayrıca bu çalışmada en yüksek sertlik değeri, 15% SiC takviye-hacim oranı kullanılan numunede elde edilmiştir [7].

Davidson (2000) vd., TM yöntemiyle, matris malzemesi olarak 45 µm boyutundaki Al6061 alaşımı, takviye elemanı olarak ise kaplamasız ve bakır kaplamalı 23 µm ve 7 µm boyutlarda SiC parçacıklar kullanarak 10% SiC takviye-hacim oranında kompozit malzemeler üretmişler. Bakır kaplamalı parçacıklar takviye elemanı olarak kullanıldığında, elde edilen kompozit malzemelerin kırılma dayanımı, yük iletimi ve (matris ile takviye elemanı arasındaki) arayüzey bağlarında önemli derecede iyileşme görülmüştür. Ayrıca bu üretim yöntemi kullanılarak daha düşük maliyetteki kompozitlerin üretilebileceğini belirtmişlerdir [12].

Arik vd., (2003) gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiş Al tozlarını matris elemanı olarak kullanarak mekanik alaşımlama (MA) yöntemiyle Al/Al₄C₃ kompozit malzeme üretmişlerdir. Bu işlem 30 saat boyunca argon gaz korumalı ortamda yapılmıştır. MA süresi arttıkça tozların küresel şeklinden pul şekline dönüştükleri görülmüştür. Ayrıca MA işlemi tamamlandıktan sonra Al tozlarında oluşan kalıntı karbon ve oksit tabakaları sinterleme işlemini olumsuz yönde etkileyerek mekanik özelliklerde düşüşe sebep olmuştur [13].

Karabulut vd., (2013) Al/%10 Al₂O₃ kompozitleri farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üreterek, MA süresinin mikroyapı, yoğunluk, gözeneklilik, sertlik ve eğme dayanımlarına olan etkisini araştırmışlardır. İlk 4 saatlik MA süresinin parçacık boyutu üzerinde önemli etkisi olmazken, daha uzun MA sürelerinin parçacık boyutunun düşmesine neden olmuştur. Özellikle 10 saat MA uygulanması, parçacık boyutların 50% 'den fazla düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca, MA süresinin artmasıyla sertlik değerinde ve eğme dayanımında artış gözlemlenmiştir. 8 saate kadar MA uygulanması, eğme dayanımının çok az artmasına, ancak bu sürenin 10 saate çıkartılması eğme dayanımının önemli derecede artmasına sebep olmuştur [14].

Patel vd., (2018) difüzyonla birleştirme yöntemiyle, C/SiC kompozitlerini Ti ara katmanı kullanarak önce 1500°C sıcaklıkta 3 saat bekletip daha sonra 20 MPa basınç altında presleyerek üretmişlerdir. Elde edilen kompozit yeterli derecede difüzyona maruz kaldığı

nedeniyle Ti ara katmanında C ve SiC elemanları görülmüştür [15]. Song vd., (2014) difüzyon birleştirme yöntemi sırasında elektroliz yöntemiyle kaplanmış Ni elemanını ara katman olarak kullanıp ZrC/SiC kompozitleri üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, En uygun ara katman kalınlığının 4 μm olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca geleneksel birleştirme yöntemlerine kıyasla, oda sıcaklığı ve 800 °C sıcaklığında elde edilen kesme mukavemet değerlerinde sırayla 9% ve 67% iyileşme görülmüştür [16].

Sajjadi vd., (2012) yarı katı karıştırma ve karıştırılmalı döküm yöntemlerini kullanarak Al matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozitler üretilip elde edilen sonuçları kıyaslamışlardır. Bu çalışmada, yarı katı karıştırma yöntemiyle üretilen kompozitlerde karıştırılmalı döküm yöntemine kıyasla gözeneklilik oranı ve tane boyutunda daha düşük oranlar ve boyutlar elde edilmiştir. Ayrıca Al_2O_3 takviye-hacim oranı arttıkça akma, kopma ve basınç mukavemetlerinde artış görülmüştür [17]. Bobiç vd., (2014) yarı katı karıştırma yöntemini kullanarak Al356 matrisli SiC ve grafit takviyeli hibrid kompozitler üretmişler. Matris-takviye arayüzey sınırlarında kimyasal reaksiyonun meydana gelmediğini ve kompozit üretiminin başarılı şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir [18].

Sukumaran vd., (2008) sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle Al2124 matrisli SiC takviyeli kompozitler üreterek uygulanan basıncın kompozit kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Buna göre en az gözeneklilik oranı ve yüzey hatası 100 MPa sıkıştırma basıncı uygulandığında elde edilmiştir. Sıkıştırma basıncı 100 MPa geçtiği zaman mekanik özelliklerinde düşüş görülmüştür [19]. Weiping vd., (2014) sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrisli %40 SiC ve %5 Ti takviyeli hibrid kompozitler üretmişler. Üretilen kompozitlerde süneklilik özelliği korunduğu halde mukavemet değerinde önemli derecede artış görülmüştür [20]. Leng vd., (2008) sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle SiC/Gr takviyeli Al matrisli kompozitler üretmişler. Elde edilen sonuçlara göre grafit takviye-hacim oranı arttıkça çekme dayanımında düşüş görülmüştür. Benzer olarak grafit parçacık boyutu arttıkça çekme dayanımında düşüş tespit edilmiştir [21]. Shuangjie vd., (1999) sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle Al matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozitleri değişik soğuma hızlarında üretmişler. Soğuma hızı azaldıkça matris alaşımı ve ötektik silikon tane boyutunda artış, eğilme mukavemeti ve elastik modülünde ise düşüş görülmüştür [22].

Pazhouhanfar vd., (2018) karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al matrisli TiB_2 takviyeli kompozitler üretmişler. Üretilen kompozitlerde, TiB_2 takviye-hacim oranı arttıkça mikro

sertlik, çekme dayanımı ve eğilme mukavemeti oranlarında artış görülmüştür [23]. Ravi vd., (2015) karıştırılmalı döküm yöntemiyle Al6061 matrisli %5 ve %10 B₄C takviye-hacim oranına sahip kompozitler üretmişler. Üretilen kompozitlerde artan takviye-hacim oranı, mikro sertlik ve çekme dayanımının da artmasına sebep olmuştur [24].

2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilmesi

MMK malzemelerin infiltrasyon yöntemiyle üretilmesinde basınçlı, basınçsız ve vakumlu infiltrasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda infiltrasyon sıcaklığı, basınç veya vakum değeri, infiltrasyon süresi, takviye-hacim oranı vb. parametrelerin infiltrasyon özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MMK üretiminde matris malzemesi olarak Al, takviye elemanı olarak ise SiC, MgO ve Al₂O₃ seramik malzemeleri yaygın olarak kullanılmıştır. Vakumlu infiltrasyon yönteminde istenilen özelliklere sahip kompozit malzemeleri elde edebilmek için 700 °C – 850 °C arasındaki sıcaklıklar ve 400 mmHg – 600 mmHg arasındaki vakum değerleri seçilmiştir [25].

Çalın, R. (2006) vakumlu infiltrasyon yöntemi kullanarak Al matrisli MgO takviyeli kompozitleri %10, %20, %30 ve %40 takviye-hacim oranlarında üretmiştir. Bu çalışmada Parçacık tane boyutu, infiltrasyon sıcaklığı ve süresi, takviye-hacim oranı, vakum değeri ve matris ve takviyenin fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi parametrelerin infiltrasyon mesafesi, kompozitin mikroyapısı, kırılma dayanımı ve sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerin yapılmasında 74,105, 149, 210, 297, 420 ve 590 µm takviye tane boyutları, 200, 300, 400, 500, ve 600 mmHg vakum değerleri ve 700 °C ila 850 °C arasındaki sıcaklıklar kullanılmıştır. İnfiltrasyon sıcaklığı ve süresi, takviye tane boyutu ve vakum değerinin artması infiltrasyon mesafesinin artmasına, ancak takviye-hacim oranının artması infiltrasyon mesafesinin azalmasına neden olmuştur. İstenilen infiltrasyon yüksekliğinin elde edilmesi için en uygun infiltrasyon süresi 3 dakika olarak belirlenmiştir [2].

Çıtak vd., (2010) vakumlu infiltrasyon sırasında, %10, %20 ve %30 takviye-hacim oranlarındaki MgO parçacıklarını Al matris ile homojen şekilde karıştırdıktan sonra cam tüplere doldurarak kompozit malzemeler üretmişler. Bu çalışmada 730±5 °C infiltrasyon sıcaklığı, 550 mmHg vakum değeri ve 3 dakika infiltrasyon süresi işlem parametreleri olarak kullanılmıştır. İnfiltrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, üretilen kompozitlerin

mikroyapı görüntüsü alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, takviye-hacim oranının azalması ısı iletkenlik değerin artmasına sebep olmuştur [26].

Çalın vd., (2007) yaptıkları çalışmada, bir titreşim aparatı yardımıyla takviye parçacıkları sıkıştırmış, böylece basınçlı, basınçsız ve vakumlu infiltrasyon yöntemlerinden birisiyle kompozit malzeme üretmi yapmışlardır. Bu aparat kullanılarak farklı boyutlardaki MgO tozların sıkıştırılabilirlik özelliği araştırılmıştır. Sonuçlara göre, tasarlanan aparat yardımıyla istenilen sayıda numune aynı zamanda ve aynı oranda homojen olarak başarılı bir şekilde sıkıştırılmıştır. Ayrıca, bu yöntem kullanılarak farklı boyutlardaki MgO tozunun sıkıştırılabilirliği araştırılmıştır. En yüksek sıkıştırma oranı, 3 dakikalık sıkıştırma sonucu elde edilmiştir [27].

Pul vd., (2010) vakumlu infiltrasyon yöntemiyle % 5, %10, %15 takviye-hacim oranlarındaki kompozit malzemeler üretmişler. Matris malzemesi olarak Al tozu, takviye elemanı olarak ise MgO tozu kullanılan çalışmada üretilen kompozitlerin aşınma dirençleri, farklı yükler ve mesh boyutlarında araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri alınıp, mikroyapı özellikleri EDS yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan takviye-hacim oranı, abrasif aşınmanın da artmasına sebep olmuştur. En yüksek aşınma oranı, 80 mesh boyutundaki zımpara kağıdında ve uygulanan yükün 30 N değerine sahip olduğunda meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, gözeneklilik oranı ve takviye-hacim oranının abrasif aşınmayı etkileyen en önemli parametreler olduğunu belirtmişler [28].

Pul vd., (2011) vakumlu infiltrasyon yöntemiyle %5, %10, %15 takviye-hacim oranlarına sahip Al matrisli MgO takviyeli kompozitler üretmişler. Daha sonra, üretilen parçalar üzerinde üç farklı kesici takım (sementit karbür(SK), kübik bor nitrür (KBN) ve kaplamalı kübik bor nitrür (KBN K)) ile tornalama işlemi yaparak, kesme hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülük (R_a) üzerindeki etkilerini araştırmışlar. Elde edilen sonuçlara göre, artan kesme hızı pürüzlülük değerin azalmasına, artan ilerleme hızı ise pürüzlülük değerin artmasına sebep olmuştur. Tüm işlemler arasında en yüksek pürüzlülük değeri 150 m/dak kesme hızında, en kötü işlenebilirlik ise %15 MgO takviye-hacim oranına sahip numunede elde edilmiştir. Diğer yandan, %5 ve %10 MgO takviye-hacim oranlarında en iyi yüzey kalitesi SK kesici takım kullanıldığında, %15 MgO takviye-hacim oranında ise KBN K kesici takım kullanıldığında elde edilmiştir [29].

Çalın vd., (2015) yaptıkları çalışmada, toz boyutu ve matris sıcaklığının SiC takviyeli Al7075 matrisli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar. Vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilen bu kompozitlerde, toz boyutu ve sıcaklığının artması, infiltrasyon yüksekliğin de artmasına sebep olmuştur. Bununla beraber, 150 µm toz boyutu ve 800 °C sıcaklık değerinde tam infiltrasyon elde edilmiştir. Üretilmiş kompozitlerdeki gözeneklilik oranı 3,2 – 14,6 % arasında değişmekte olup, en düşük gözeneklilik oranı 105 µm toz boyutunda elde edilmiştir. En yüksek kırılma mukavmeti (263 MPa) 800 °C matris sıcaklığı ve 420 µm toz boyutu kullanılan kompozitlerde elde edilmiştir. Özet olarak bu çalışmada, tam infiltrasyonun elde edilmesi için en önemli parametrelerin parçacık boyutu ve sıcaklık değeri olduğunu, vakumlu infiltrasyon yönteminin yüksek takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerin üretilmesinde geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla daha uygun olabileceğini belirtmişlerdir [30].

Aksöz vd., (2013) basınçlı infiltrasyon yöntemiyle Al2014 matrisli %10 ve %20 B₄C takviyeli kompozitler üretmişler. Daha sonra sıvı faz sinterleme, yaşlandırma ve kriyojenik soğutma işlemleri uygulayarak, kompozitlerin sertlik ve mikroyapısında oluşan değişimleri incelemişler. En yüksek sertlik değeri ve homojen element dağılımı, kriyojenik soğutma işlemi uygulanan kompozitlerde elde edilmiştir. Bu sebeple, kriyojenik işlemin özellikle yaşlandırılabilir alaşımlar üzerinde daha etkili olabileceğini belirtmişlerdir [31].

Candan, S. (2009) yaptığı çalışmada, %3.5 hacimsel oranındaki NaCl ortamda, ağırlıkça %2 ve %8 Mg alaışımının Al matrisli kompozitlere ilavesinin, korozyon direnci üzerinde yarattığı etkileri araştırmıştır. Bu çalışmada kompozit malzemeler basınçlı infiltrasyon yöntemiyle 750 °C sıcaklık değerinde ve %60 SiC parçacık takviye oranında üretilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlara göre, saf Al matrise kıyasla, üretilen kompozitlerde Mg içeriği arttıkça kütle kaybının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, vakumlu infiltrasyon sırasında Al-Mg alaışımı ve SiC parçacıkları arasında oluşan metallerarası reaksiyon, matris kanallarının sürekliliğini bozarak, kompozit malzemenin korozyon direnci üzerinde yararlı etkilerin oluşmasına sebep olduğu tespit edilmiştir [32].

Demir vd., (2004) basınçlı infiltrasyon yöntemiyle Al matrisli Al₂O₃/SiC takviyeli kompozitler üretmişler. İnfiltrasyon sıcaklığı ve basıncının infiltrasyon için önemli parametreler olduklarını, düşük infiltrasyon sıcaklıklarında yüksek basınçlara ihtiyaç

duyulduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada %13 takviye-hacim oranı, 800 °C sıcaklık değeri ve 3 MPa infiltrasyon basıncı işlem parametreleri olarak kullanıldığında, maksimum mukavemet değeri (558 MPa) elde edilmiştir [33].

Şimşek vd., (2017) basınçsız infiltrasyon yöntemiyle %10, %20, %30 ve %40 takviye-hacim oranlarına sahip Al7075 matrisli SiO₂ takviyeli kompozitler üretmişler. 1 ms⁻¹ kayma hızı ve 15 N yük şartlarında gerçekleşen disk üzeri aşındırma test cihazı yardımıyla, kompozitlerin aşınma davranışları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, SiO₂ takviye-hacim oranı arttıkça, kompozit malzemelerin yoğunluk oranında ve aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybında düşüş görülmüştür. En yüksek yoğunluk oranı %10 SiO₂ takviye-hacim oranında (2,83 gr/cm³), en düşük yoğunluk oranı ise %40 SiO₂ takviye-hacim oranında (2,68 gr/cm³) elde edilmiştir. Diğer yandan, SiO₂ takviye-hacim oranının azalması, sertlik değerinin artmasına sebep olmuştur. En yüksek sertlik değeri %4 SiO₂ takviye-hacim oranında (171 HV), en düşük sertlik değeri ise %10 SiO₂ takviye-hacim oranında (143 HV) elde edilmiştir. Ayrıca, alüminyum kompozitlerde ağırlık kaybının azalması, sürtünme katsayısının azalmasına neden olmuştur [34].

Pul vd., (2009) vakumlu infiltrasyon yöntemiyle Al matrisli MgO takviyeli kompozitleri %5, %10 ve %15 takviye-hacim oranlarında başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Aldıkları sonuçlara göre takviye-hacim oranı azaldıkça infiltrasyon mesafesinde artış, gözeneklilik değerinde ise düşüş görülmüştür [35].

Assar (1999) basınçlı infiltrasyon yöntemiyle Al matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozitleri farklı takviye tane boyutları kullanarak üretmişlerdir. Alınan sonuçlara göre, artan takviye tane boyutu ve infiltrasyon basıncı gözenek miktarının düşmesine ve daha iyi infiltrasyon kalitesinin elde edilmesine sebep olmuştur. En yüksek gözeneklilik %2.4 oranıyla 63-90 µm takviye tane boyutlarında elde edilmiştir [36]. Liu vd., (2011) basınçsız infiltrasyon yöntemiyle Al matrisli SiC takviyeli kompozitleri başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Farklı takviye tane boyutları ve infiltrasyon sıcaklıkların üretilen kompozitler üzerindeki etkisini araştıran bu çalışmada, takviye tane boyutu ve sıcaklık değerinin artmasıyla infiltrasyon derinliği ve kalitesinin de arttığı görülmüştür [37]. Yao vd., (2014) çok düşük miktarda Ti tozunu önceden şekil verilmiş B₄C seramik malzemesine ilave ederek basınçsız infiltrasyon yöntemiyle B₄C/Mg kompozitlerini başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Buna

göre takviye tane boyutu ve sıcaklık değeri arttıkça infiltrasyon mesafesinde artış meydana gelerek daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [38].

Ates vd., (2012) farklı infiltrasyon basınçlarında Al₂O₃ matrisli SiC takviyeli kompozitler üreterek, artan infiltrasyon basıncının kompozit üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Söz konusu çalışmadan alınan sonuçlara göre infiltrasyon basıncı arttıkça kompozit malzemenin gözeneklilik oranı düşmekte olup, ısı iletkenlik değeri artmıştır [39]. Guan vd., (2013) basınçlı infiltrasyon yöntemiyle Mg matrisli karbon fiber takviyeli kompozitler üretilip, infiltrasyon mesafesi-infiltrasyon süresi arasındaki ilişkiyi farklı infiltrasyon basınçları kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Buna göre, infiltrasyon basıncı artarak infiltrasyon oranında da artış meydana gelmiştir, ancak bu artış kademeli olarak etkisini kaybetmiştir [40].

Khademian vd., (2013) basınçlı infiltrasyon yönteminde çelik ve cam infiltrasyon tüpleri kullanarak Cu₄₇Ti₃₃Zr₁₁Ni₆Sn₂Si₁ metal cam matrisli tungsten takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, infiltrasyon sıcaklığı arttıkça üretilen malzemenin kırılma direnci ve tokluk değeri düşmüştür. Optimum infiltrasyon sıcaklığı ve süresi çelik tüp için 900°C ve 10 dakika, cam tüp için ise 850°C ve 10 dakika olarak belirtilmiştir. Ayrıca çelik tüpleri kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleşen deneylerde, çelik-matris arayüzeyinde Fe-Ti alaşımları meydana gelmiştir [41]. Zahedi vd., (2011) farklı infiltrasyon sıcaklıkları kullanarak Al/SiC kompozitler üretmişlerdir. Aldıkları sonuçlara göre sıcaklık değerinin artması bağıl yoğunluk değerinin de artmasına sebep olmuştur [42].

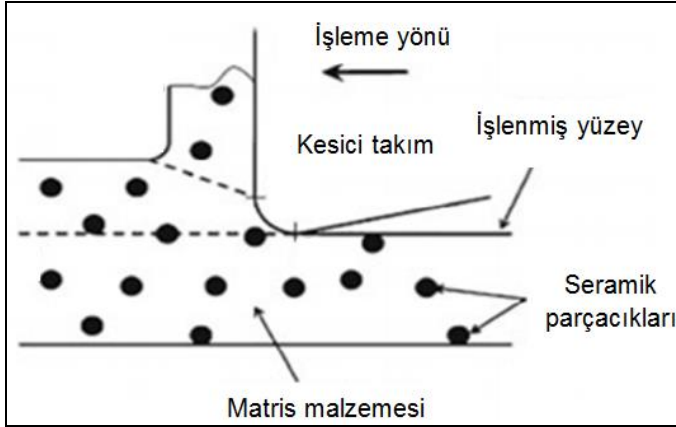
Kompozit malzeme üretiminde, ıslatmayı arttırmak için seramik takviye malzemelerin metaller ile kaplanması ve sıvı matris içerisine farklı tozların ilavesi bir çok çalışmada denenmiştir. Srinivasa vd., (2001) yaptıkları çalışmada, Al₂O₃ matrisli Al takviyeli kompozitlerin basınçsız infiltrasyon yöntemiyle üretimi sırasında sıvı matris içerisine Mg tozu ilave etmişlerdir. Bu işlem sonucunda, takviye ve matris arasındaki temas alanı artarak infiltrasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir [43]. Metal kaplamalı seramik takviyeler, infiltrasyon sırasında daha iyi akıcılık özelliklerine neden oldukları için, gün geçtikçe daha geniş kullanım alanlarına sahip olmaktadır. Carlos vd., (2005) SiC tozlarına Ni kaplaması yaparak Al matrisli SiC takviyeli kompozitleri başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Aldıkları sonuçlara göre, Ni kaplaması SiC-Al arasındaki etkileşimi

azaltarak, ıslatmanın artmasına yardımcı olmuştur [44]. Daoud (2005) basınçlı infiltrasyon işlemi sırasında, Al₂O₃ ve karbon fiber arasındaki ıslatma sorununu gidermek için Ni kaplamalı karbon fiberler kullanmıştır [45]. Ren vd., (2007) basınçsız infiltrasyon yöntemi sırasında Mg ve Si tozlarını SiC parçacık takviyeli ve Al matrisli kompozitlere ilave ederek termomekanik özelliklerin değişimini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, Si ve Mg hacim oranları sırasıyla %6 ve %4 'den az olduklarında, matris ve takviye arasındaki ıslatma oranı önemli derecede azalmıştır [46].

Yapılan literatür araştırması sonucunda, bu çalışmada kompozit malzemelerin üretilmesi için en uygun yöntemin infiltrasyon yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yöntemin uygulama açısından basit olması, yüksek teknolojilere ihtiyaç duymaması ve daha düşük maliyetlerde matris ve takviye arasında yeterli ıslatılabilirliğinin elde edilmesi ve bunun sonucunda daha başarılı kompozitlerin üretilmesi gerçekleştirilen seçimin ana nedenlerindendir. Bu çalışmanın devamında vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilen kompozitler alıñılmamış imal usullerinden olan elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenip, işleme performansı araştırılmıştır.

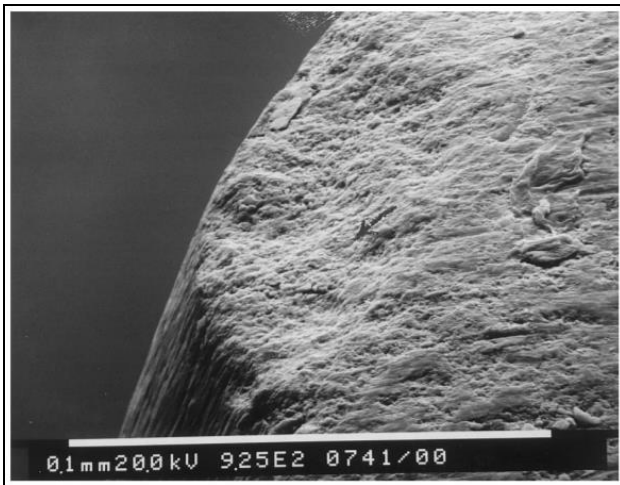
2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Geleneksel İmalat Yöntemleri ile İşlenmesi

MMK kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, bu malzemeleri geleneksel imal yöntemleriyle işlerken rastlanılan zorluklar büyük sorun haline gelmiştir. Genel olarak bir malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren faktörler, aynı zamanda o malzemenin işlenebilirliğinin düşmesine neden olmaktadır. Alüminyum matris içerisine seramik takviye ilavesi, malzemenin aşınma direncinin iyileşmesine ve bu nedenle işlenebilirliğinin düşmesine neden olur. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi, kesici takım işleme sırasında sert seramik parçacıklara çarparak aşınmaya başlar ve bu aşınma oranı seramik parçacık sayısı ile doğru orantılı olarak artar. İşleme sırasında en yüksek aşınma oranı takımın kesici uç bölgesinde meydana gelir [47].



Şekil 2.1. Metal matrisli kompozitlerin geleneksel yöntemler ile işlenmesi

Yapılan bir çalışmada, Al_2O_3/TiC kesici takımlar kullanılarak $Al/20\%SiC$ kompozitler Tornalama yöntemiyle işlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, takımın kesici uç köşelerinde aşınma nedeniyle dökülme meydana gelmiştir (Şekil 2.2). Aynı çalışma için TiN ile kaplanmış kesici takımlar kullanıldığında, daha düşük kesme kuvvetleri uygulanarak malzeme kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir [48]. Shoba vd., (2015) yaptıkları çalışmada takviye-hacim oranının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karıştırmalı döküm ile üretilen Al matrisli SiC ve RHA takviyeli hibrid kompozitlerde, takviye-hacim oranındaki artış kesici takımda meydana gelen aşınma oranının artmasına sebep olmuştur. Bu artış sonucunda, malzeme kaldırma işleminin devam etmesi için daha yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.2’de talaşlı imalat yöntemleriyle malzeme kaldırma sırasında Al_2O_3 kesici takımında meydana gelen aşınma fotoğraflanmıştır [49].



Şekil 2.2. Malzeme kaldırma sırasında Al_2O_3 kesici takımında meydana gelen aşınma

Kannan vd., (2006) yaptıkları çalışmada, takviye parçacık boyutunun kesici takımın aşınmasındaki etkisini araştırmışlardır. Nanometre boyutlarındaki takviye parçacıkları kullanıldığında, takım aşınma oranında yüksek oranda düşüş, takım ömrü ve işlenebilirliğinde ise önemli derecede artış görülmüştür [50]. Razavykia vd., (2015) Mg matrisli kompozitlerin geleneksel yöntemler ile işlenmesi sırasında elde edilen kesme profillerin Mg alaşımındaki gibi düz olmadıklarını belirtmişlerdir. Bunun nedeni ise kompozit içerisindeki seramik parçacıkların kesici takım ile teması geçmesi ve bu yüzden kesme kuvvetinin sabit seviyede devam etmemesi olarak açıklamışlardır [51]. Suresh vd., (2014) yaptıkları çalışmada grafit parçacıkları Al matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanmışlardır. Bu parçacıkların sağladığı yağlama etkisinden dolayı, geleneksel yöntemler ile işleme sonucunda daha iyi yüzey pürüzlülükleri elde etmişlerdir [52]. Kılıçkap vd., (2005) kesme hızı, takım ilerleme hızı ve kesme derinliğinin takım aşınmasıyla doğru orantılı olduğunu altını çizmişlerdir. Ayrıca TiN ile kaplanmış kesici takımların, malzeme kaldırma sırasında aşınmaya karşı daha dayanıklı olduklarını belirtmişlerdir [53].

Yukarıda belirtilen tüm sorunlar göz önünde bulundurularak, seramik takviyeli metal matrisli kompozitler gibi sert ve aşınmaya karşı dirençli malzemeleri hatasız ve ekonomik bir şekilde işleyebilmek için, alışılmamış malzeme kaldırma yöntemlerinin kullanımı artış göstermiştir.

2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Alışılmamış İmal Usulleri ile İşlenmesi

Metal matrisli kompozitlerin havacılık ve otomotiv sanayilerindeki kullanımı, bu malzemelerin geliştirilmiş mukavemet, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerden dolayı giderek artmaktadır. Ancak, sert ve aşınma direnci yüksek parçacık takviyeli kompozitlerin geleneksel yöntemler ile işlenmesi büyük sorun haline gelmiştir. Alışılmamış imalat yöntemleri bu gibi sorunların ortadan kaldırılmasında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Aşındırıcı Jet ile işleme, Aşındırıcı Su Jeti ile işleme, Elektro Erozyon ile işleme, Elektro Kimyasal işleme, Lazer Işını ile işleme ve Ultrasonik işleme metal matrisli kompozitlerin işlenmesinde sıkça kullanılan alışılmamış işleme yöntemleridir.

Elektro kimyasal işleme (EKİ) genel olarak geleneksel yöntemler ile işlenmesi güç yüksek sertlikteki malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde malzeme kaldırma

işleminin gerçekleşmesi için herhangi bir ısı veya mekanik enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yerine, malzeme kaldırma işlemi elektrik iletken iş parçasının anodik çözünmesiyle meydana gelir. Bu yöntemde, ilk olarak elektrik iletken takım (katot) ve işparçası (anot) elektrolit içerisine yerleştirilir. İşlem elektrolit sıvısı içerisinde yeterli elektrik akımının sağlanmasıyla gerçekleşir. EKİ yönteminin geleneksel yöntemlere göre avantajları başlıca; takım aşınmasının olmaması, yüzey altı hasarın oluşmaması, pürüzsüz yüzeylerin elde edilebilmesi ve malzeme sertliği önemli olmaksızın karmaşık şekillerin işlenilebilmesidir [54].

Senthilkumar vd., (2009) yaptıkları çalışmada, EKİ işlem parametrelerinin performans kriterleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre herhangi bir işlem parametresinin artması, işparçası işleme hızı (İİH) değerinin artmasına sebep olmuştur [55]. Yapılan bir diğer çalışmada [56], işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Uygulanan düşük gerilimler işparçası yüzeyinde hataların oluşmasına neden olmuştur. Bunun nedeni ise, düşük akım yoğunluğu nedeniyle iş parçası yüzeyinde meydana gelen kararsız çözünme olarak açıklanmıştır. Benzer bir çalışmada [57], EKİ yönteminde uygulanan iyileştirmeler sonucunda, işleme süresinin azalmasıyla üretim hızında önemli derecede bir artış görülmüştür. Elde edilen en iyi İİH ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0.413 g/dak ve 2.172 μm olarak açıklanmıştır.

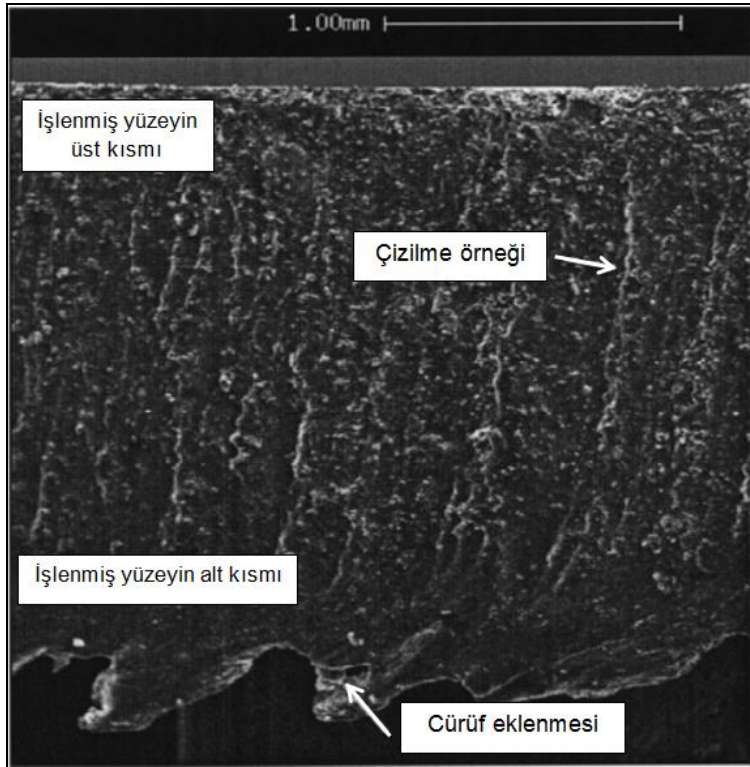
Aşındırıcı su jeti ile işleme (ASJİ) yönteminde küçük aşındırıcı parçacıklar, yüksek basınçlı ve hızlı kesici takımlar gibi davranarak malzeme kaldırma işleminin gerçekleşmesini sağlarlar. Bu yöntemde diğer ısı malzeme kaldırma yöntemlerine kıyasla (lazer, EEİ) işleme sırasında yüksek sıcaklıklar oluşmamaktadır. Bu sebepten dolayı, ASJİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerde herhangi bir ısıdan etkilenmiş hasar görünmemektedir [58]. Bu olay her yönde işlenilebilirlik kabiliyeti [59], düşük kesme kuvvetlerinin uygulanabilmesi [60] ve yüksek ilerleme hızlarında kesme işleminin yapılabilmesi [61] gibi avantajları yanında getirmiştir. ASJİ yöntemiyle işlenen yüzey kalitesinin kötü olması ise bu yöntemin en büyük dezavantajıdır.

Srinivas vd., (2012) gerçekleştirdikleri çalışmada, aşındırıcı su jetinin penetrasyon derinliğini, farklı takviye-hacim oranlardaki kompozitlerde incelemişlerdir. SiC takviyeli Al matrisli kompozitlerin kullanıldığı çalışmada, jetin penetrasyon derinliğinin işparçası sertliği ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, artan su jeti basıncı ve

aşındırıcı parçacık debilerinde, penetrasyon derinliği artmıştır. Bunun yanında, artan jet dönüş hızı penetrasyon derinliğinin düşmesine sebep olmuştur [62].

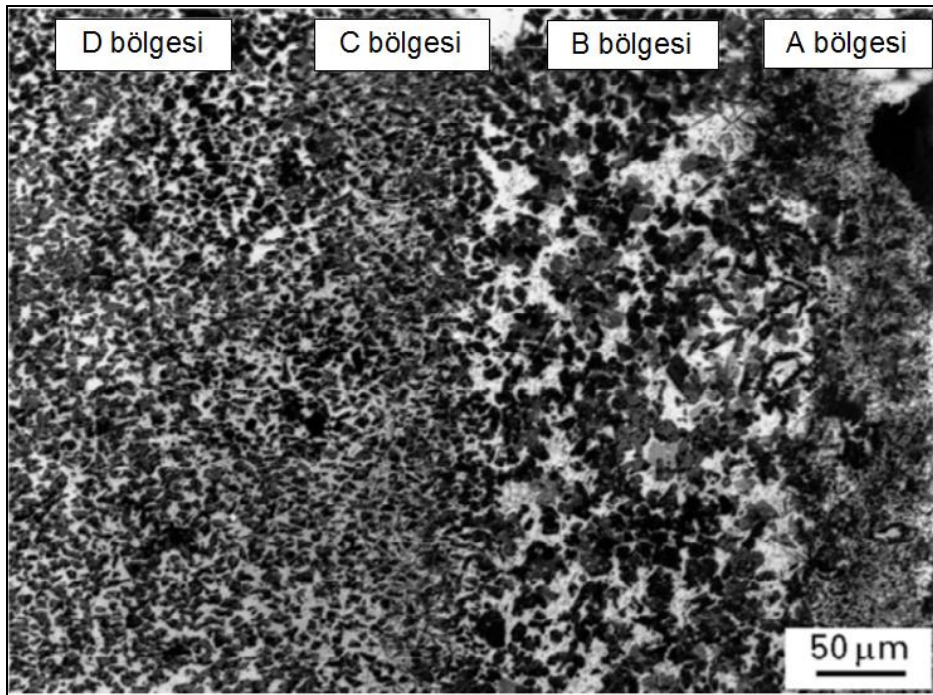
Lazer ile işleme, malzeme kaldırmanın gerçekleşmesi için ısı enerjisi esas alan temassız bir işleme tekniğidir. Bu yöntem sadece iletken malzemeler ile sınırlı kalmayıp, çeşitli malzemelerin işlenmesinde uygulanabilmektedir. Malzemelerin kırılgenlik ve sertlik özellikleri önemli olmaksızın, düşük ısı iletkenlik ve yayınlılığa sahip malzemelerin işlenmesinde en iyi seçeneklerden birisidir. Bu yöntemde, malzeme kaldırılması için sırayla ısınma, ergime, buharlaşma, kimyasal bozunma, dönüştürölmüş malzemenin giderilmesi vb. işlemler gerçekleşmektedir [59, 63]. Ancak bu yöntemde kullanılan yüksek sıcaklıklar nedeniyle elde edilen yüzey kalitesi oldukça kötüdür.

Muller vd., (2000) SiC takviyeli Al matrisli kompozitlerin Lazer ile işleme sonucu elde edilen yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Bu yöntemle elde edilen yüzey kalitesinin nispeten kötü olduğu, bunun nedeni ise şekil 2.3 'de göröldüğü gibi işleme sırasında yüzeyin çizilmesi ve cürüf eklenmesi olarak belirtmişlerdir [58].



Şekil 2.3. Lazer ile işleme sırasında meydana gelen yüzey özellikleri

Hong vd., (1997) yüksek SiC takviye-hacim oranlı Al6061 matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda farklı koruyucu gaz basınçları ve kesme hızları gibi parametrelerin işlenmiş yüzey ve ısıdan etkilenmiş bölge üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lazer ile işlenmiş yüzeyin kesitsel mikroyapısı incelendikten sonra, şekil 2.4 'de görüldüğü gibi dört ayrı bölgenin (A, B, C ve D) ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Kesme bölgesine en yakın bölge olan A bölgesinde, aşırı sıcaklık nedeniyle Al_4C_3 ve Al_4Si_4 fazları oluşmuştur. Bu bölgede sıcaklık $1347^{\circ}C$ 'nin üzerindedir. B bölgesi A bölgesine kıyasla daha düşük sıcaklığa sahiptir. Bu bölgede Al matris tamamen ergimiş olup, büyük SiC parçacıkları Al sıvısında sarsılmış haldedirler. C bölgesinde ergime sıcaklığı yaklaşık olarak $650^{\circ}C$ ve $1347^{\circ}C$ 'nin arasındadır. Bu sebeple SiC takviye ve Al matris kısmen ergimiş durumdadırlar. D bölgesi ise ısıdan etkilenmemiş ana malzemedir [64].



Şekil 2.4. Lazer ile işleme sonucu elde edilen yüzeyin kesitsel mikro yapısı

Alışılmamış imal usullerinin kendine özgün kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu konuya örnek olarak, mekanik aşınmayla gerçekleşen bütün yöntemlerde (ultrasonik işleme, aşındırıcı su jeti ile işleme, aşındırıcı jet ile işleme), iş parçasından daha sert takımlara ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca, bu yöntemler iş parçası yüzeyinde mekanik hasarların (kalıntı gerilmeler, mikro çatlaklar) meydana gelmesine neden olurlar. Bununla beraber, EKİ

yöntemi sadece elektrik iletken malzemelerin işlenmesinde, Kimyasal işleme yöntemi ise sadece kimyasal olarak aktif malzemelerin işlenmesinde kullanılabilirler.

Alışılmamış imalat yöntemleri, diğer alışılmamış veya geleneksel imalat yöntemleriyle birleşerek, bütün bu kısıtlamaları ortadan kaldıracak hibrid malzeme kaldırma yöntemlerini oluştururlar. Hibrid işleme yöntemleri, iki veya daha fazla yöntemin avantajlarını aynı yöntemde toplamakla kalmayıp, bazı durumlarda her bir yöntemde meydana gelebilecek kısıtlamaları da ortadan kaldırır. Örnek olarak, EKİ ve EEİ yöntemleri elektrik iletken malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar. Ancak bu yöntemlerin birleşimi olan Elektro Kimyasal Erozyon ile işleme (EKEİ), elektrik iletkeni olan veya olmayan malzemelerin işlenmesinde de kullanılabilir haldedir. Liu vd., (2012) EKEİ yöntemiyle Al6061 matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozitleri işleyerek, işleme parametrelerin İİH ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, akım ve uygulanan gerilimin artması, İİH 'nın artmasına sebep olmuştur. Ancak vurum süresinin artması İİH 'nın başta artmasına, daha sonra düşmesine neden olmuştur. Bununla beraber, yüzey pürüzlülüğü değeri vurum süresinin artmasıyla başta düşmekte olup, daha sonra artış devam ettikçe artmakta olduğu görülmüştür [65]. Aynı yazarların yaptıkları diğer bir çalışmada [66], Taşlama Destekli EKEİ yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülükleri normal EKEİ ile kıyaslamışlardır. Çalışmadan alınan sonuçlara göre, normal EKEİ yöntemine kıyasla yüzey pürüzlülüğü değerinde önemli derecede bir düşüş görülmüştür.

2.5. Metal Matrisli Kompozitlerin EEİ yöntemi ile İşlenmesi

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, EEİ yöntemiyle işlenilen en yaygın kompozit malzemenin Al/SiC ve Al/ Al_2O_3 olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardaki ana hedef, işleme parametrelerini verimli hale getirerek ihtiyaca göre en uygun sonucu elde etmektir.

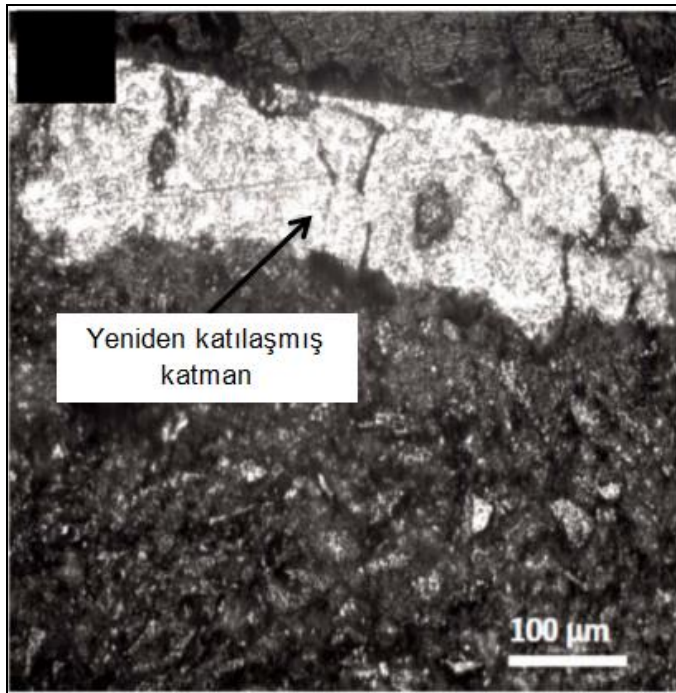
Hocheng vd., (1997) EEİ yöntemiyle SiC/Al kompozitlerin işlenmesi sonucu elde edilen işparçası yüzeylerini inceleyerek, daha küçük boyutlu kraterlerin oluşması için yüksek akımların ve kısa vurum sürelerinin kullanılmasını önermişlerdir [67]. Al/SiC kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlendiği diğer bir çalışmada, akım değeri ve silisyum karbür ağırlık yüzdesinin, İİH ve yüzey pürüzlülük oranı üzerinde oldukça büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir [68]. Muller vd., (2000) yaptıkları bir çalışmada, EEİ, Lazer ile

işleme ve ASJİ yöntemlerinin kullanılması sonucunda elden edilen iş parçası yüzeylerini kıyaslamışlardır. Buna göre, EEİ yönteminin kullanılması kraterli yüzeylerin oluşmasına neden olup, bu kraterlerin boyutları boşalım enerjisiyle doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, EEİ yönteminde diğer yöntemlere kıyasla işlenmiş yüzeylerde daha az alt yüzey hataları görülmüştür [58]. Al/%10 SiC kompozitlerini EEİ yöntemiyle işleyen diğer bir çalışmada [69], artan akım ve vurum süresi İİH ve EAH değerinin de artmasına sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada işleme boşluğundaki dielektrik basıncının İİH ve EAH üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Dhar vd., (2007) bir matematiksel model geliştirerek, Al matrisli SiC takviyeli kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlenmesi sırasında en uygun işleme parametreleri tahmin etmeyi başarmışlardır [70]. Prabu vd., (2013) düşük frekans titreşimli takımlar kullanarak, Al/TiB₂ kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlenmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, İİH ve işleme sonrasında iş parçasında meydana gelen yüzey çatlaklarının, artan akım değeriyle beraber artmakta olduğu tespit etmişlerdir [71]. 2014 yılında yapılan bir çalışmada, çok kriterli optimizasyon tekniği kullanılarak, EEİ yöntemiyle Al/TiB₂ kompozitlerin işlenmesi sırasında kullanılan işleme parametrelerinin optimize edilmesi öne sürülmüştür. Bunun yanısıra, elde edilen optime parametrelerin doğruluğunu ispat etmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır [72]. Diğer bir çalışmada, farklı akım, vurum süresi, bekleme süresi ve gerilim gibi parametrelerin performans kriterleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Al7075/SiC metal matrisli kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlenmesi sırasında uygulanan akım değerinin artması, İİH ve EAH gibi parametrelerin de artmasına sebep olmuştur. Bunun yanısıra, boşalım akımının artması malzeme kaldırma sırasında işparçası yüzeyinde daha büyük kraterlerin oluşmasına ve sonuç olarak daha pürüzlü yüzeylerin elde edilmesine neden olmuştur. PCA Taguchi metoduyla belirlenen optimum işleme parametreleri; akım 12 Amps, vurum süresi 15 µs, bekleme süresi 1 µs ve gerilim 35 V olarak açıklanmıştır [73]. Yapılan bir çalışmada, bulanık mantık analizi yardımıyla Al matrisli SiC ve B₄C takviyeli hibrid kompozitlerde EEİ performans kriterlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır [74]. Benzer bir çalışmada, Taguchi metoduyla Al6061/%10 Al₂O₃ kompozitlerini EEİ yöntemiyle işlerken elde edilebilecek en yüksek İİH ve en düşük EAH belirtilmiştir. En yüksek İİH için kullanılması gereken işleme parametreleri; I = 14 A, T_{on} = 75 µs ve boşalım süresinin toplam süreye oranı (duty cycle) = 0.5, en düşük EAH için ise; I = 6 A, T_{on} = 75 µs ve boşalım süresinin toplam süreye oranı (duty cycle) = 0.5 olarak

belirlenmiştir [75]. Kar vd., (2018) yaptıkları deneysel çalışmalar ve matematiksel modellemeler sonucunda, Al matrisli %6 kırmızı çamur takviyeli kompozitlerin EEİ yöntemiyle işleme sırasında, uygulanan maksimum akımın performans kriterleri üzerinde önemli derecede etkisi olduğunu belirtmişlerdir [76].

EEİ sırasında iş parçası yüzeyinden ayrılan parçacıklar dielektrik sıvısı vasıtasıyla yüzeyden uzaklaştırılır. Ancak bazı durumlarda uzaklaştırma işlemi tam olarak gerçekleşmeyerek, aşınmış malzeme yüzeyde yeniden katılarak yeni bir katmanın oluşmasına sebep olur. 2017 yılında yapılan bir çalışmada, üç farklı Al matrisli kompozit EEİ yöntemiyle işlenerek, işleme parametrelerin katman kalitesi ve kalınlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, katman özelliklerinin önemli derecede takviye parçacıkların yapısına, kompozitin üretim yöntemine ve uygulanan maksimum akım değerine bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 2.5 'de görüldüğü gibi, sonradan oluşan katman içerisinde takviye parçacıkların olmaması işlenmiş yüzey ve ana malzeme arasında homojen özelliklerin elde edilememesine sebep olmuştur [77].



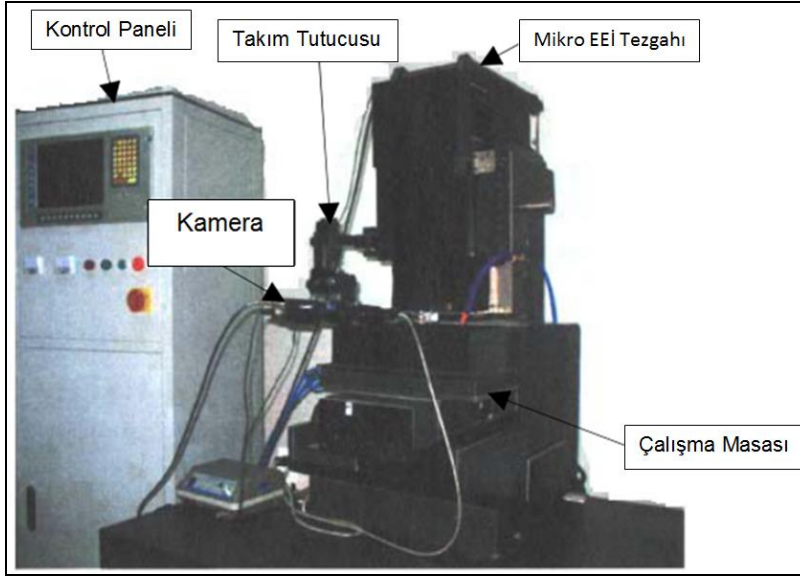
Şekil 2.5. Yeniden oluşmuş katmanın kesitsel görüntüsü

Velmurugan vd., (2011) EEİ yöntemiyle Al6061 matrisli %10 SiC ve %4 grafit takviyeli kompozitleri farklı işlem parametreleri kullanarak işlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, İİH değeri boşalım akımı, vurum süresi ve dielektrik basıncının artmasıyla artmakta olup,

gerilimin artmasıyla düşmektedir. Diğer yandan, EAH boşalım akımı ve gerilim değerine bağlı olarak değişmekte olup, vurum süresi ve dielektrik basıncının artmasıyla artmakta olduğu gözlemlenmiştir [78].

Kumar vd., (2014) bulanık mantık analiz tekniğini kullanarak, Al6351 matrisli %5 SiC ve %10 B₄C takviyeli kompozitleri EEİ sırasında, en düşük EAH, yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini elde etmek için uygulanması gereken optimum işleme parametrelerini başarılı bir şekilde tahmin etmişlerdir. Buna göre en uygun işleme parametreleri boşalım akımı = 5 A, vurum süresi = 50 μ s, boşalım süresinin toplam süreye oranı (duty cycle) = 6 ve gerilim = 45 V olarak açıklanmıştır [79]. Yapılan bir diğer çalışmada, Taguchi metodu ve bulanık mantık analizi kullanılarak, Al matrisli hibrid kompozitlerin EEİ sonucu elde edilebilecek optimum performans kriterleri (İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü) tahmin edilmiştir. Açıklanan sonuçlara göre akım değeri ve vurum süresi performans kriterlerini etkileyen en önemli faktörler olmuştur [80]. Radhika vd., (2014) benzer bir çalışmada Taguchi metodunu kullanarak EEİ yöntemiyle Al matrisli grafit ve Al₂O₃ takviyeli kompozitleri işlerken İİH ve EAH değerlerini etkileyen en önemli parametrelerin sırayla dielektrik basıncı ve vurum süresi olduğunu belirtmişlerdir [81].

Higuchi vd., (1991) geleneksel EEİ yönteminin binde bir boyutuna sahip, ancak aynı performansı sağlayan özel bir mikro EEİ üretmişlerdir [82]. Lim vd., (2003) darbe jeneratörü ile gereken gücün sağlandığı, transistor ve RC tiplerinde kullanılabilen özel bir mikro EEİ tasarlamışlardır [83]. Gang vd., (2006) yüksek hassasiyetli, XYZ eksenlerinde çizgisel hareket edebilen, 0.1 μ m çözünürlüğe sahip, 1 μ m dönme hassasiyetli yüksek hızlı döner mile sahip, yüksek doğrulukta granit tabanlı, küçük enerji güç üniteli ve işleme durumunu online olarak takip edebilmek için mikroskopik seviyede video çekme kabiliyetine sahip Mikro EEİ sistemi geliştirmişlerdir [84]. Geliştirilen bu sistem şekil 2.6 'da gösterilmiştir.



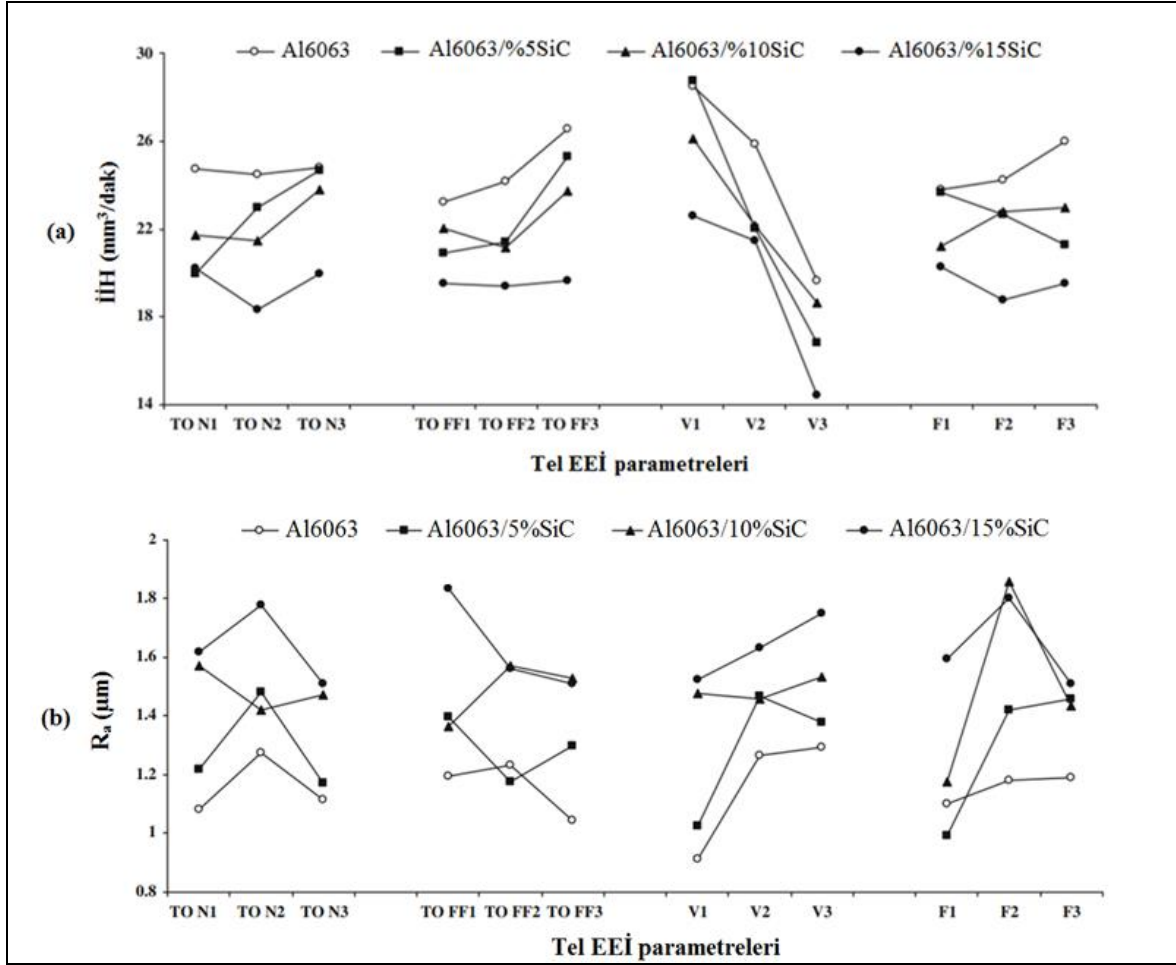
Şekil 2.6. Geliştirilen yüksek hassasiyetli mikro EEİ sistemi

Mikro EEİ yöntemiyle kompozitlerin yanısıra, çeşitli metaller ve alaşımlar da başarılı bir şekilde işlenebilmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan iş parçası malzemeleri Bakır [85], Titanyum alaşımları [86, 87], SK3 karbonlu takım çeliği [88], 304 paslanmaz çelik [89, 90], yüksek Nikel alaşımları [91], Tungsten karbür [92, 93] ve seramikler [94, 95] olmaktadır. Mikro EEİ yönteminde diğer bir önemli faktör ise kullanılacak takım malzemesidir. Takım malzemesi tam boyutlu ve net şekillerin elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Mikro EEİ yönteminde takım malzemesi olarak Tungsten [96, 97], Tungsten Karbür [86, 88, 93] veya daha uygun maliyetli malzemeler olan Bakır [85, 98], Grafit ve paslanmaz çelik kullanılabilmektedir. İyonsuzlaştırılmış su [99], Kerosen [88, 97], hidro karbür dielektrik sıvıları [100] vb. sıvılar ise yaygın olarak kullanılan dielektrik sıvılarıdır. Yapılan bir çalışmada EEİ sırasında mikro MoS₂ tozunu dielektrik sıvısına ilave edip ultrasonik titreşim uygulanarak daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve İİH elde edilmiştir [97].

Birçok araştırmacı Tel EEİ yöntemi üzerinde işlem modellemesi, işlem parametreleri, takım ve iş parça malzemesi, kullanılan dielektrik vb. alanlarda çeşitli çalışmalar yapmıştır. Puri vd., (2003) kaba işleme sırasında, geometrik yanlışlığın en fazla vurum süresi, bekleme süresi ve uygulanan maksimum akım ile etkilendiğini, ince işlemede ise en fazla vurum süresi ve sabit kesme hızından etkilendiğini tespit etmişlerdir [101]. Patil vd., (2010) deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuca göre, artan seramik takviye-hacim oranlarının performans kriterlerinin düşmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir [102]. Kumar vd., (2015) yanıt yüzey yöntemi kullanarak saf titanyumun tel EEİ ile elde edilen

sonuçların modellemesini yapmışlardır. Optimum parametreler kullanıldığında İİH ‘nın deneysel ve tahmin edilen sonuçlarında %6.95 oranında bir hata görülmüştür [103]. Ganpatrao vd., (2014) tel EEİ yöntemiyle Alumina takviyeli Al metal matrisli kompozitlerin üzerinde bir takım çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda Taguchi metodu kullanılarak takviye, vurum süresi, bekleme süresi, voltaj, maksimum ilerleme hızı, dielektrik basıncı ve takım gerilmesinin kesme hızı, yüzey kalitesi ve çentik genişliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır [104].

Satishkumar vd., (2011) Tel EEİ sırasında, vurum süresi (T_{ON}), bekleme süresi (T_{OFF}), gerilim farkı (V) ve tel ilerleme hızı (F) gibi işleme parametrelerin İİH ve yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Al6063 matris ve %5, %10 ve %15 takviye-hacim oranlarında SiC tozu takviye elemanı olarak kullanılan bu çalışmada, yüksek İİH ve düşük yüzey pürüzlülük değerlerin elde edilebilmesi için farklı kombinasyondaki işleme parametrelerin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Şekil 2.7 (a) ‘da görüldüğü gibi, yüksek vurum süresi (T_{ON1}), düşük bekleme süresi (T_{OFF3}), düşük gerilim farkı (V_1) ve düşük tel ilerleme hızı (F_1), Al/%15 SiC kompozitin işleme sırasında daha yüksek İİH elde edilmesi için önerilmiştir. Ancak, yüksek takviye-hacim oranında (15% SiC) vurum süresi ve bekleme süresinin İİH üzerinde önemli etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, Şekil 2.7 (b) ‘da görüldüğü gibi, vurum süresi düşük seviyeden (T_{ON1}) orta seviyeye (T_{ON2}) yükseldiği anda R_a değerinde artış meydana gelmektedir. Ancak vurum süresi orta seviyeden (T_{ON2}) yüksek seviyeye (T_{ON3}) yükseldiği zaman R_a değerinde farklı değişimler görülmektedir. Bu olay işleme parametrelerinin arasındaki etkileşimden kaynaklanabilmektedir [105].



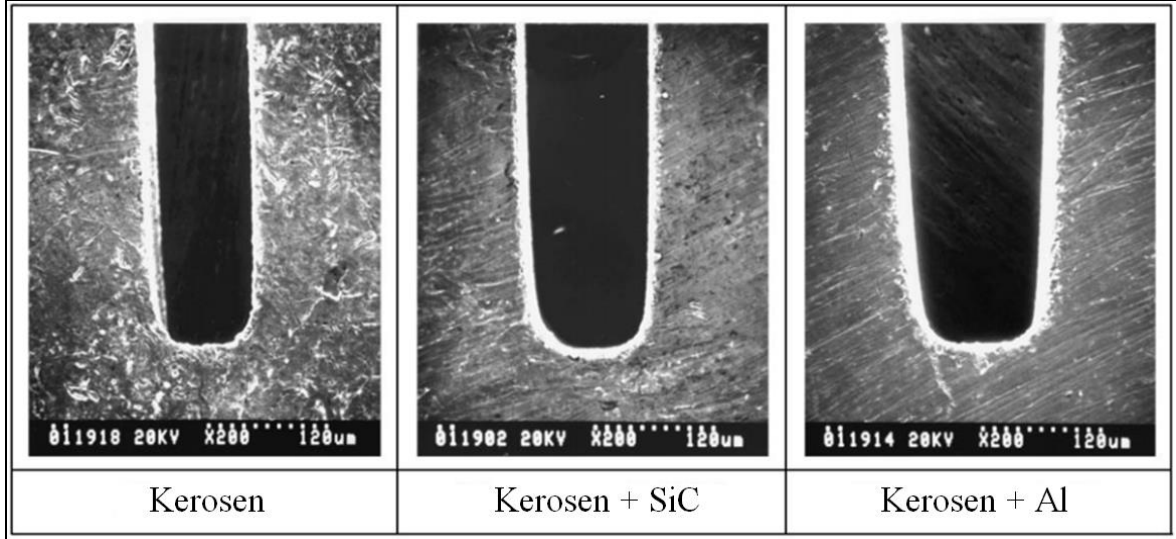
Şekil 2.7. Tel EEİ sırasında farklı işleme parametrelerinin (a) İİH (b) Ra üzerindeki etkisi

2.6. Alaşımların ve Metal Matrisli Kompozitlerin TK/EEİ yöntemi ile işlenmesi

TK/EEİ yönteminde kullanılan tozların termo-fiziksel özellikleri (elektriksel ve ısı iletkenlik, parçacık yoğunluğu vb.), bu yöntemin performansı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Wong vd., (1998) Grafit, Silikon (Si), Al, SiC, Molibden disülfür ve öğütülmüş cam tozlarının TK/EEİ performans parametreleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, öğütülmüş cam tozu hariç diğer tozların hepsi işleme genişliğinin en az iki kat artmasına sebep olmuşlardır. Al tozu kullanarak ise küçük kraterlere sahip ayna gibi yüzeyler elde edilmiştir [106].

Bu sonuçlar diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile uyum göstermektedir. Chow vd., (2000) yaptıkları çalışmada, artan vurum süresinin Al toz karışımı dielektrik sıvılarda boşalım boşluğunun artmasına sebep olmuştur. Ancak SiC toz karışımı dielektrik sıvılarda yüksek elektriksel direnç nedeniyle aynı sonuçların meydana gelmediği ispat edilmiştir. Bir

başka deyişle, EEİ yardımıyla mikro yarıklar uygulamalarında SiC tozu ilavesi İİH ve EAH parametrelerini arttırırken, Al tozu ilavesi en iyi yüzey kalitesi ve en geniş boşalım boşluğunu sağlamıştır (Şekil 2.8) [107].



Şekil 2.8. Geleneksel EEİ ve TK/EEİ yöntemiyle elde edilen mikro yarıkların mikroyapı görüntüsü

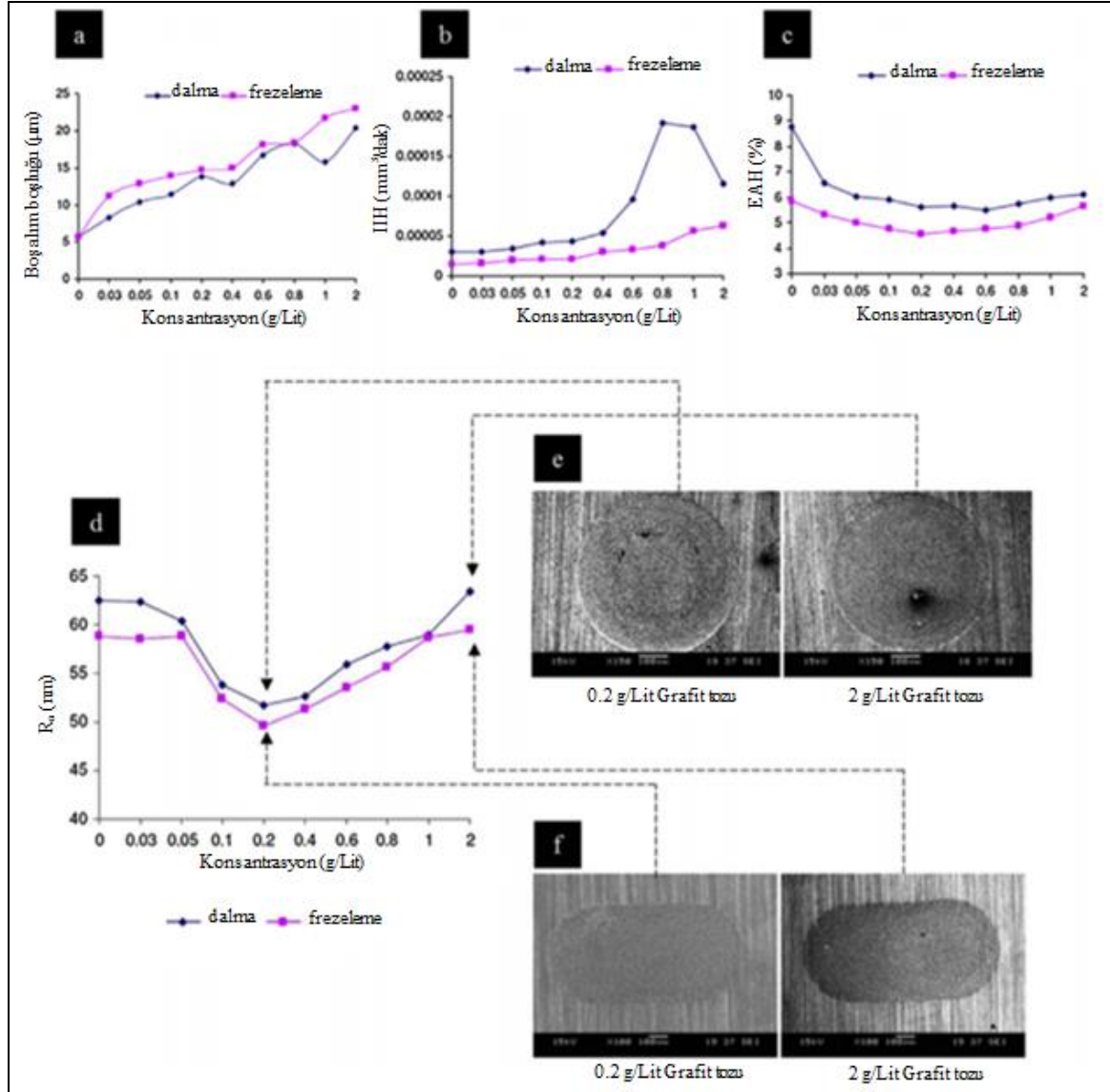
Tzeng vd., (2001) yaptıkları çalışmada, Al, SiC ve Krom (Cr) tozları arasında, Krom tozu kullanılarak en yüksek İİH elde edildiğini göstermişlerdir [108]. Ayrıca Al, Cr, SiC ve Bakır tozları arasında, Al tozu en iyi yüzey kalitesi ve en ince yeniden katılaşmış katmanın oluşmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, bakır tozu yüksek yoğunluk nedeniyle işleme sırasında katkıda bulunmayarak tankın altında birikmiştir [109].

Titanyum (Ti) ve Tungsten (W) TK/EEİ yönteminde kullanılan diğer metal tozlarıdır. Ti tozunun dielektrik sıvısına ilave edilmesi İİH, mikro sertlik ve yüzey kalitesinin artmasına sebep olmaktadır [110-112]. W tozunun dielektrik sıvısına ilavesi ise işlenmiş yüzeyin mikro sertlik değerini 100% 'e kadar arttırabilmektedir [113].

Titanyum dioksit (TiO_2), Titanyum karbür (TiC) ve B_4C gibi seramik tozları da TK/EEİ sırasında toz karışımı olarak kullanılmaktadır. B_4C tozunun deiyonize edilmiş suya ilavesi Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi sırasında İİH artmasına ve daha hassas mikro deliklerin elde edilmesine sebep olduğu belirtilmiştir [114]. Chen vd., (2009) TiC tozunu dielektrik sıvısına ilave ederek Al-Zn-Mg alaşımını TK/EEİ yöntemiyle işlemişlerdir. Sonuçlara

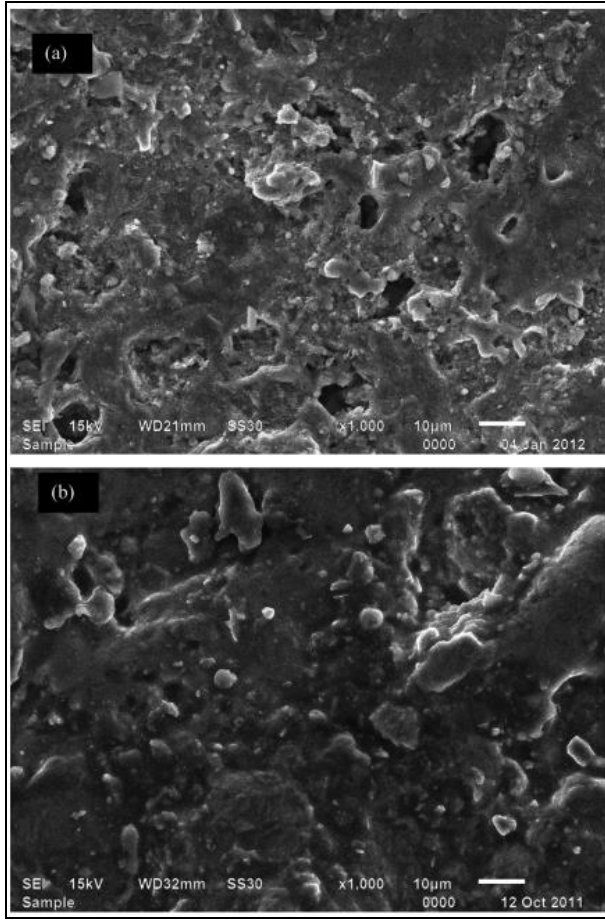
bakıldığında, Ti parçacıkları işlenmiş yüzey tarafına hareket edip ana malzemeden daha sert olan yeni bir katmanın oluşmasına neden oldukları tespit edilmiştir [115].

Grafit (Gr) tozu TK/EEİ yönteminde yaygın olarak kullanılan diğer bir katkı malzemesidir. Grafit tozu dielektrik sıvısının elektriksel iletkenliğini arttırarak daha iyi yağlama özelliğinin elde edilmesine neden olur. Wong vd., (1998) yaptıkları çalışmada, grafit tozu ilavesi yaparak ($38 \pm 3 \mu\text{m}$) SKH-54 işparçasının 2A boşalım akımı değerine kadar işlendiği durumlarda ayna gibi yüzeyin elde edilebileceğini belirtmişlerdir [106]. Jeswani vd., (1981) yaptıkları çalışmada, 4 g/L grafit tozunu ($10 \mu\text{m}$) dielektrik sıvısına ilave ederek, İİH değerinde %60 iyileşme ve EAH değerinde 15 azalma elde etmişlerdir [116]. Singh vd., (2015) yaptıkları çalışmada, Gr toz ilavesinin Co 605 süper alaşımının mikro sertlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Önemli miktarda grafit tozunun işlenmiş yüzey ile alaşım oluşturduğunu, diğer yandan geleneksel EEİ ve TK/EEİ yöntemlerinde mikro sertliğin maksimum akım, kutuplama ve vurum süresine bağlı olarak değiştiğinin altını çizmişler [117].



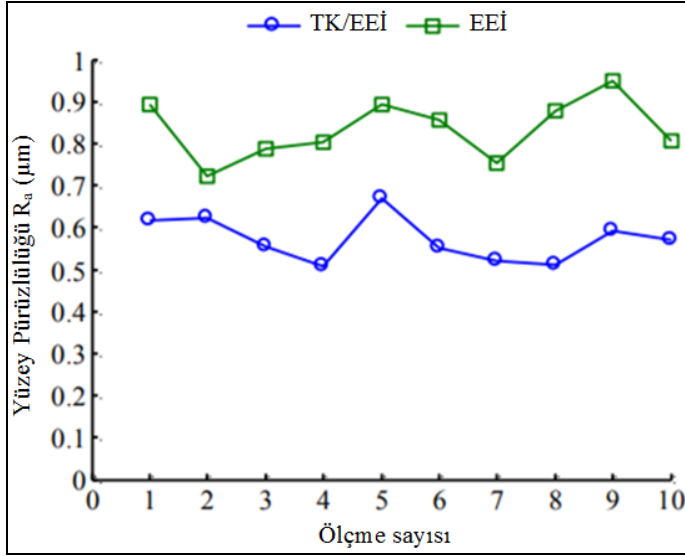
Şekil 2.9. Grafit tozunun (a) Boşalım boşluğu, (b) İİH, (c) EAH, (d) Ra üzerindeki etkisi, (e) dalma ve (f) frezeleme yüzey görüntüsü

Nano boyutlu grafit tozunun TK/EEİ performans parametreleri üzerindeki etkisi bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Jahan vd., (2010) mikro EEİ ve mikro EEİ ile frezeleme işlemleri sırasında dielektrik sıvısına grafit tozu (55nm) ilave ederek, pürüzsüz ve hatasız yüzeyler elde etmeyi başarmışlardır. Sonuçlara göre, TK/EEİ ile frezeleme yöntemi mikro EEİ yöntemine göre daha geniş boşalım boşluğuna, ancak daha düşük İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğünün oluşmasına sebep olmuştur. Şekil 2.9 'de görüldüğü gibi, her iki yöntemde en iyi yüzey pürüzlülüğü 0.2 g/L grafit tozu konsantrasyonunda elde edilmiştir [118].



Şekil 2.10. Farklı toz katkıları kullanılarak elde edilen mikroyapı (a) Grafit tozu, (b) Bakır tozu

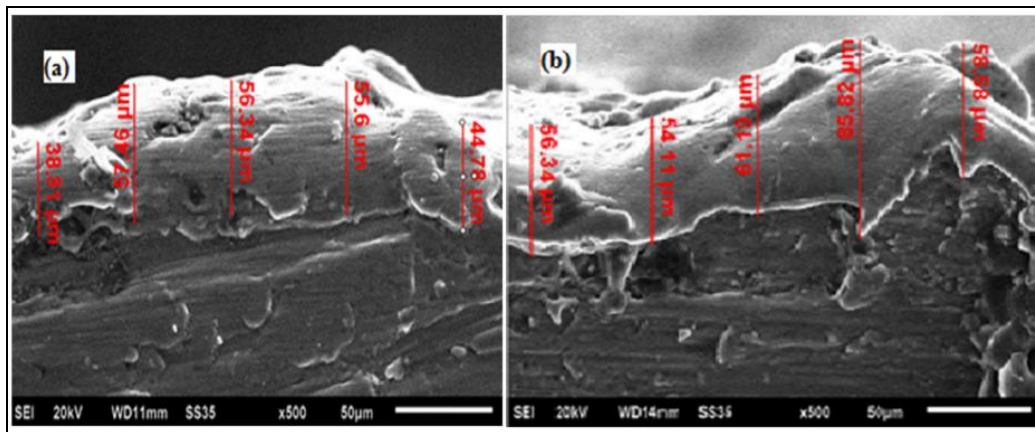
Sidhu vd., (2013) yaptıkları çalışmada, TK/EEİ sırasında üç farklı metal matrisli kompozit yüzeyinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. bu çalışmada işparçası olarak (i) %65 SiC/A356.2, (ii) %10 SiC– %5 kuartz/Al ve (iii) %30 SiC/ A359 kullanılmıştır. Uygulanan yüksek akımlarda ark meydana geldiği için maksimum akım değeri 12 A, minimum değeri ise 4 A olarak belirlenmiştir. Şekil 2.10 (a) ‘da dielektrik sıvısına grafit tozu ilave edilerek elde edilen yüzey mikroyapısı gösterilmiştir. Şekil 2.10 (b)’de ise aynı işleme parametreleri kullanılarak toz katkısı olarak bakır tozu tercih edilmiştir. şekillerden anlaşıldığı gibi, her iki yüzeyde boşluklar bulunmaktadır. Ancak, grafit tozu ile işlenilen yüzeydeki boşluk yoğunluğu ve derinliği bakır tozuna kıyasla daha fazladır. Bunun nedeni ise, bakır tozlarının yüksek iletkenlik özelliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir [119].



Şekil 2.11. EEİ ve TK/EEİ sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri

Hu vd., (2013) TK/EEİ sırasında Al toz parçacıkları dielektrik sıvısına ilave ederek yüzey özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Şekil 2.11 'de görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğü değerinde %31.5 oranında iyileşme görülmüştür. Bunun yanı sıra, sertlik değerinde %40 ve aşınma direncinde %100 iyileşme elde edilmiştir [120].

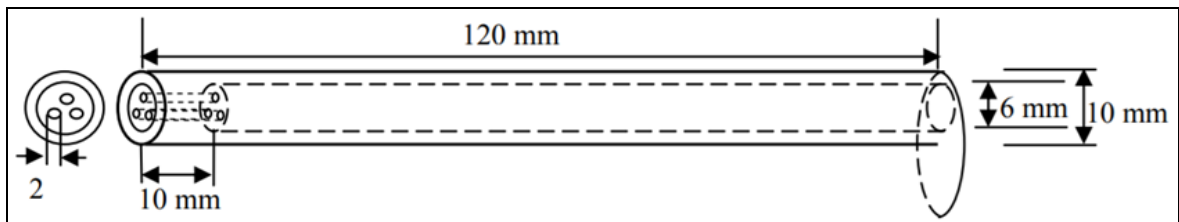
Dubey vd., (2018) krom toz parçacıklarını dielektrik sıvısına ilave ederek, İİH ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Al7075/B₄C işparçası olarak kullanılan bu çalışmada İİH, boşalım akımı ve vurum süresine bağlı olarak değişmekte olduğu görülmüştür. Ayrıca, yeniden katılaşmış katman kalınlığı artan akım değeri ile artmakta olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.12) [121].



Şekil 2.12. Farklı işleme parameteler uygulanarak TK/EEİ sonucu meydana gelen yeniden katılaşmış katman. (a) $I = 6$ A, $t_{on} = 120$ μ s, $t_{off} = 152$ μ s, $V = 40$ V, ve (b) $I = 12$ A, $t_{on} = 120$ μ s, $t_{off} = 56$ μ s, $V = 60$ V

Talla vd., (2015) bulanık mantık analiz yöntemi yardımıyla, Al/Al₂O₃ kompozitlerin TK/EEİ sırasında optimum performans kriterlerinin elde edilmesi için kullanılması gereken işleme parametrelerini tahmin etmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen parametreler, Al toz konsantrasyonu (C_p) = 4 g/L, maksimum akım (I_p) = 3 A, vurum süresi (T_{on}) = 150 μ s ve görev döngüsü (T_{au}) = 85% olarak belirtilmiştir [122]. Yapılan diğer bir çalışmada [123] toz konsantrasyonu ve maksimum akım değerinin TK/EEİ sırasında İİH ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Al/%10 SiC işparçası olarak kullanılan bu çalışmada, yeterli miktarda (4 g/L) SiC tozu dielektrik sıvısına ilave edilerek, İİH üç kat artıp yüzey pürüzlülük değeri ise %33 azalmıştır. En yüksek İİH değerini elde etmek için kullanılması gereken optimum işleme parametreleri: toz konsantrasyonu 4 g/L, maksimum akım 9 A, vurum süresi 100 μ s ve gerilim farkı 50 V, en düşük yüzey pürüzlülük değeri için ise toz konsantrasyonu 4 g/L, maksimum akım 3 A, vurum süresi 100 μ s ve gerilim farkı 50 V olarak belirtilmiştir. Bakır-Demir-Grafit MMK işparçası olarak kullanılan diğer bir çalışmada, TK/EEİ sırasında dielektrik sıvısına grafit tozu ilave edilerek işleme performansındaki değişim gözlemlenmiştir. Bu işlem sonucu EAH değerinde %94.57 bir iyileşme söz konusu olmuştur [124].

Roy vd., (2016) yaptıkları çalışmada, Al tozunu dielektrik sıvısına ilave ederek işlenebilirlik üzerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. bu çalışmada işparçası malzemesi olarak Al/%10 SiC/%2.5 TiB₂ hibrid metal matrisli kompozit ve takım olarak şekil 2.13 'da şematik olarak gösterilen özel tasarımlı döner takım kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, artan akım ve vurum süresi, İİH, EAH ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmuştur [125].



Şekil 2.13. Kullanılan takımın şematik gösterimi

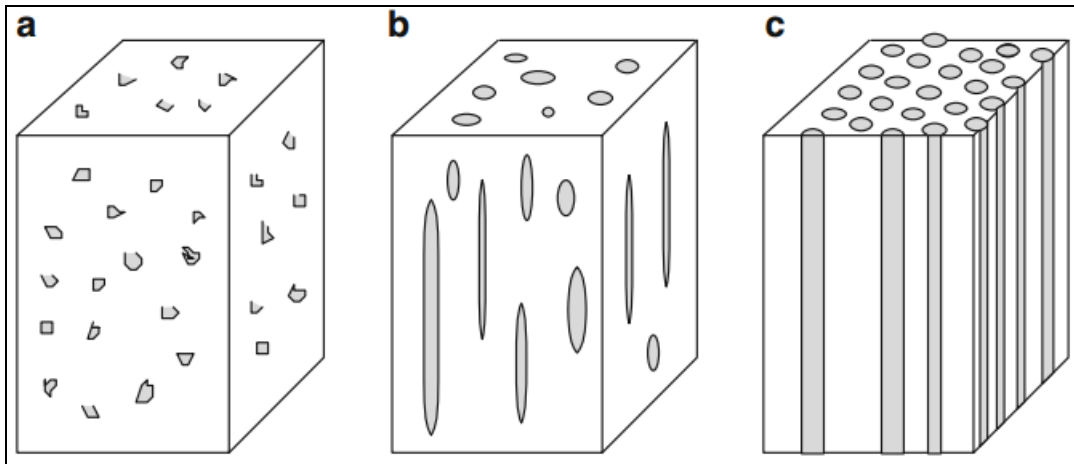
Literatürde infiltrasyon yöntemi kullanılarak metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalarda üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş veya geleneksel imal yöntemleri (tornalama vb.) kullanılarak takım

aşınması ve işleme performansı araştırılmıştır. Ancak yapılan hiçbir çalışmada infiltrasyon yöntemiyle üretilen kompozitler alışılmamış imal usulleri yardımıyla işlenmemiştir. Bu çalışmada literatürde bulunan bu boşluğu doldurmak amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada infiltrasyon yönteminin EEİ yöntemine sağladığı avantajlar, EEİ kullanma sonucu takım aşınmasında meydana gelen iyileşmeler ve işleme performansının incelenmesi hedeflenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit bilimi literatürde, farklı özelliklere ve şekillere sahip malzemelerin birleşmesi sonucu daha üstün özellikli malzemelerin elde edilmesi, olarak tanımlanmıştır. Bu malzemelerin elde edilmesinde kullanılan bileşenler matris ve takviye elemanı olarak adlandırılır. Matris fazı, takviye fazına kıyasla daha sünek, kolay şekillenebilir ve yüksek ısı iletkenlik gibi özgül fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Diğer yandan, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve düşük ısı genleşmeye sahip takviye fazı matris içerisinde gömülü haldedir. Takviye fazı (fazları) genellikle matristen daha sert olduğu için kompozit malzemesine uygulanan yükün büyük kısmını taşır. Matris ise ana faz olarak takviye fazını bir arada tutarak uygulanan yükün takviye fazına iletilmesini sağlar [126].

Kompozitler genel olarak matris malzemesinin türüne veya takviye malzemesinin formuna göre farklı gruplara ayrılırlar. Matris malzemesinin türüne bağlı olarak kompozitler altı farklı grupta sınıflandırılmaktadır; Metal Matrisli Kompozitler (MMK), Polimer Matrisli Kompozitler (PMK), Seramik Matrisli Kompozitler (SMK), Cam Matrisli Kompozitler (CMK), İntermetalik Matrisli Kompozitler (İMK) ve Karbon-Karbon (K-K) Kompozitler [127]. Diğer yandan, Şekil 3.1’te görüldüğü gibi kompozitler takviye elemanının şekline göre 3 farklı gruba ayrılmaktadır: Parçacık takviyeli kompozitler (a), Kesikli fiber takviyeli kompozitler (b), Sürekli fiber takviyeli kompozitler (c).

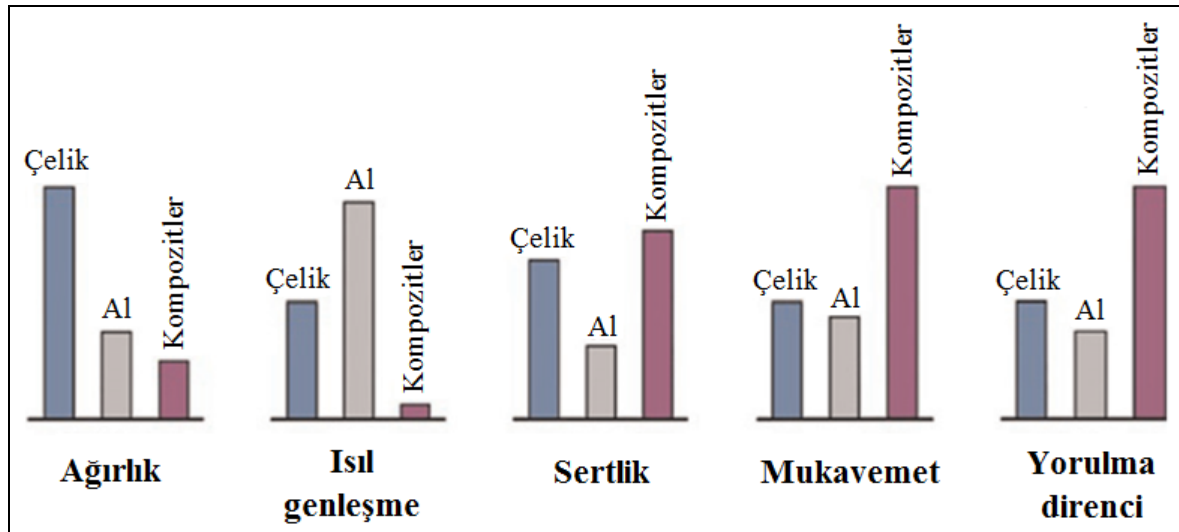


Şekil 3.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit grupları, Parçacık takviyeli kompozitler (a), Kesikli fiber takviyeli kompozitler (b), Sürekli fiber takviyeli kompozitler (c).

Metal matrisli kompozitler endüstride kullanılan en yaygın kompozit malzemelerdir. Bu kompozitlerin polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla en önemli avantajları aşağıda sunulmuştur.

1. Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme kapasitesi
2. Yüksek kırılma tokluğu
3. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği
4. Yüksek işlenebilirlik
5. Düşük ısı genleşme katsayısı
6. Daha iyi radyasyon direnci

Ancak bazı durumlarda metal matrisli kompozitler, metaller ve polimer matrisli kompozitlere kıyasla bazı dezavantajlar ile karşı karşıya gelir. Bunlar; yüksek maliyet, gelişmiş teknolojilere ihtiyaç duyulması ve karmaşık üretim metodları olarak özetlenebilir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, kompozit malzemelerin alaşımlara kıyasla en önemli avantajı, hafif ve aynı zamanda sert özelliklere sahip olabilmesidir [126].



Şekil 3.2. Kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin Al ve çelik alaşımları ile kıyaslanması

Alüminyum ve bakır, metal matrisli kompozitlerde matris olarak en yaygın kullanılan malzemelerdir. Al matrisli, alumina ve karbon fiber takviyeli kompozitler otomobil silindirin kaplamasında [128], Al matrisli SiC visker takviyeli kompozitler takma

motorlardaki pistonlarda [129] ve Al matrisli SiC parçacık takviyeli kompozitler otomobillerin fren disklerinde [32] kullanılmaktadırlar.

3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde birçok metal ve alaşım, matris ve takviye elemanı olarak kullanılabilir. Buna göre, Gereken ihtiyaçlar göze alınarak en uygun üretim yöntemi seçilip istenilen özelliklere sahip kompozitler üretilebilmektedir. Kompozitlerin üretim yöntemleri katı hal, sıvı hal, gaz hal ve in-situ işlemleri olarak dört ana gruba bölünmektedir.

Katı hal üretim işlemlerinde matris elemanının ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta belirli işlemler yapılarak kompozit malzeme üretimi yapılır. Katı hal üretim işlemlerine Toz Metalurjisi (TM), Mekanik Alaşımlama (MA) ve Difüzyonla Birleştirme gibi yöntemler örnek olarak gösterilebilir [2]. Toz Metalurjisi yöntemi yüksek hassasiyete sahip bir yöntem olması nedeniyle, özellikle karmaşık şekilli parçaların ekonomik olarak üretilmesinde cazip bir seçenek haline gelmiştir. Bu yöntemde kullanılan metal tozları büyük oranla atomizasyon, elektroliz, doğrudan indirgeme ve öğütme yöntemleriyle üretilip, toz boyutları genellikle 200 µm 'den küçüktür [25]. TM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri sıvı hal işlemlere kıyasla daha iyidir. TM yönteminin en önemli sorunlarından biri ise, tozların karıştırılması sırasında meydana gelen topaklanmadır. Bu sorunu çözmek için kuru veya ıslak karışıma mekanizmaları kullanılabilir [130].

MA yöntemi, TM yönteminde tozların homojen karışması için kullanılan kuru yöntemle benzer olup, bu yöntemle kıyasla daha yüksek enerjili bilyalı değirmenlere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu yöntemde öğütme işleminin daha uzun süre (20-30 saat) gerçekleştirilmesi gerekmektedir [127]. Difüzyonla birleştirme yöntemi ise metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir diğer katı hal işleme yöntemidir. Pahalı bir yöntem olmasına rağmen genellikle basit şekillerdeki (levha, tüp) ve tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır [131].

Sıvı hal üretim işlemleri, takviye elemanın ergimiş metal matris ile herhangi bir şekilde bağ kurması ve daha sonra katılaşması esasına dayanır. Bu yöntem kullanılarak üretilen kompozitlerin yüksek derecede mekanik özelliklere sahip olması için, sıvı matris ve

takviye elemanı arasında güçlü arayüz bağların (ıslatma) oluşturulması gerekmektedir. Özellikle sıvı metal ve takviye arasındaki temas açısının $\pi/2$ 'den fazla olduğu durumlarda, takviye elemanının sıvı metal içerisinde homojen olarak karışması oldukça zordur. Homojen karışımın elde edilmesi için araştırmacılar tarafından başvurulan iki yöntem vardır; kimyasal ve mekanik yöntemler. Kimyasal yöntemlerde takviye elemanı yüzeyine kaplama yapılarak sıvı metal ve takviye arasındaki ıslatma artırılır. Mekanik yöntemde ise sıvı metal ve takviye arasında ıslatmanın gerçekleşmesi için gereken enerji mekanik yollar ile sağlanır [127].

Sıvı hal üretim yöntemleri, maliyet açısından daha uygun olması ve son şekle yakın parçaların üretilebilmesi gibi sebeplerden dolayı katı hal işleme yöntemlerine kıyasla daha avantajlıdır. Ancak takviye elemanın matris tarafından yeterli derecede ıslatmaya maruz kalmaması ve yüksek sıcaklıklardan dolayı matris ve takviye arayüzeyinde istenmeyen reaksiyonların oluşması bu yöntemin başlıca problemleridir. Sıvı hal üretim işlemlerine İnfiltrasyon yöntemi, Karıştırmalı döküm yöntemi, yarı katı karıştırma yöntemi ve sıkıştırılmalı döküm yöntemi örnek olarak gösterilebilir. Yarı katı karıştırma yönteminde, sıvı matris %40 katı hale gelene kadar soğutulur. Daha sonra elde edilen katı-sıvı karışımı bir karıştırıcı kullanılarak şiddetlice karıştırılır. Karıştırmaya sonucunda dendritik yapı kırılarak daha küresel hale gelir. Bu olay viskozitenin düşmesine ve daha homojen karışımın elde edilmesine yardımcı olur. Karıştırma işlemi devam ederken takviye elemanı ilave edilir. İşlem tamamlandıktan sonra elde edilen karışım yüksek basınç değerleri uygulanarak kalıba enjekte edilir. Al_2O_3 , SiC, TiC ve cam fiber takviyeli, alüminyum ve magnezyum matrisli kompozitler bu yöntemle üretilebilmektedir [127].

Karıştırmalı döküm yönteminde, takviye elemanı sıvı metal içerisine ilave edildikten sonra homojen karışımın sağlanması için bir karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılır. Daha sonra, karışım kalıblara dökülerek soğutulmaya bırakılır. Ekonomik bir yöntem olmasına rağmen üretilen yapılarda gözenek ve boşluk olması bu yöntemin en önemli problemidir [132].

Sıkıştırılmalı döküm yönteminde ise, öncelikle takviye elemanı önceden ısıtılmış kalıp içerisine ($34 \leq T \leq 300^\circ C$) yerleştirilir. Daha sonra, sıvı metalin takviye içerisindeki gözenekleri doldurması için yeterli seviyede basınç ($35 \leq p \leq 106 \text{ N/mm}^2$) uygulanır. Katılaşma işlemi tamamlana kadar ($15 \leq t \leq 45 \text{ s}$) üst kalıp kaldırılmaz [31]. Uygulanan basınç nedeniyle elde edilen kompozitde gözenek ve boşluk oranı önemli derecede azdır.

Bu yöntem kullanılarak büyük parçaları üretebilmek için yüksek basınçlara ve büyük boyutlu makinelere ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulanan basınç, ergime sıcaklığı ve önceden ısıtılmış kalıp sıcaklığı, sıkıştırılmalı döküm yönteminde mekanik ve mikroyapı özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir [25].

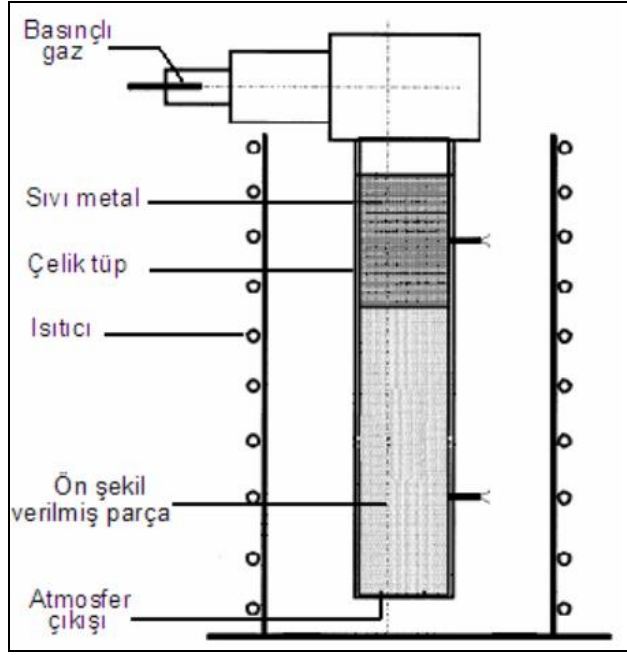
3.2. İnfiltrasyon Yöntemi

İnfiltrasyon (içsüzme) yöntemi, metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan diğer bir sıvı hal işleme yöntemidir. Bu yöntem Basınçlı, Basınçsız ve vakumlu infiltrasyon olarak üç farklı şekilde yapılabilmektedir. İnfiltrasyon sırasında sıvı matris malzemesi basınç, vakum veya atmosfer basıncı yardımıyla önceden şekil verilmiş takviye içerisine infiltre edilir. Matris ve takviye elemanı arasında iyi bir arayüzey bağı oluşturulması için yeterli seviyede basınç uygulanması gerekmektedir. İnfiltrasyon yöntemiyle özellikle alüminyum ve magnezyum matrisli kompozitler başarılı şekilde üretilebilmektedir [25].

3.2.1. Basınçlı infiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon yönteminde, sıvı metal gözenekli yapı içerisine basınçlı gaz yardımıyla infiltre edilir. Şekil 3.3 'de görüldüğü gibi, infiltrasyon işlemini kolaylaştırmak amacıyla kalıbın alt kısmında gaz çıkış kanalı yerleştirilmiştir. Basınçlı gaz kullanmanın verdiği avantaj nedeniyle, işlem çok hızlı gerçekleşip takviye-matris arasında daha iyi ıslatma ve arayüz bağı meydana gelmektedir. Ancak yüksek basınç kullanıldığında zaman zaman fiberlerde deformasyon meydana gelebilmektedir [2].

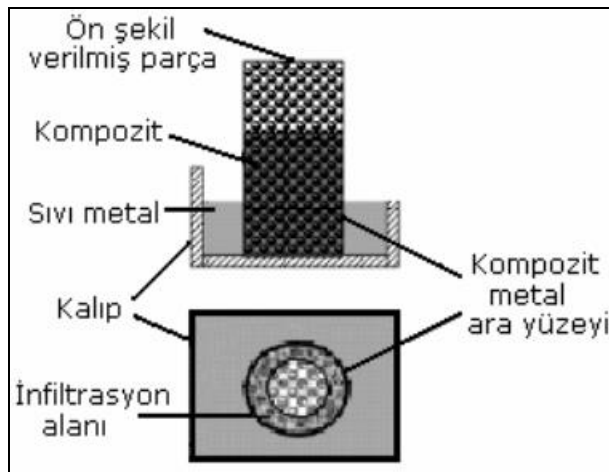
Basınçsız infiltrasyon yöntemi bazı sorunlar ile karşı karşıyadır. Bunlardan birincisi, çok düşük takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerin bu yöntem ile üretilmemesidir. Ayrıca, 50 MPa – 100 MPa gibi yüksek basınçların kullanılması, bu yöntemde kullanılan üretim düzeneğinin oldukça mukavemetli olmasını gerektirmektedir [25].



Şekil 3.3. Basıncılı infiltrasyon yöntemi

3.2.2. Basıncısız infiltrasyon

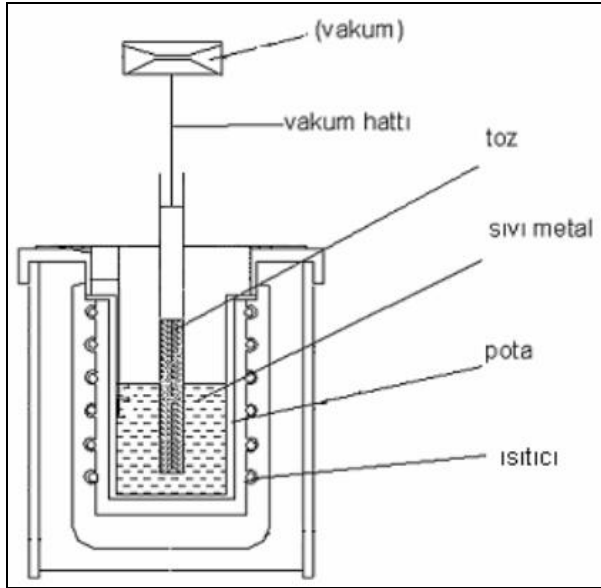
Şekil 3.4’de basıncısız infiltrasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde, sıvı metal takviye elemanı içerisine atmosfer basıncı şartlarında gönderilir [2]. Bu yöntemde basıncılı ve vakumlu infiltrasyon yöntemlerine kıyasla, infiltrasyon süresi daha uzun sürerken üretilen parça daha fazla gözenek içermektedir.



Şekil 3.4. Basıncısız infiltrasyon yöntemi

3.2.3. Vakumlu infiltrasyon

Vakumlu infiltrasyon yönteminde şekil 3.5 'de görüldüğü gibi, sıvı metal gözenek içerisine negatif basınç uygulanarak gönderilir. Bu yöntem yüksek teknolojilere ve pahalı ekipmanlara ihtiyaç duymamaktadır. Vakumlu infiltrasyon yönteminin atmosfere açık bir şekilde gerçekleşmesi, kullanılan Al sıvı matrisin yüzeyinde oksit tabaka oluşmasına sebep olmaktadır. Oluşan oksit tabakası, takviye elemanların sıvı matris tarafından yeterince ıslatılmamasına sebep olur. Bu yöntem özellikle kalıp sıcaklığı, infiltrasyon süresi, uygulanan vakum değeri ve takviye-hacim oranı gibi parametrelerden etkilenmektedir [2].



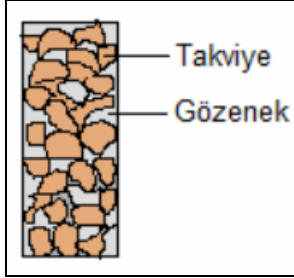
Şekil 3.5. Vakumlu infiltrasyon yöntemi

3.3. İnfiltrasyonu Etkileyen Parametreler

3.3.1. Takviye-hacim oranı (T-H %)

Bir kompozit malzeme içerisindeki takviye elemanının hacimce miktarına “takviye-hacim oranı” adı verilir. Takviye-hacim oranı infiltrasyon yöntemi sırasında kompozit malzemenin sertlik, gözeneklilik ve kırılma dayanımı gibi özelliklerini etkileyen bir parametredir. Özellikle Al matrisli kompozitlerde, artan takviye-hacim oranı sıvı matrisin viskozite değerinin düşmesine ve blok parça içerisine daha zor infiltre olmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.6 'te görüldüğü gibi takviye parçacıkların cam kap içerisinde

yerleştirildikten sonra kapsadıkları hacim, takviye tozların hacmi ve gözenek hacminin toplamına eşittir (Eş.3.1).



Şekil 4.6. Takviye parçacıklarının cam kap içerisine yerleştirildikten sonra kapsadığı hacim

$$V = V_{\text{takviye}} + V_{\text{gözenek}} \quad (3.1)$$

Takviye parçacıklarının kapsadıkları hacim Eş.3.2 'de görüldüğü gibi takviye ağırlığının özgül ağırlığa bölünmesine eşittir:

$$V_{\text{takviye}} = m / d \quad (3.2)$$

Takviye-hacim oranı ise Eş.3.3 'de görüldüğü gibi takviye-haciminin toplam hacime oranına eşittir:

$$\text{T-H oranı} = V_{\text{takviye}} / V_{\text{kompozit}} \quad (3.3)$$

Başka bir deyişle, cam kap içerisinde takviye parçacıklarının gerçek ağırlığının teorik ağırlığa oranı %T-H oranını vermektedir.

Takviye elemanının kompozit içerisindeki oranı ise Eş.3.4 'deki formülasyon ile hesaplanır:

$$W_k = W_f \cdot V_f + W_m \cdot V_m \quad (3.4)$$

Burada;

W_k : kompozitlerin ağırlığı,

W_f : fiber ağırlığı,

V_f : fiber hacmi,

W_m : matris ağırlığı,

V_m : matris hacmi

dir [12].

3.3.2. Takviye tane boyutu

İnfiltrasyon sırasında kompozit malzeme özelliklerini etkileyen bir diğer parametre takviye tane boyutudur. İnfiltrasyon öncesi kullanılacak tozun takviye tane boyutu arttıkça, parçacıklar arası boşlukların da büyümesi nedeniyle sıvı metal bu boşlukların arasına daha kolay infiltre edilebilmektedir. Bu olay işlem hızını ve kalitesini arttırarak daha olumlu sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur.

3.3.3. İnfiltrasyon basıncı

İnfiltrasyon sonucu üretilen kompozit malzeme özelliklerini etkileyen bir diğer parametre uygulanan basınç değeridir. Artan basınç değeri, sıvı matrisin gözenek içerisine infiltre olmasına yardımcı olarak, infiltrasyon işlemini hızlandırır ve üretilen kompozit kalitesini yükseltir. Ancak aşırı yüksek basınçların uygulanması kompozitlerde kırılmaya yol açabilmektedir.

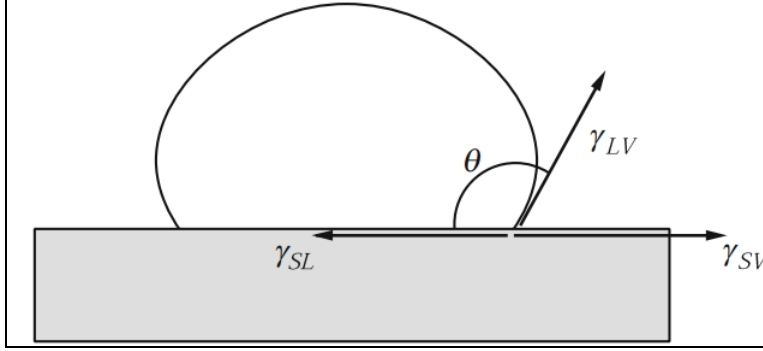
3.3.4. İnfiltrasyon sıcaklığı

İnfiltrasyon yönteminde, üretilen kompozit malzeme özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden bir diğeri ise sıcaklıktır. Artan sıcaklık sıvı matrisin akıcılık özelliklerinin de artmasına sebep olarak, infiltrasyon sırasında blok parça içerisindeki boşluklara daha kolay infiltre olmasını sağlar. Liu vd., (2011), Khademian vd., (2013) ve Yao vd., (2014) artan sıcaklık değerinin infiltrasyon kalitesine pozitif etkide bulunduğu gerçeğini öne sürmüşlerdir [37, 38, 41].

3.3.5. Islatma

İki farklı yüzey arasındaki mesafe yeterince azalıp temasa geçtikleri zaman, bu iki yüzeyin birbiriyle olan uyumluluk derecesini açıklamak için “ ıslatılabilirlik ” terimi kullanılır. Bu terimi nicel olarak açıklamak için ise “ temas açısı ” terimi kullanılır.

Bir sıvı damlası pürüzsüz katı bir yüzey ile temasa geçtiğinde, kendine özel kararlı bir şekil alır. Bu şekil sıvı ve katı arasındaki uyumluluk derecesine göre değişebilmektedir. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, sıvı yüzeyinden geçen teğet çizgi ile katı yüzeyinin oluşturduğu açı, temas açısı (θ) olarak adlandırılır [127].



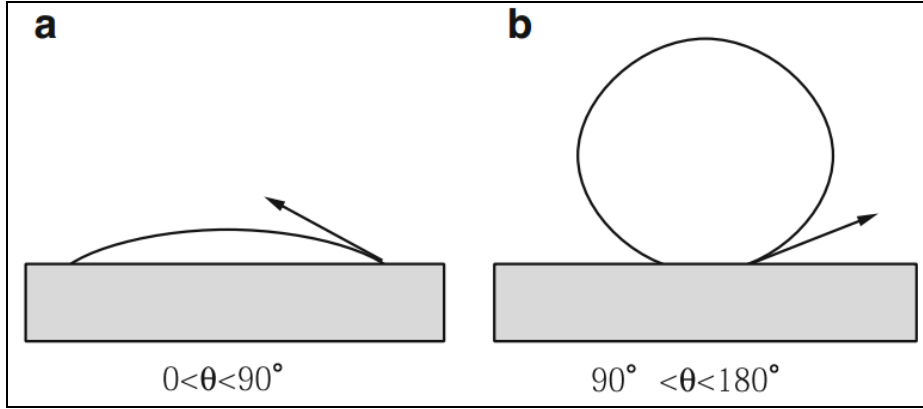
Şekil 3.7. Bir sıvı damlasının katı yüzey ile temas sonucu meydana gelen temas açısı ve yüzey enerjileri

Yüzey enerjileri (γ_{LV} , γ_{SV}) ve arayüzey enerjisi (γ_{SL}), arayüzeyde dengelenerek sabit ve kararlı şekile gelirler. Bu parametreler arasındaki ilişki “Young denklemi” ile ifade edilir:

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos\theta \quad (3.5)$$

Burada; γ_{SL} katı/sıvı arayüzey enerjisi, γ_{SV} sıvı/buhar arayüzey enerjisi ve γ_{LV} sıvı/buhar arayüzey enerjisidir.

Şekil 3.8 ‘de temas sonucu meydana gelen farklı damla şekilleri gösterilmiştir. Temas açısı $0^\circ < \theta < 90^\circ$ aralığında olduğu durumlarda, ıslatmanın çok iyi seviyede meydana geldiği, ancak $90^\circ < \theta < 180^\circ$ aralıklarında istenilen seviyede olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.8. Sıvı damlasının şekli ve temas açısı

3.3.6. İnfiltrasyon süresi

İnfiltrasyon işleminin tamamen gerçekleşmesi ve üretilen kompozit malzemelerin istenilen özelliklere sahip olması için, sıvı matrisin ve gözenekli takviye elemanının yeterli süre boyunca (kuluçka süresi) sıcaklığa maruz kalmaları gerekmektedir. İnfiltrasyon yönteminin diğer parametreleri (basınç veya vakum değeri, sıcaklık değeri, sıvı matrisin ıslatılabilirlik özelliği, T-H oranı ve takviye tane boyutu) işlem sonuçlarını etkileme açısından infiltrasyon süresine kıyasla daha fazla önem taşımaktadırlar.

4. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ) TEKNOLOJİSİ

Günümüzde otomotiv, havacılık, kesici takımlar, kalıplar, mekatronik, nükleer, biyomedikal ve bilgisayar gibi modern imalat sanayilerinde hatasız ve yüksek kaliteli ürünlere ve bu ürünlerin iyileştirilmiş özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Süper alaşımlar, seramikler, kompozitler, polimerler ve nano malzemeler gibi işlenmesi zor malzemeler söz konusu ihtiyaçları karşılamak amacıyla hızlı bir şekilde gelişmektedirler. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sertlik, yüksek kırılgenlik, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci ve kimyasal hareketsizlik gibi olağanüstü özelliklere sahiptirler. Ancak bu malzemelerin geleneksel malzeme kaldırma yöntemleri ile işlenmesi, çok fazla işleme maliyetinin ortaya çıkmasına ve malzeme özelliklerinde de büyük bir kaybın meydana gelmesine neden olmuştur. Tüm bu sorunları çözmek için, 2. Dünya Savaşından sonra ihtiyaçlara karşılık verebilen modern malzeme kaldırma yöntemleri geliştirilmiştir.

Alışılmamış imalat yöntemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla avantajları; yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi, çok düşük (bazı durumlarda sıfır) takım aşınması, genellikle kararlı ve sakin işleme ve uzun takım ömrü olarak özetlenebilmektedir. Bu yöntemlerde malzeme kaldırma işleminin gerçekleştirilmesi için farklı tipdeki enerjiler, ortamlar ve takımlar kullanılmaktadır. Çizelge 4.1’de Alışılmamış imalat yöntemlerin farklı parametrelere göre sınıflandırılması verilmiştir [133].

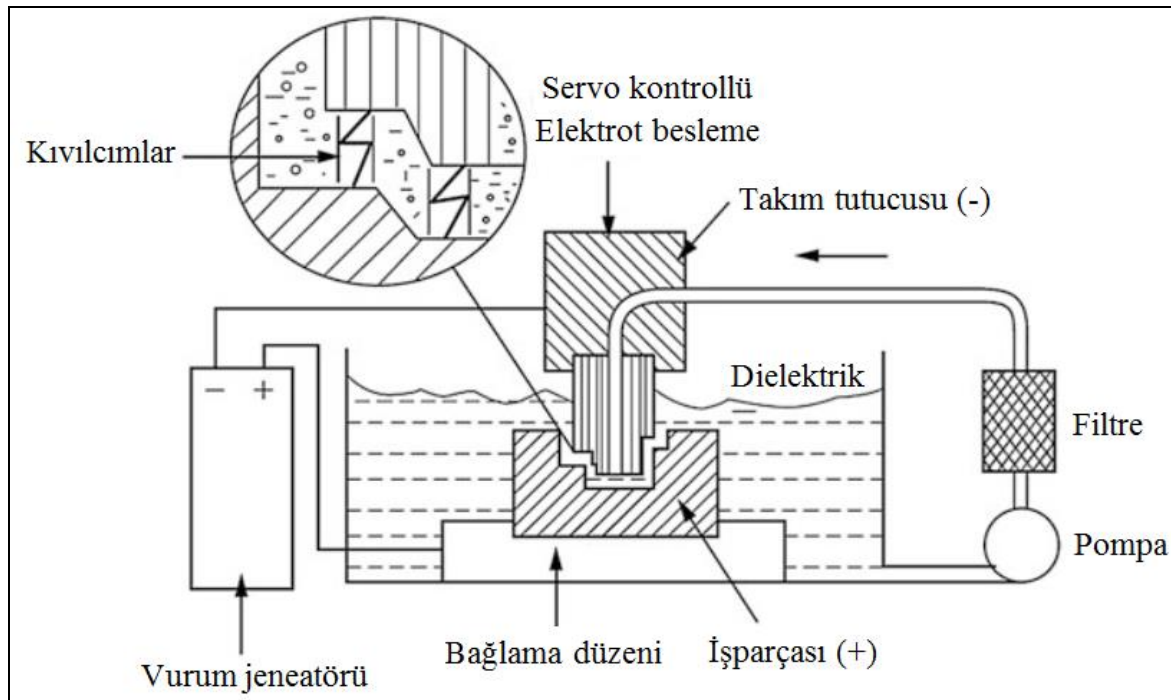
Çizelge 4.1. Alışılmamış malzeme kaldırma yöntemlerin sınıflandırılması

Enerji tipi	Yöntem	Enerji kaynağı	Takım	Dielektrik	Malzeme kaldırma mekanizması
Mekanik	USM	Ultrasonik titreşme	Sonotrot	Aşındırıcı çamur	Erozyon veya aşınma
	AJM	Basınçlı hava	Aşındırıcı jet	Hava	
	WJM	Basınçlı sıvı	Su jeti	Hava	
	AWJM	Basınçlı sıvı	Aşındırıcı su jeti	Hava	
	IJM	Basınçlı sıvı	Buz jeti	Hava	
Kimyasal	CHM	Aşındırıcı katkı madde	mask	Dağlayıcı	Kimyasal çözünme
Elektro kimyasal	ECM	Yüksek akım	Elektrot	Elektrolit	İyonik yerdeğişim vasıtasıyla gerçekleşen anotsal çözünme
Isıl	EDM	Yüksek voltaj	Elektrot	Dielektrik	Ergime ve buharlaşma
	EBM	İyonlaşmış malzeme	Elektron ışını	Vakum	
	IBM	İyonlaşmış malzeme	İyon ışını	Atmosfer	
	LBM	Güçlendirilmiş ışık	Lazer ışını	Hava	
	PAM	İyonlaşmış malzeme	Plazma jeti	Plazma	

4.1. Elektro Erozyonun Tanımı

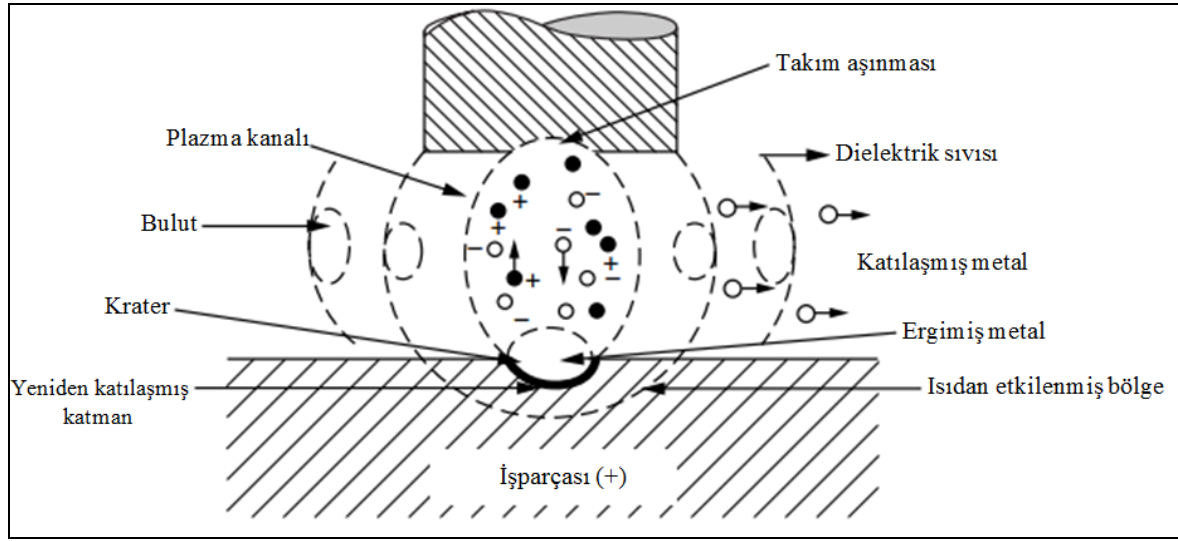
EEİ yöntemi alışılmamış malzeme kaldırma yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Malzeme sertliğinin hiç bir önemi olmaksızın, ısıl enerji kullanılarak malzeme kaldırma işleminin gerçekleşmesi, bu yöntemin diğer yöntemler ile ayırt edici özelliğidir. EEİ yönteminde elektrot ile işparçası arasında doğrudan temas olmadığı için, mekanik gerilmeler ve titreşmeden dolayı meydana gelebilecek sorunlar da en aza indirilmiş durumdadır.

2. Dünya Savaşı sırasında B.R ve N.I Lazarenko aşınma davranışının elektrik temaslarında minimize edilmesi üzerinde bir takım çalışmalar yapmışlardır. Bu düşünce, EEİ yönteminin geliştirilmesi amacıyla atılan ilk adım olmuştur. Bu tarihten itibaren, EEİ yöntemi hızla gelişerek mikro işleme ve prototipleme gibi alanlarda olmazsa olmaz bir yöntem haline gelmiştir [134]. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yönteminin çalışma prensibi termoelektrik aşınmaya dayanır. Bu yöntemde elektriksel enerji ısıl enerjiye dönüşerek, anot (işparçası) ve katot (takım) arasında elektrik boşalımının oluşmasına ve malzeme kaldırma işleminin gerçekleşmesine sebep olur. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bu yöntemde takım ve işparçası dielektrik sıvısı içerisinde daldırılmış durumdadır.



Şekil 4.1. EEİ yönteminin şematik gösterimi

İşleme sırasında takım ile işparçası arasında fiziksel temasın olmaması, EEİ yöntemini diğer malzeme kaldırma yöntemleri ile farklı yapan özelliktir. Bu özellik sayesinde, EEİ yönteminde takım üzerinde herhangi bir kuvvet uygulanmamaktadır. Genel olarak, EEİ yönteminin gerçekleşmesi için takım ve işparçası arasında (20-120V) gerilim farkı ve (15-150 μm) boşalım boşluğu sağlanır. Uygulanan gerilim, boşalmanın gerçekleşmesi için gerekli olan gerilim değerine ulaştığında, takım elektrot etrafındaki elektronlar anot tarafına hareket etmeye başlarlar. Bu hareket sonucunda, elektronlar nötr dielektrik moleküllerine çarparak onları negatif veya pozitif iyon haline getirirler. Bu işlem devam ederek plazma kanalı oluşur. Bu kanalın elektriksel direncinin düşük olması, yüksek miktarda elektronun katotdan kopup anota doğru hareket etmesine sebep olur. Elektrotlar ve iyonların çarpma sebebiyle yüksek ısılar ve plazma kanalı etrafında gaz bulutu oluşmaya başlar. Oluşan gaz bulutu plazma kanalının gelişmesini sınırlar. Şekil 4.2’de plazma kanalının oluşumu şematik olarak gösterilmiştir [135].

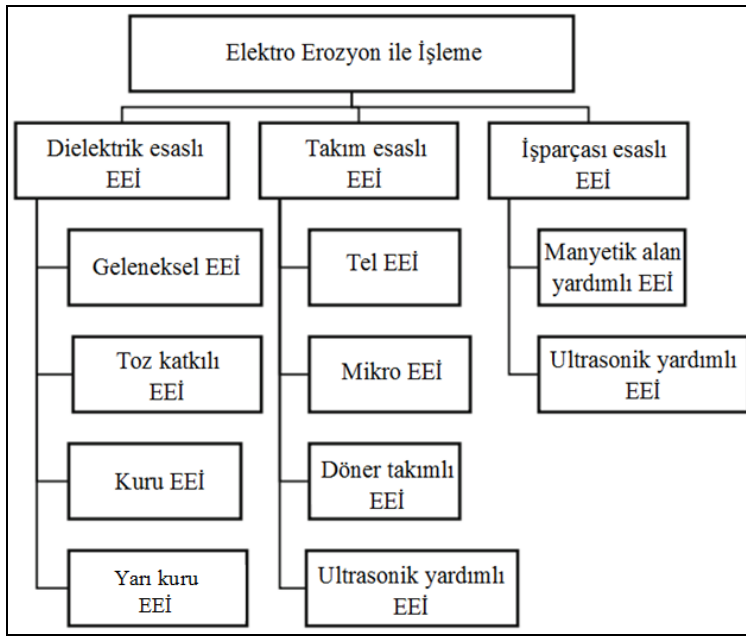


Şekil 4.2. EEİ yönteminin malzeme kaldırma mekanizmasının şematik gösterimi

EEİ yönteminde, aşırı yüksek sıcaklıklar (8000-12000 $^{\circ}\text{C}$) elektrot malzemesinin ergimesine ve buharlaşmasına sebep olur. İşleme sırasında anot’dan ayrılan malzeme miktarı katot’dan daha fazladır. Bunun nedeni, anot ile çarpışan negatif iyonların katot ile çarpışan pozitif iyonlardan sayıca daha fazla olmasıdır. Bekleme süresi sırasında, elektrotlara uygulanan gerilim farkının geri alınması plazma kanalını ortadan kaldırır. Bu olay, gaz bulutlarının ani olarak bozulmasına ve şok dalgalar üretmesine yol açar. Şok dalgalar ergimiş malzemenin işleme bölgesinden uzaklaşmasına ve işparçası üzerinde belirli kraterlerin oluşmasına sebep olur.

4.2. EEİ Yönteminin Sınıflandırılması

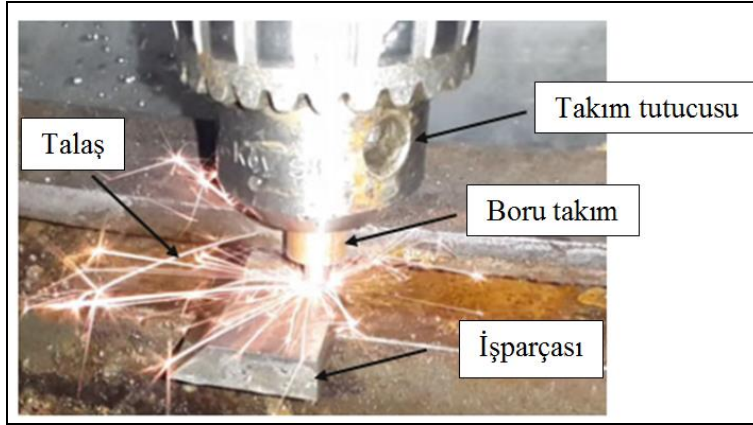
EEİ yöntemi üstün özelliklerinden dolayı bir çok bilimsel çalışmada tercih edilmesine rağmen, özellikle düşük İİH, yüksek EAH, yüksek yüzey pürüzlülük oranı ve çevre kirliliği gibi sorunlardan dolayı uygulama alanında önemli kısıtlamalar ile karşı karşıyadır. Söz konusu sorunları ortadan kaldırmak için son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar dielektrik, takım ve işparçası temelli olarak üç farklı grupta yapılarak farklı EEİ tiplerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Şekil 4.3) [135].



Şekil 4.3. EEİ yönteminin işleme tipleri

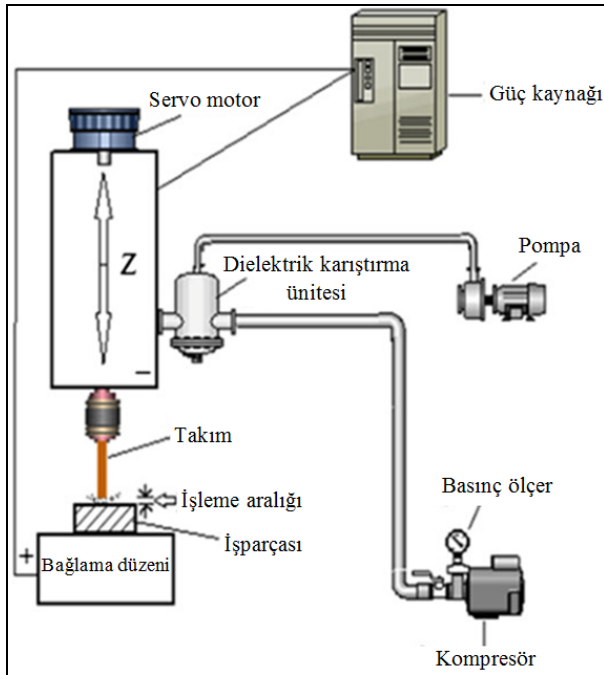
4.2.1. Kuru ve yarı kuru EEİ

Geleneksel ve toz katkılı EEİ yöntemleri doğa dostu olmayan, kirliliğe sebep olan malzeme kaldırma yöntemleridir. Bu sorunu ortadan kaldırabilmek için, kuru ve yarı kuru EEİ yöntemleri araştırmalar sonucunda geliştirilmiştir. Bu yöntemler kullanılan dielektrik tipine göre iki farklı gruba ayrılmışlardır. Şekil 4.4 'de görüldüğü gibi, kuru EEİ yönteminde dielektrik fazı olarak yüksek hızlardaki oksijen, nitrojen, argon, helyum veya sıkıştırılmış hava kullanılmaktadır. Söz konusu gazlar, normal EEİ yönteminde kullanılan dielektrik sıvı görevlerini yerine getirerek malzeme kaldırma işleminin gerçekleşmesine imkan sağlarlar [135].



Şekil 4.4. Kuru EEİ yöntemi

Yarı kuru EEİ yönteminde ise, sıvı ile hava veya Nitrojen, Helyum, Argon vb. gazların karışımı dielektrik olarak kullanılır. İki fazlı dielektrik kullanılması, kuru EEİ kıyasla daha kararlı işlemenin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Normal EEİ yönteminde kullanılan dielektrik sıvısına göre daha ekonomik olan bu gazlar, işleme sırasında sirkülasyon ve temizlemeye ihtiyaç duymazlar. Ayrıca, işleme sırasında patlama veya alevlenme gibi riskleri ortadan kaldırarak, çevre kirliliği konusunda da üstün özelliklere sahiptirler. Şekil 4.5 'de yarı kuru EEİ yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [136].



Şekil 4.5. Yarı kuru EEİ yöntemi

4.2.2. Mikro EEİ

Mikro EEİ genellikle yüksek hassasiyete ihtiyaç duyulan mikro boyutlardaki üç boyutlu şekillerin elde edilmesi için kullanılır. Geleneksel EEİ ile aynı çalışma mantığına sahip olmasına rağmen, mikro ölçekte gerçekleştiği için aralarında önemli farklar bulunmaktadır. Çizelge 4.2 ‘da geleneksel EEİ ve mikro EEİ arasındaki en önemli farklar gösterilmektedir [137].

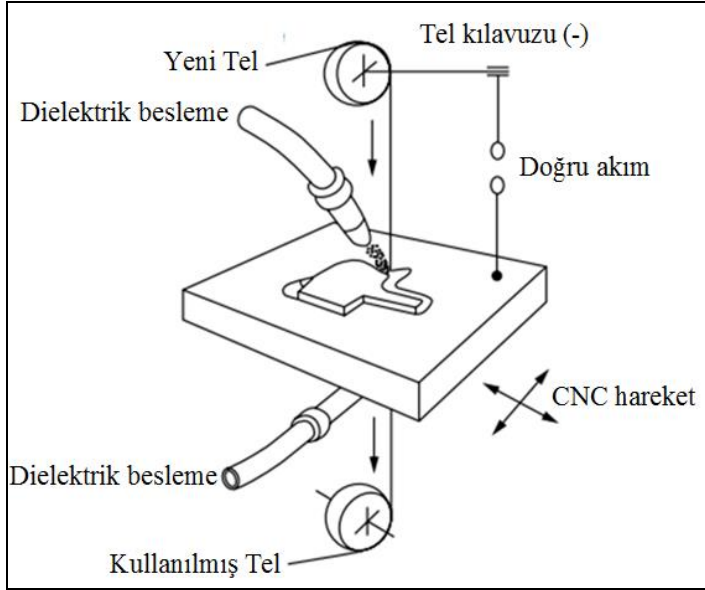
Çizelge 4.2. Geleneksel EEİ ve Mikro EEİ arasındaki farklar

Parametreler	Geleneksel EEİ	Mikro EEİ
Takım boyutu	999 μm ‘den büyük	999 μm ‘den küçük
Elektrotlar arası boşluk	10 - 500 μm	10 μm ‘den daha az
Açık devre gerilimi	4 – 400 V	10 – 120 V
Maksimum akım	3 A ‘den büyük	3 A ‘den küçük
Özgül enerji	Yüksek	Düşük

Mikro EEİ takım tipi ve kinematiğine bağlı olarak dört farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar Mikro Tel EEİ, Mikro Dalma EEİ, Mikro Frezeleme EEİ ve Mikro delme EEİ olarak adlandırılmaktadır.

4.2.3. Tel EEİ

Tel EEİ yüksek sertlikteki iletken malzemelerin işlenmesinde kullanılan elektrotermal bir işleme yöntemidir. EEİ yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de malzeme kaldırma işlemi, işparçası ve tel elektrot arasında meydana gelen boşalım sonucu gerçekleşir. Bu boşalım tel elektrot yüzeyinden çok küçük parçaların ayrılmasına neden olur. Bu nedenle, malzeme kaldırma işlemi bittikten sonra aynı takım cihaz tarafından başka parçanın işlenmesi için kullanılmaz ve otomatik olarak bir sonraki takıma geçer. Bu yöntemde tel elektrot malzemesi olarak 0,05 – 0,30 mm çaplarındaki bakır, pirinç veya tungsten kullanılır. Şekil 4.6 ‘de Tel EEİ yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [6].



Şekil 4.6. Tel EEİ yönteminin şematik gösterimi

Tel EEİ yönteminde kullanılan güç kaynağı, yaklaşık olarak 1 MHz vurum frekansı sağlayarak geleneksel EEİ yöntemine göre daha küçük kraterlerin ve daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesine yol açar. Ancak takım boyutunun çok küçük olması, 20A ‘den yüksek akımların uygulanamamasına sebep olur. Bu yöntemde en çok tercih edilen dielektrik sıvısı ulaşılabilirlik, uygun ısı özellikler, düşük viskozite ve kirliliğe yol açmayan özelliklerden dolayı su ‘dur.

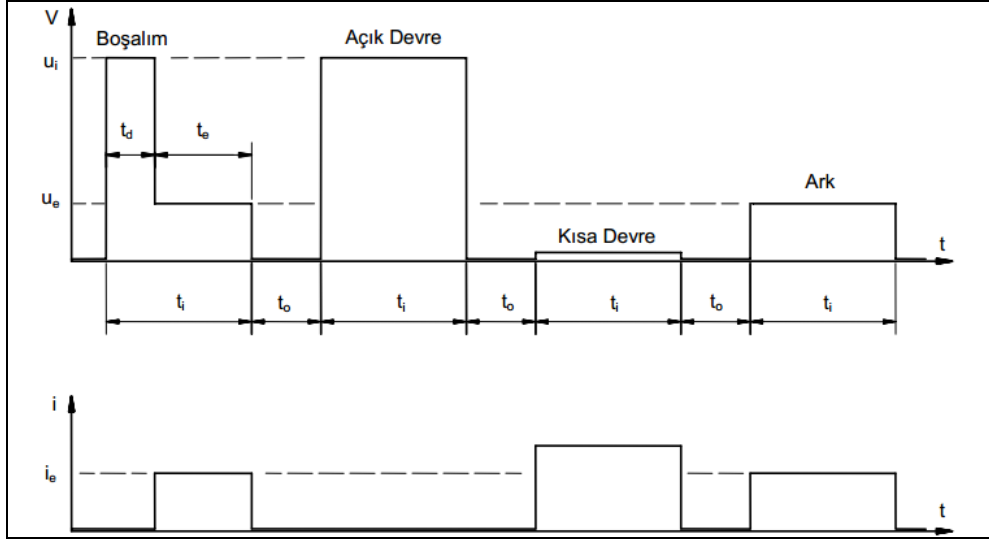
4.3. EEİ Yöntemini Etkileyen Parametreler

EEİ yönteminde performans kriterleri, farklı işleme parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, işleme parametrelerin en doğru şekilde seçilmesi daha iyi sonuçların elde edilmesine yardımcı olur. EEİ yönteminin etkileyen parametreler aşağıda sunulmuştur:

- (a) Elektriksel işleme parametreleri
- (b) Kutuplama (polarite)
- (c) Takım malzemesi özellikleri
- (d) İşparçası malzeme özellikleri
- (e) Dielektrik sıvı özellikleri

4.3.1. Elektriksel işleme parametreleri

İşleme mesafesindeki elektriksel boşalım işleminin tipik gerilim ve akım değişimleri $u(t)$ ve $i(t)$ tarafından karakterize edilir. Şekil 4.7’de gerilim kontrollü bir vurum jeneretörünün tipik gerilim ve akım değişimleri gösterilmiştir [138].



Şekil 4.7. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri

EEİ yönteminin elektriksel parametreleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Boşalım (vurum) süresi (t_e): işleme aralığı boyunca akım boşalmasının sürdüğü süredir.

Gecikme süresi (t_d): boşalım gerçekleşmeden önce dielektrik sıvısının iyonlaşması için gerekli olan süredir.

Vurum süresi (t_i): işleme aralığında gerilimin uygulandığı an ile boşalımın bittiği anın arasındaki geçen süredir.

$$t_i = t_e + t_d \quad (4.1)$$

Bekleme süresi (t_o): iki boşalım arasında vurum jeneratörü tarafından bırakılan süredir.

Vurum çevrim süresi (t_p): vurum süresi ve bekleme süresinin toplamıdır.

$$t_p = t_i + t_o \quad (4.2)$$

Vurum frekansı (f_p): birim zamanda (sn) jeneratör tarafından elektrotlar arasında uygulanan vurumların sayısıdır.

Açık devre gerilimi (u_i): boşalımın olmadığı anda işleme aralığında meydana gelen gerilimdir.

Boşalım gerilimi (u_e): boşalımın devam ettiği sürece ölçülen gerilimdir.

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

Ortalama çalışma gerilimi (U): işleme süresince boşalım aralığında ölçülen gerilimin aritmetik ortalamasıdır.

Ortalama çalışma akımı (I): işleme süresince işleme aralığından geçen akımın aritmetik ortalamasıdır.

Boşalım gücü (P_e): bir boşalım süresi boyunca uygulanan güçtür.

$$P_e = u_e(t) \cdot i_e(t) \quad (4.3)$$

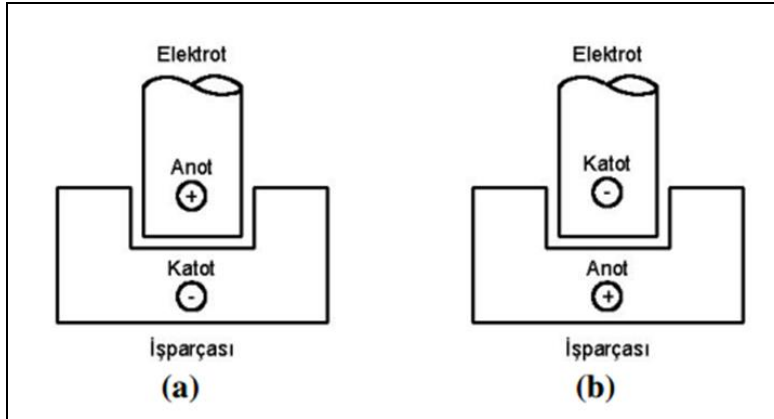
Vurum enerjisi (W_e): boşalım süresi boyunca işleme aralığına uygulanan enerjidir.

$$W_e = \int_{\tau} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e \quad (4.4)$$

4.3.2. Kutuplama (polarite)

Kutuplama, boşalımın akış yönünü, işleme hızını ve aşınma oranını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu parametre, elektrot takım malzemesine, işparçası malzemesine ve uygulama yöntemine bağlı olarak ince ve kaba işlemlerde değişiklik göstermektedir. Şekil 4.8 'te görüldüğü gibi, EEİ sırasında elektrot takım pozitif (+) veya negatif (-) kutupa

bağlanabilmektedir. Çizelge 4.3 'te ise farklı elektrot takım malzemeleri ile kaba veya ince işleme için kutuplama dağılımı görülmektedir [126].



Şekil 4.8. Farklı elektrot kutuplamaları (a) Pozitif kutuplama (b) Negatif kutuplama

Çizelge 4.3. Farklı malzemelere göre kutuplama dağılımı

İşparçası	Kaba İşleme	İnce İşleme
Takım çeliği	+	+/-
Paslanmaz çelik	+	+/-
Alüminyum	+/-	+/-
Titanyum	-	-
Karbür	-	-
Bakır	-	-

4.3.3. Takım malzemesi

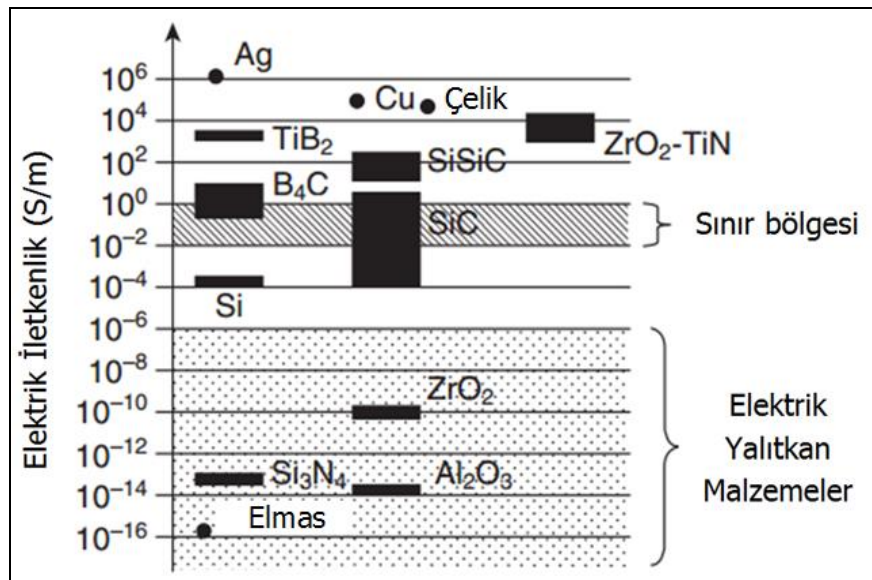
EEİ yönteminde kullanılan takım malzemesi, istenilen özellikteki parçaların elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır. EEİ bir ısıtma işlemi olduğu için kullanılan takım malzemesinin termal özellikleri büyük önem taşımaktadır. Genel olarak EEİ yönteminde kullanılacak takım malzemesini belirlemek için göz önüne alınması gereken özellikler; (i) işlenebilirlik, (ii) elektriksel ve ısı iletkenlik, (iii) yoğunluk, (iv) sertlik ve tokluk, (v) maliyet ve elde edilebilirlik, (vi) İİH ve EAH vb. kriterler olarak özetlenebilir. EEİ yönteminde takım olarak kullanılabilen farklı malzemelerin teknik ve ekonomik özellikleri çizelge 4.4'te verilmiştir [139].

Çizelge 4.4. Takım elektrot özellikleri

	Malzeme	EAH	İİH	Üretim	Maliyet	Uygulama alanı
1	Bakır	Düşük	Yüksek (kaba işlemede)	Kolay	Yüksek	Bütün metaller üzerinde
2	Pirinç	Yüksek	Yüksek (Bitirme)	Kolay	Düşük	Bütün metaller üzerinde
3	Tungsten	En düşük	Düşük	Zor	Yüksek	Küçük deliklerin işlenmesinde
4	Tungsten- Bakır	Düşük	Düşük	Zor	Yüksek	Yüksek hassasiyetli işlemlerde
5	Dökme demir	Düşük	Düşük	Kolay	Düşük	Bazı malzemelerin işlenmesinde
6	Çelik	Yüksek	Düşük	Kolay	Düşük	İnce işlemlerde
7	Çinko alaşımlar	Yüksek	Yüksek (kaba işlemede)	Kolay	Yüksek	Bütün metaller üzerinde
8	Bakır grafit	Düşük	Yüksek	Zor	Yüksek	Bütün metaller üzerinde

4.3.4. İşparçası malzemesi

EEİ yöntemi sadece elektrik iletken malzemelerin işlenmesinde uygulanabilmektedir. Bu yöntem kullanılarak daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için, ısıl iletkenlik, özgül ısı ve ergime sıcaklığı gibi malzemenin ısıl özelliklerine dikkat edilmelidir. EEİ yöntemi kullanılarak bir malzemeyi başarılı bir şekilde işleyebilmek için, malzemenin elektriksel direncinin yeterince düşük olması gerekmektedir ($<100 \Omega\text{cm}$). Şekil 4.9 'da farklı malzemelerin elektrik iletkenlik değerleri gösterilmektedir. Çelik ve Bakır gibi metaller iyi işlenilebilirlik özelliğine sahipken, ZrO_2 ve Al_2O_3 gibi yalıtkan seramiklerin işlenilmesi neredeyse imkansızdır. TiB_2 gibi diğer seramikler yeterli iletkenliğe sahip olmakla birlikte, B_4C ve SiC gibi malzemeler sınır bölgesinde yer almaktadırlar [140].



Şekil 4.9. Farklı malzemelerin Elektriksel İletkenlik değerleri

4.3.5. Dielektrik sıvı

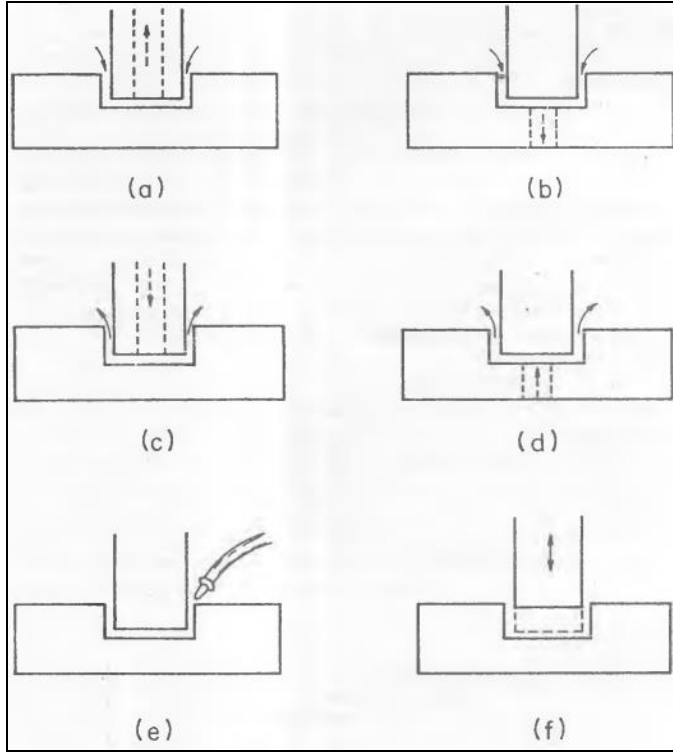
Dielektrik sıvısının viskozitesi, kimyasal bileşenleri ve soğutma kabiliyeti gibi özellikleri, EEİ yöntemiyle elde edilen parçaların geometrik doğruluklarını ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Buna göre, kararlı boşalımların başarılı bir şekilde meydana gelmesi için, kullanılan dielektrik sıvısının yüksek dayanım ve parlama noktası sıcaklığına sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, düşük viskozite ve özgül ağırlık değerleri dielektrik sıvısında olması gereken diğer özelliklerdir. Bu özellikler işleme kalitesini arttırarak İİH ve EAH gibi değerlerin iyileştirilmesinde ve daha pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesinde önemli derecede etkisi bulunmaktadır.

Dielektrik sıvıları EEİ sırasında önemli amaçlar için kullanılır. Bunlar:

1. Eektrot ve iş parçası arasında boşalım oluşması için gerekli boşluğu korumak;
2. İş parçasından ayrılan malzemeyi soğutarak tekrardan katı hale getirmek;
3. Ayrılan malzemeleri boşalım boşluğundan uzaklaştırmak;

olarak özetlenebilmektedir.

Dielektrik sıvısı uygulamalarında, iş parçası ve takım arasında iyi derecede bir dielektrik akışının sağlanması gerekmektedir. Aksi takdirde, aşınmış parçacıklar işleme aralığında kalarak işleme kararlılığını ve performansını etkileyip istenmeyen sonuçların elde edilmesine sebep olurlar. Şekil 4.10 'de çeşitli dielektrik uygulama yöntemleri gösterilmiştir [141].



Şekil 4.10. Dielektrik sıvısı uygulama yöntemleri a) Elektrot içinden emme b) işparçası içinden emme c) elektrot içinden püskürtme d) işparçası içinden püskürtme e) yanal püskürtme f) titreşimli

4.4. EEİ Yönteminde Performans Kriterleri

İşparçası İşleme Hızı : birim zamanında işparçasından ayrılan malzeme miktarına İşparçası İşleme Hızı (İİH) adı verilir. İşleme sonrası işparçasından hacimce ayrılan malzeme veya işparçasının işlemeden önce ve sonra meydana gelen ağırlık kaybı olarak açıklanabilir. Aşağıdaki formülasyonla ifade edilir:

$$\text{İşparçası işleme hızı [mm}^3\text{/dak]} = \text{İİH} = \frac{\text{İşparçası toplam aşınma hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dak]}} \quad (4.5)$$

Yüksek İİH, verimliliğin artmasına sebep olur. Bu nedenle birçok çalışmada tercih edilmektedir. Yüksek boşalım gerilimi, yüksek maksimum akım, yüksek vurum süresi ve yüksek boşalım süresinin toplam süreye oranı (duty cycle) yüksek İİH elde edilmesine sebep olur.

Elektrot Aşınma Hızı: işleme sırasında birim zamanda takımdan ayrılan malzeme miktarına Elektrot Aşınma Hızı (EAH) adı verilir. Yüksek EAH, takımın geometrisini değiştirdiği ve

işlenecek yüzey kalitesini düşürdüğü için istenmeyen bir özelliktir. EAH, elektrot hacimce ayrılan malzeme miktarı veya elektrodun işlemeye başlamadan önce ve sonraki ağırlık kaybı olarak tanımlanır. Aşağıdaki formülasyonla ifade edilir:

$$\text{Elektrot Aşınma Hızı [mm}^3\text{/dak]} = \text{EAH} = \frac{\text{Elektrot toplam aşınma hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dak]}} \quad (4.6)$$

İşparçası Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a): EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeyin pürüzlülük oranı, büyük ölçüde boşalımlardan dolayı meydana gelen krater boyutuna (çap ve derinlik) bağlıdır. Ayrıca, boşalım boşluğundaki dielektrik dolaşımı yeterli değilse, takım ve işparçasından ayrılan ergimiş malzeme tekrardan katılaşarak yüzeye yapışarak yüzeyin pürüzlü olmasına sebep olur. Krater boyutu ise büyük oranda boşalım gücü, maksimum akım, vurum frekansı ve vurum süresi gibi özelliklere bağlı olarak değişir. Ayrıca, kullanılan takım ve işparçası malzemesinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır.

Bağıl Aşınma: Elektrot Aşınma Hızının İşparçası İşleme Hızına olan oranıdır. Aşağıdaki formülasyonla ifade edilir:

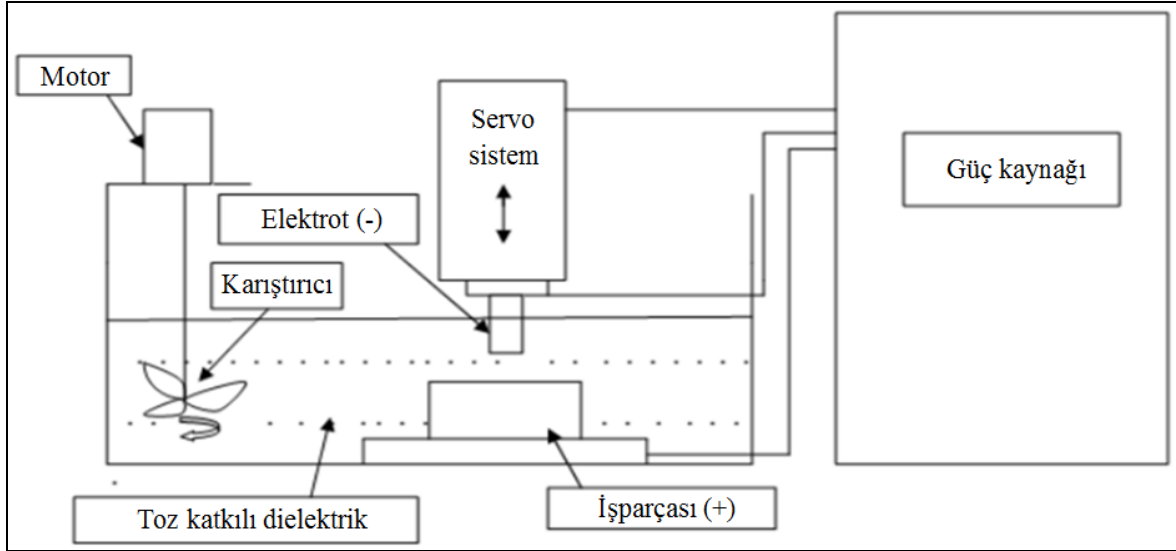
$$\text{Bağıl Aşınma [\%]} = \text{BA} = \frac{\text{Elektrot aşınma hızı [EAH]}}{\text{İşparçası işleme hızı [İİH]}} \times 100 \quad (4.7)$$

4.5. Toz Karışımı Elektro Erozyonla İşleme (TK/EEİ) Yönteminin Esasları

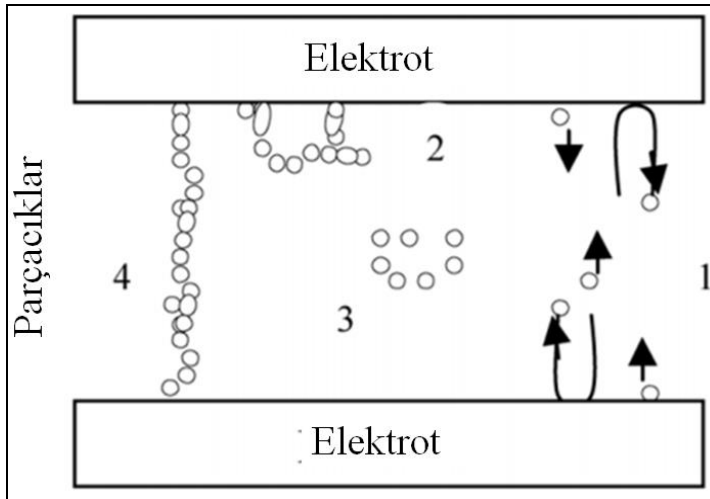
EEİ sırasında ulaşılan aşırı yüksek sıcaklıklar ve onun arkasından meydana gelen anlık soğutma, ergimiş malzemenin işlenmiş yüzey üzerinde tekrardan katılaşmasına neden olur. İşlenmiş yüzey üzerinde katılaşma sonucu meydana gelen katmanda hızlı soğuma nedeniyle mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Bu olay EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeyin yorulma direnci, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi özelliklerinin düşmesine neden olur. Bu sebep ile yüzey özelliklerini eski haline getirebilmek için ikincil işlemlere ihtiyaç duyulur. Bu konuda yapılan en yeni geliştirmelerden biri, EEİ sırasında iletken toz parçacıklarının dielektrik sıvısına karıştırılmasıdır.

TK/EEİ yönteminin işleme mekanizması geleneksel EEİ yönteminden farklıdır. Bu yöntemde dielektrik sıvısına farklı tozlar ilave edilip homojen karışım elde etmek için karıştırma sistemi kullanılır (Şekil 4.11) [142]. Elektrik iletken özelliklere sahip bu parçacıklar, yalıtkan dielektrik sıvısının bozunma direncini şiddetli şekilde düşürür. Toz

parçacıkları işleme boşluğunda dört farklı şekilde davranırlar : (1) ileri-geri hareket ederek, (2) elektrotlara yapışarak, (3) işleme boşluğunda salkım şeklinde toplanarak, (4) zincir oluşturup elektrotları birbirine bağlayarak (şekil 4.12) [143].

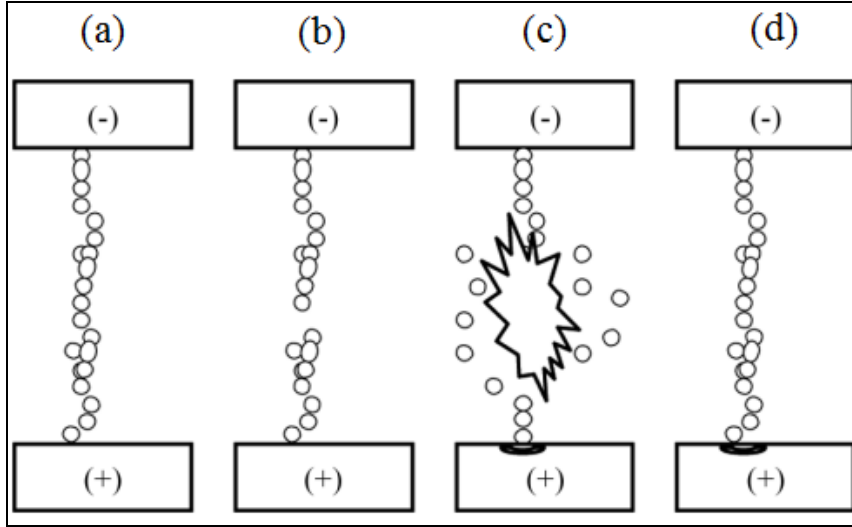


Şekil 4.11. TK/EEİ yönteminin şematik gösterimi

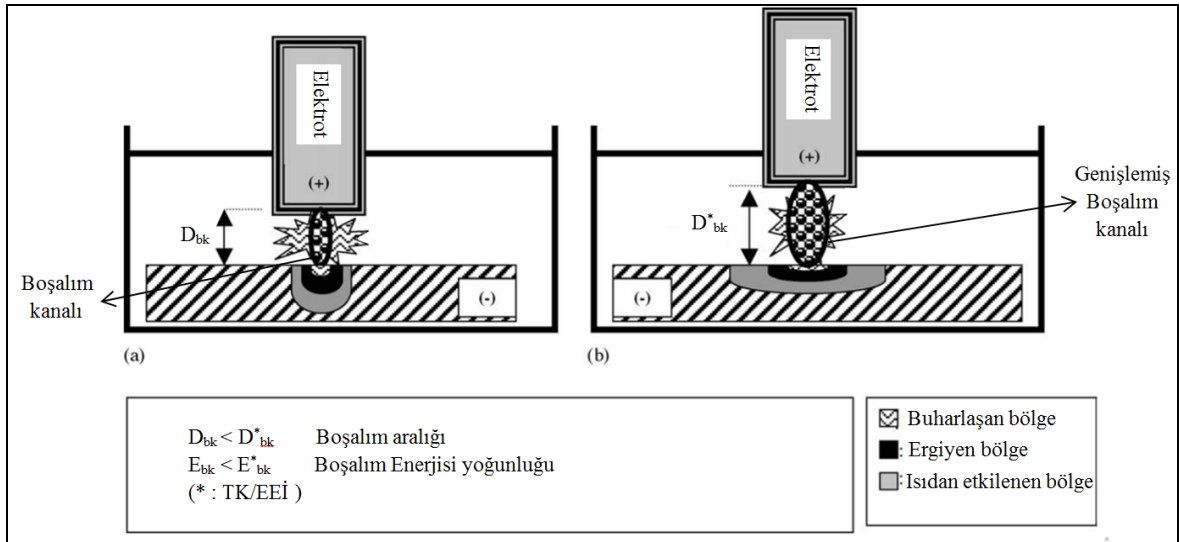


Şekil 4.12. Parçacıkların davranış şekilleri

İşparçası ve elektrot arasında 80-320 V gerilim uygulandığında, toz parçacıkları elektrot ve işparçası arasında bir köprü oluşturur. 105 - 107 V/m yoğunluktaki bu elektrik alanında, uygulanan gerilim nedeniyle parçacıklar arasında patlama meydana gelir. Bu patlama parçacıkların zik-zak çizerek hareket etmesine ve işleme boşluğunda bir çok boşalmanın meydana gelmesine sebep olurlar (şekil 4.13) [143].

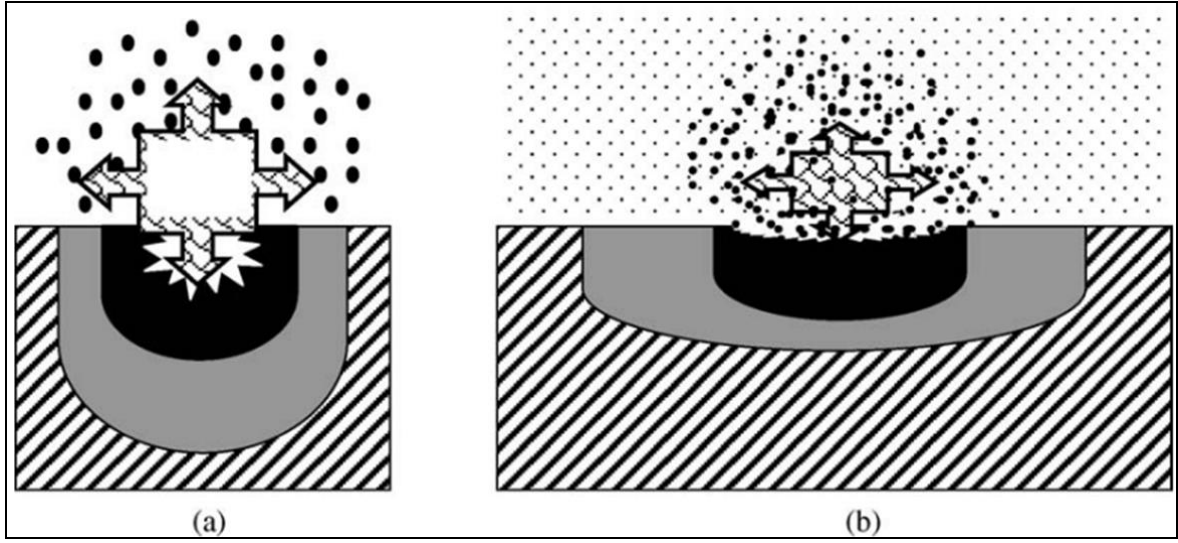


Şekil 4.13. TK/EEİ çalışma mekanizması. (a) köprü oluşması (b) zincirin kopması nedeniyle meydana gelen boşalım (c) patlama sonrası parçacıkların zik-zak hareketi (d) işlemin tekrarlanması



Şekil 4.14. Tek bir boşalım sonucu elde edilen boşalım aralığı (a) saf dielektrik, (b) toz ilaveli dielektrik

Şekil 4.14'da toz katkılı ve katkısız yöntemlerinde tek bir boşalım sonucu elde edilen boşalım aralığı kıyaslanmıştır. Buna göre, toz parçacıkların dielektrik sıvısına ilavesi boşalım aralığı ve onun sonucunda meydana gelen boşalım yoğunluğu ve gaz çıkış basıncının düşmesine neden olmuştur [109]. Şekil 4.15 'de görüldüğü gibi, toz karışımı EEİ malzeme uzaklaştırma mekanizması, gaz patlama basıncının neden olduğu mekanik itme kuvveti ve dielektrik sıvı içerisinde askıda duran parçacıkların çarpışma etkisi yardımıyla gerçekleşmektedir.



Şekil 4.15. Malzeme uzaklaştırma mekanizması (a) saf dielektrik (b) toz ilaveli dielektrik

5. KULLANILAN MALZEME VE ÜRETİM METODU

5.1. Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada kompozit malzemelerin üretimi için, matris malzemesi olarak Al2014 tozu ve takviye elemanı olarak B₄C tozu kullanılmıştır.

5.1.1. Bor karbür (B₄C)

Bor karbür yüksek elektriksel direnci, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek darbe mukavemeti, yüksek korozyon direnci ve yüksek elastiklik modülü gibi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bir seramik malzemedir. B₄C elmastan sonra doğada bulunan en sert malzeme olarak bilinmektedir. Yapılan ölçümlere göre bu malzemenin elektriksel direnci 500°C 'ye kadar artan sıcaklıklarda doğrusal olarak düşmekte olup, daha yüksek sıcaklıklara varıldığında düşüş hızı azalmaktadır [144]. SiC ve Al₂O₃ gibi malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip olmasına rağmen maliyet açısından daha pahalı olması sebebiyle, Al/B₄C kompozitleri üzerinde yapılan çalışma sayısı Al/SiC ve Al/Al₂O₃ kompozitlerine göre önemli derecede daha azdır. Özellikle diğer takviye malzemelerine göre daha yüksek elastiklik modülü, daha yüksek spesifik rijitlik ve daha düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı, hafiflik ve aşınma direncinin aynı anda istendiği uygulamalarda büyük bir kullanım alanına sahip olmuştur [145].

B₄C malzemesi yüksek aşınma dayanımı nedeniyle makina parçalarında, hafif ve aynı zamanda sert özelliklere sahip olması nedeniyle zırh malzemesi olarak helikopterlerde, oksitlenmeye karşı dayanımlı olduğundan dolayı refrakter sanayisinde ve cam yeleklerinde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır [146]. Ayrıca sert ve aşındırıcı özelliklere sahip olduğundan dolayı sert malzemelerin taşlama ve parlatılmasında, kesici takım uçlarının bilenmesinde ve kum püskürtme jetlerinde geniş kullanım alanına sahiptir [144]. B₄C malzemesinin alaşım elementleri çizelge 5.1 'te ve teknik özellikleri çizelge 5.2 'te verilmiştir [145-147].

Çizelge 5.1. B₄C malzemesinin kimyasal bileşeni

B	C	Fe	Si	Ca	Cl	F
80%	18,1%	1,0%	0,5%	0,3%	0,075%	0,025%

Çizelge 5.2. B₄C malzemesinin teknik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Ergime sıcaklığı	(°C)	2450
Yoğunluk	(g / cm ³)	2,45-2,52
Vickers sertliği	(Gpa Hv 0,5 kg)	32
Tek eksenli basma dayanımı	(MPa)	1400-3400
Elastisite modülü	(GPa 20°C)	450-470
Kırılma tokluğu	(MPa / m ²)	2,9-3,7
Isıl iletkenlik	(W / mK 20°C)	30-90
Isıl genleşme katsayısı	(10 ⁻⁶ / °C)	5,6
Spesifik yalıtkanlık direnci	(Ωcm 20°C)	10
Poisson oranı	-	0,16
Elektriksel direnç	(Ωcm 298 k)	5
Elektriksel iletkenlik	(1 / Ωcm)	10 ³

5.1.2. Al2014 alaşımı

2000 serisi alüminyum alaşımları diğer Al alaşımlarına kıyasla yüksek kırılma tokluğuna, korozyon direncine ve hasar toleransına sahiptir. Al-Cu-Mg alaşımları olarak bilinen bu serinin en çok kullanılan alaşımları Al2014 ve Al2024 olmaktadır [148]. Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi, Al2014 alaşımının temel alaşım elementi bakır olmasından dolayı, iyi elektriksel iletkenlik özelliğine sahiptir. Al2014 alaşımı özellikle uçak iniş takımı göbeği, motor bileşenlerinde ve otomotiv endüstrisinde geniş olarak kullanılmaktadır [149]. Al2014 alaşımının teknik özellikleri çizelge 5.4'te verilmiştir [150].

Al/B₄C kompozitlerin sıvı faz işlemleri kullanılarak üretilmesi sırasında rastlanılan iki önemli sorun vardır. Bunlar, alüminyumun B₄C üzerindeki düşük ıslatılabilirliği ve Al ile B₄C arasındaki reaksiyon sonucu çeşitli fazların oluşmasıdır. Özellikle 1100°C 'ın altındaki sıcaklıklarda alüminyumun B₄C üzerindeki ıslatabilirlik özelliğinin düşük olması, sıvı faz işlemleri ile Al/B₄C kompozitlerin üretimini zorlaştırmaktadır. Diğer yandan, 900°C 'ın üzerindeki sıcaklıklarda Al ile B₄C ara yüzeyinde reaksiyonlar sonucu karmaşık yapıdaki fazlar (Al₄BC, Al₄C₃, AlB₂₄C₄ vb.) oluşmaktadır. Bu fazlar önemli derecede kompozitlerin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir [145].

Çizelge 5.3. Al2014 alaşımının kimyasal bileşenleri

Al	Cu	Si	Mn	Mg	Cr
93,5%	4,4%	0,8%	0,6%	0,5%	0,1%

Çizelge 5.4. Al2014 alaşımının teknik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Ergime Sıcaklığı	(°C)	510
Yoğunluk	(g / cm ³)	2,8
Elastisite Modülü	(GPa)	72,4
Poisson Oranı	-	0,33
Isıl Genleşme Katsayısı	(10 ⁻⁶ / °C)	23
Isıl iletkenlik	(W / mK)	192
Maksimum Çekme Dayanımı	(MPa)	427
Yorulma Dayanımı	(MPa)	262
Kayma Dayanımı	(MPa)	262

5.2. Üretim Metodu

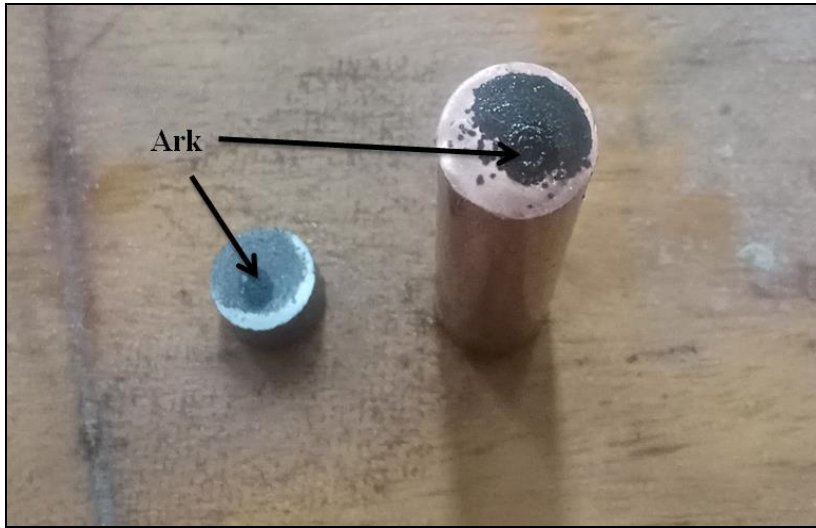
5.2.1. Birinci deneme

Vakumlu infiltrasyon yöntemiyle 1100 °C ‘nin altındaki sıcaklıklarda yapılan Al/B₄C kompozit üretimlerinde görülen en büyük engel, artan takviye-hacim oranlarında ıslatabilirliğin önemli derecede azalmasıdır. Bu durum, söz konusu kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, ilk denemede matris malzemesi olarak Al5154 alaşımı ve takviye elemanı olarak B₄C tozu %5, %10 ve %15 takviye-hacim oranlarında karıştırılarak cam tüpler içerisine doldurulmuştur. Resim 5.1 ‘de görüldüğü gibi vakumlu infiltrasyon sonucu bütün takviye-hacim oranlarında başarılı üretim ya hiç gerçekleşemedi veya kısmen gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle %15 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerde infiltrasyon işleminin hiç bir şekilde gerçekleşmediği görülmüştür. Karşılaşılan diğer sorun, seramik parçacıklar arasında topaklanmanın meydana gelmesidir. Bu olay, EEİ sırasında kısa devreye neden olarak, ark oluşumuna ve kararlı işlemin sağlanamamasına neden olmuştur (Resim 5.2).



Resim 5.1. İlk denemede başarısız şekilde üretilen Al5154/B₄C kompozitleri



Resim 5.2. Al5154/B₄C kompozitlerin EEİ yöntemiyle işlenmesi sırasında ark oluşumu

5.2.2. İkinci deneme

İkinci denemede, tüm bu sorunların giderilmesi için farklı Al alaşımı matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Yüksek oranda bakır elementi içerdiği nedeniyle Al5154'e göre daha iyi elektriksel iletkenlik özelliğine sahip Al2014 alaşımı matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Öncelikle 290 μ m boyutundaki Al2014 alaşımı ve 70 μ m boyutundaki B₄C tozu çizelge 5.5'de verilen oranlarda % 0, %5, %10 takviye-hacim oranları oluşturacak şekilde farklı infiltrasyon tüplerine doldurulmuştur. Yapılacak deneylere yetecek sayıda numunenin üretilmesi için her takviye-hacim oranından 3 adet olmak üzere toplamda 9 adet işparçası (tüp) üretilmiştir.

Çizelge 5.5. Farklı takviye-hacim oranları için gereken matris ve takviye ağırlıkları

T-H %	Al2014 (g)	B ₄ C (g)
%0 B ₄ C	39,312	0
%5 B ₄ C	19,6	1,772
%10 B ₄ C	17,48	3,544

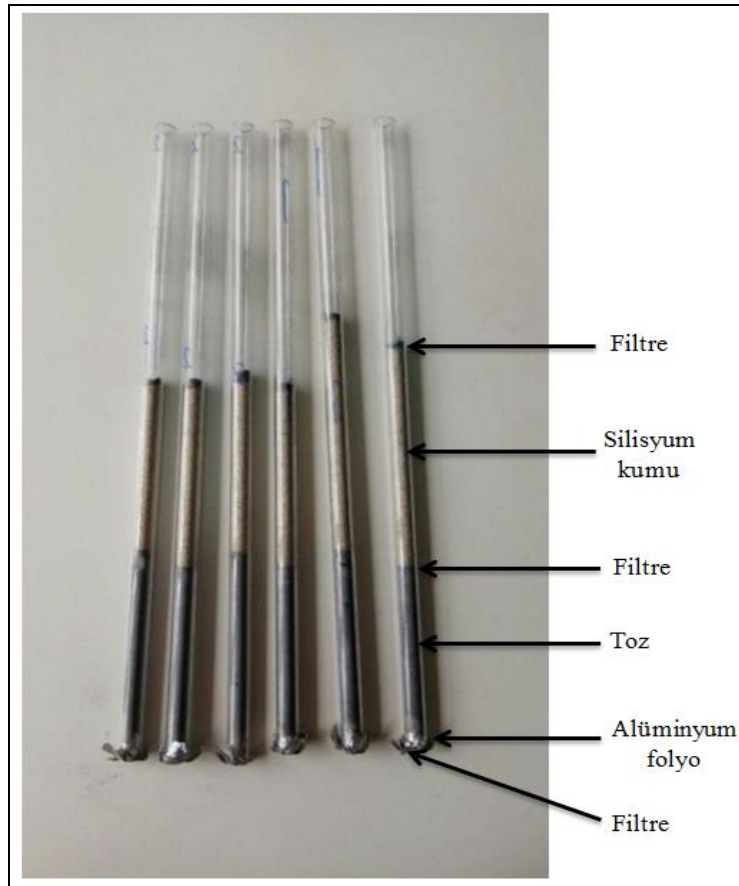
Tozların nemli olması infiltrasyon sırasında ıslatılabilirlik özelliğini negatif yönde etkilediği için, tozlar Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesi Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan argon gazı korumalı fırını kullanılarak kurutulmuştur. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için öncelikle fırın sıcaklığı 180 °C dereceye gelene kadar (yaklaşık yarım saat) beklenmiştir. Daha sonra tozlar 180 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle kurutulmaya bırakılmıştır. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra tozlar fırın içerisinde bir saat süreyle soğutularak oda sıcaklık seviyesine getirilmiştir (Resim 5.3).



Resim 5.3. Argon gaz korumalı fırın

Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, üretilen kompozit malzemelerde homojen yapının elde edilebilmesi için Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesi Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan üç boyutlu karıştırıcı (turbula) kullanılarak tozlar 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi her takviye-hacim oranı için ayrı olarak gerçekleştirilmiştir.

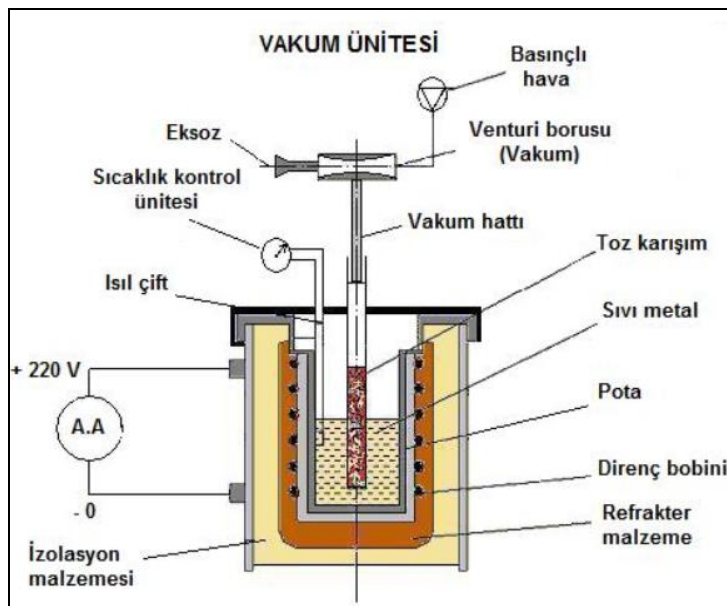
Bu yöntemde Resim 5.5'te görüldüğü gibi 10 mm dış çapa, 9 mm iç çapa ve 300 mm uzunluğa sahip cam tüpler kullanılmıştır. Cam tüplerin alt kısmı paslanmaz çelik filtre ile kapatılmıştır. Tozların dokülmesini engellemek için çelik filtre üzerine alüminyum folyo yerleştirilmiştir. Al₂O₃ ve B₄C tozları homojen şekilde karıştırıldıktan sonra, %0, %5 ve %10 takviye-hacim oranlarında hazırlanmış toz karışımları 70 mm yükseklik oluşturacak şekilde tüplere doldurulmuştur. Vakum sırasında tozların yukarı doğru hareketini engellemek için çelik filtre üzerine kuru silisyum kumu konulmuştur. Aynı şekilde silisyum kumu ve tozların birbirleriyle karışmasını önlemek için aralarına filtre yerleştirilmiştir. Silisyum kumun vakum sırasında yukarı hareket etmesi ve vakum hattına zarar vermesini önlemek için ise kum üzerine bir filtre daha konulmuştur. Son olarak, vakum ünitesi ve cam tüpler arasında sızdırmazlığı sağlayabilmek için, tüplerin üst kısmına ısıya dayanıklı teflon conta geçirilmiştir.



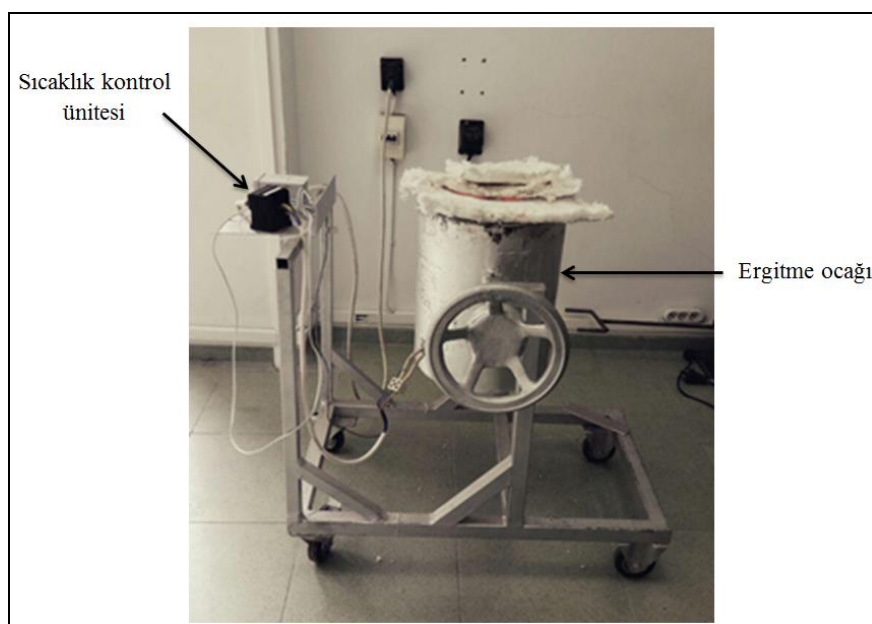
Resim 5.4. İnfiltrasyon işleminin yapılması için hazırlanmış cam tüpler

5.2.3. Deneylerin yapılması

Deneysel çalışmalar için Çalın ve Çıtak'ın [13] geliştirdiği elektrikli ergitme ocağı kullanılmıştır (şekil 5.1). Blok metal şeklinde olan Al2014 matris malzemesi potanın içerisinde yerleştirilerek ergimeye bırakılır. Metal malzeme sıcaklığı ergidikten sonra Cr-Ni ısıl çift yardımıyla 750 ± 5 °C 'de sabit tutulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan ergitme ocağı ve sıcaklık kontrol ünitesi Resim 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Vakumlu infiltrasyon deney düzeneği



Resim 5.5. Deneylerin üretilmesinde kullanılan ergitme ocağı ve sıcaklık kontrol ünitesi

Vakumun uygulanması

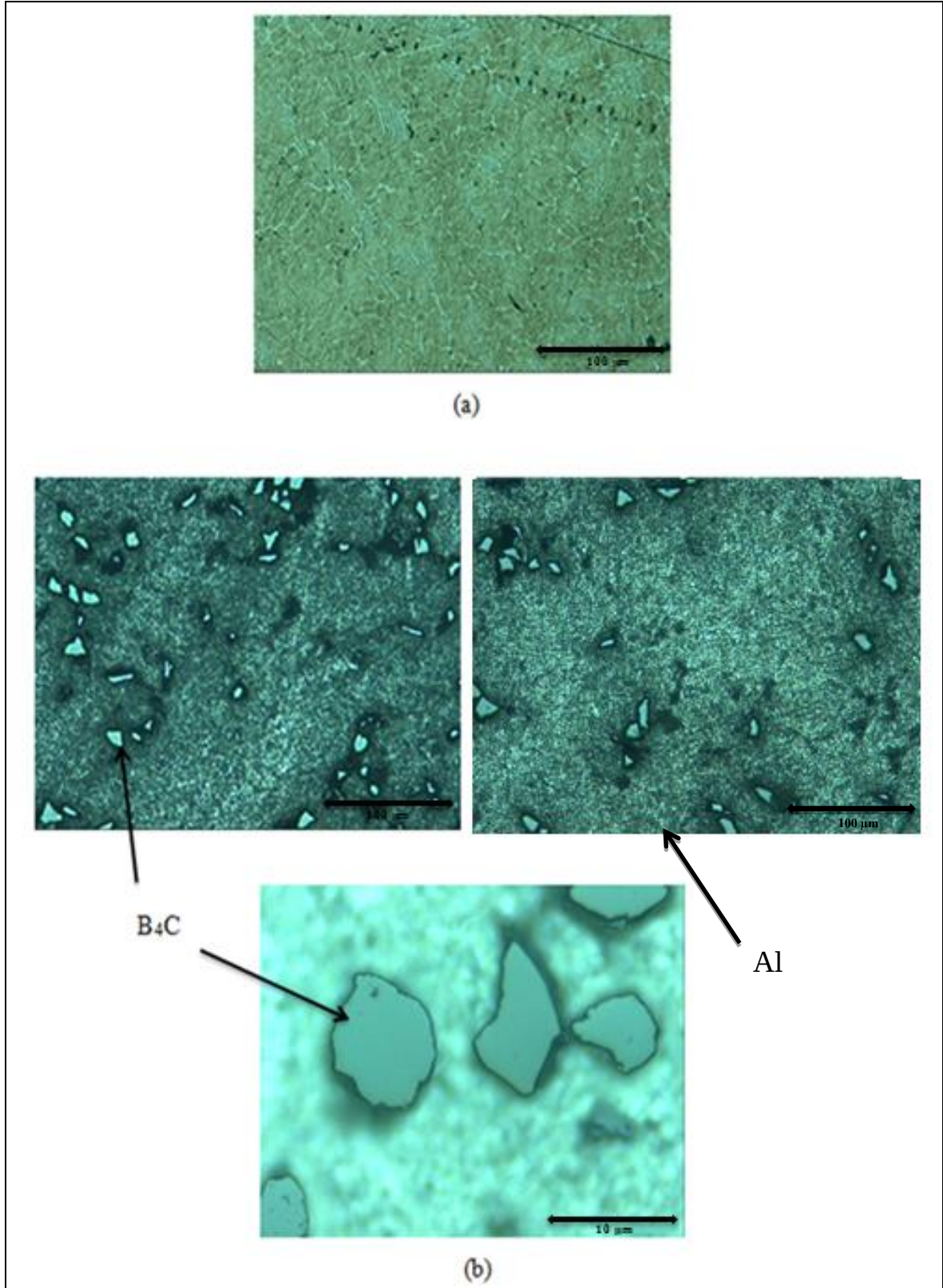
Bu çalışmada, 550 ± 10 mmHg vakum değeri uygulanarak kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. İnfiltrasyon işlemi sırasında oluşan sıcak hava, vakum ünitesini olumsuz etkilememesi için 6 mm çapında bakır boru kullanılarak vakum cihazı ve cam tüp arasındaki bağlantı kurulmuştur. Boru ve cam tüp arasındaki sızdırmazlık özelliğini sağlamak için ise yüksek ısıya dayanımlı teflon conta kullanılmıştır.

İnfiltrasyon işlemi

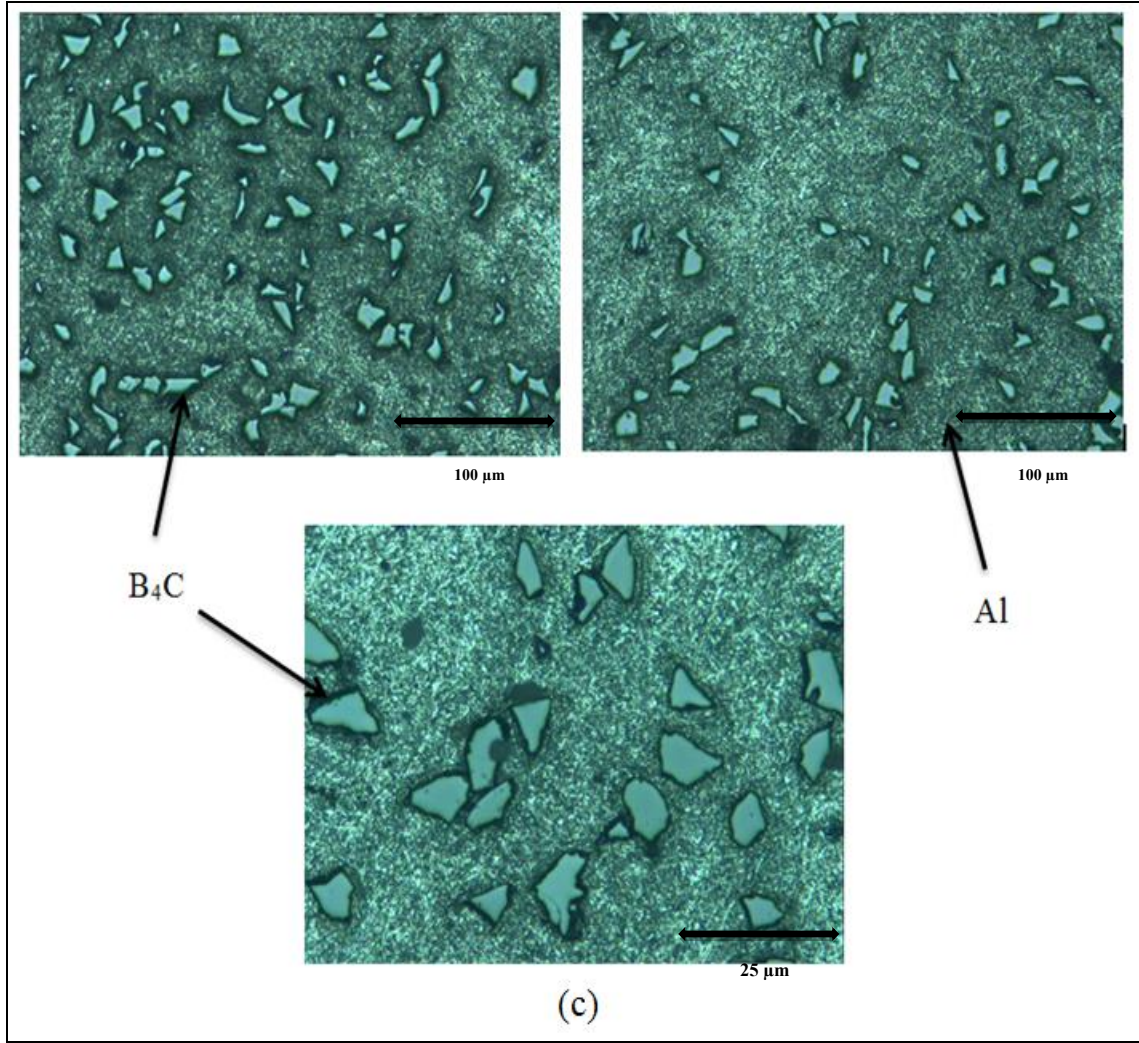
Önceden hazırlanmış cam tüpler, infiltrasyon işleminin gerçekleşmesi için gerekli olan sıcaklık değeri ($750\pm 5^{\circ}\text{C}$) ve vakum değerine (550 ± 10 mmHg) ulaştığında, sıvı metal içerisine sırayla daldırılırlar. Her deney sıvı metal içerisinde 3 dakika süreyle bekletilip, toplamda 9 adet deney yapılmıştır. Söz konusu deneyler normal atmosferde yapılmıştır. Deneyler için planlanan infiltrasyon süresi tamamlandıktan sonra vakum kesilerek cam tüpler pota içerisinden çıkartılır. Daha sonra, tüpler silis kumuna gömülerek oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılır. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra tüpler kırılarak üretilen kompozitler çıkartılır.

5.3. Mikroyapı Görüntüleri

Üretim işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen kompozitlerden optik mikroskop yardımıyla mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Resim 5.5 'de görüldüğü gibi farklı takviye-hacim oranlarındaki kompozit malzemeler başarılı şekilde üretilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde görüldüğü üzere, takviye elemanı Al matris içerisinde homojen olarak karışarak takviye ve matris arasında yeterli ıslatma meydana gelmiştir.



Resim 5.6. Farklı takviye-hacim oranlarından elde edilen mikroyapı görüntüleri (a) %0 B_4C (b) %5 B_4C (c) %10 B_4C



Resim 5.6. (devam) Farklı takviye-hacim oranlarından elde edilen mikroyapı görüntüleri
(a) %0 B₄C (b) %5 B₄C (c) %10 B₄C

5.4. Aşınma Deneyi

İnfiltrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, kompozit malzemeler üzerinde çizelge 5.6 'da belirtilen parametreler kullanılarak pin on disk aşınma testi yapılmıştır. Testler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Triboloji Laboratuvarında yapılmıştır. Testler farklı takviye-hacim oranlarının aşınma davranışını nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.6. Aşınma testinde kullanılan parametreler

Kuvvet (N)	Dönme Hızı (rpm)	Kayma Çapı (mm)	Kayma Mesafesi (m)	Kayma Hızı (m/s)	Süre (dak)
10	200	50	100	0,52	3,2

6. KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENMESİ

6.1. EEİ Tezgahı

Bu çalışmada, vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Charmilles marka, “D20” tip endüstriyel elektro erozyon tezgahı kullanılarak işlenmiştir (Resim 6.1).



Resim 6.1. Deneylerin işlenmesinde kullanılan EEİ tezgahı

6.2. Elektrot

Bu çalışmada, elektrot malzemesi olarak 10 mm çapa ve 25 mm uzunluğa sahip bakır malzemeden yapılmış elektrolar tercih edilmiştir. Yüksek elektriksel iletkenlik özelliği ve düşük maliyet tercih sebeplerinden birkaç tanesidir (Resim 6.2).



Resim 6.2. Elektrot malzemesi

6.3. İşparçası

Vakumlu infiltrasyon yöntemiyle elde edilen 70 mm uzunluğa sahip çubuklar tel EEİ yöntemiyle 5 mm boyunda dilimlenmiştir. Böylece EEİ yönteminde kullanılması için yeterli sayıda işparçası elde edilmiştir. Bu çalışmada işparçası malzemesi olarak 9 mm çapa ve 5 mm uzunluğa sahip Al/B₄C kompozit malzemeler kullanılmıştır. Hazırlanan işparçalarının gerçek görünümü resim 6.3 'de görülmektedir.



Resim 6.3. İşparçası malzemesi

6.4. Dielektrik Sıvı

Deneyleerde dielektrik sıvısı olarak gaz yağı (kerosene) kullanılmıştır. Bu çalışmada, öncelikle tüm deneyler geleneksel EEİ yöntemiyle belirlenen işleme parametrelerinde işlenmiştir. Daha sonra, dielektrik sıvısına 10 g/L oranında grafit tozu ilave edilerek, aynı işleme parametrelerinde deneyler tekrarlanmıştır. TK/EEİ yönteminin işlenebilirlik, İİH ve EAH üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Isıl iletkenlik ($1,5 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ve elektriksel iletkenlik ($3 \times 10^{-3} \mu\Omega \text{ cm}^{-1}$), grafit tozunun işleme özelliklerinde etki yapan en önemli parametreleridir. TK/EEİ sırasında tozların sirkülasyonunu sağlamak için Resim 6.4 'de gösterilen karıştırma mekanizması kullanılmıştır.



Resim 6.4. TK/EEİ yöntemi için kullanılan karıştırma mekanizması

6.5. İşleme Parametreleri

Yapılan literatür araştırması değerlendirilmesi sonucunda, işparçalarının işlenebilirlik özelliklerinin analiz edilmesi için 3 farklı akım değerinin (2A, 4A, 8A) uygun olabileceği düşünülmüştür. Yapılan deneylerde vurum süresi (T_{on}), bekleme süresi (T_{off}), işleme derinliği, kutuplama, dielektrik sıvı cinsi ve TK/EEİ 'da kullanılan grafit tozu konsantrasyonu sabit parametreler olarak belirlenmiştir. Diğer yandan boşalım akımı (I_d),

ışparçası takviye-hacim oranı ve işlemin tozlu veya tozsuz olarak yapılması değişken parametreler olarak belirlenmiştir. İşleme sırasında tüm deneylerin işleme süreleri ayrı olarak kornometre yardımıyla ölçülerek performans kriterleri hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

İşparçası Malzemesi	Al2014/B ₄ C kompozit
İşparçası T-H oranı [%]	0, 5, 10
Boşalım Akımı (I _d) [A]	2, 4, 8
Vurum Süresi (T _{on}) [μ s]	8
Bekleme Süresi (T _{off}) [μ s]	1
İşleme Derinliği [mm]	2
Dielektrik Sıvı	Gaz yağı
Elektrot Malzemesi	Bakır
Kutuplama	Elektrot (+) İşparçası (-)
Grafit Tozu Konsantasyonu [g/L]	10

İşleme sırasında meydana gelebilecek hataların en aza indirilmesi için çizelge 6.2 ‘de görülen deneylerin her birinden üçer adet yapılmıştır. Bunun yanısıra, tutarsızlık gösteren bazı deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler tamamlandıktan sonra, tutarlı üç deney sonucunun aritmetik ortalaması alınmıştır.

Çizelge 6.2. Deney tasarımı

Akım (A)	Vurum süresi (μ s)	Bekleme süresi (μ s)	T-H %	Toz katkılı/katkısız
2	8	1	0 5 10	Toz katkılı Toz katkısız
4			0 5 10	Toz katkılı Toz katkısız
8			0 5 10	Toz katkılı Toz katkısız

6.6. Deneyler Sırasında Yapılan Ölçümler

6.6.1. İşleme süresi

Her deney için EEİ sırasında meydana gelen ilk boşalım ile 2 mm işleme derinliği sonunda meydana gelen son boşalım arasındaki süre bir kornometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçülen süre, deneylerin İİH ve EAH değerlerinin hesaplanmasında işleme süresi olarak kullanılmıştır.

6.6.2. İİH değerinin hesaplanması

İşlemeden önce nihai boyutlara getirilen işparçası 0,1 mg hassasiyetindeki AND HM-200 dijital terazi ile tartılmıştır. İşleme tamamlandıktan sonra işparçası yüzeyi temizlenerek tekrardan dijital terazi ile tartılmıştır. Tüm deneylerde işleme öncesi ve sonrası meydana gelen ağırlık kaybı işleme süresine bölünerek İİH [g/dak] değeri hesaplanmıştır.

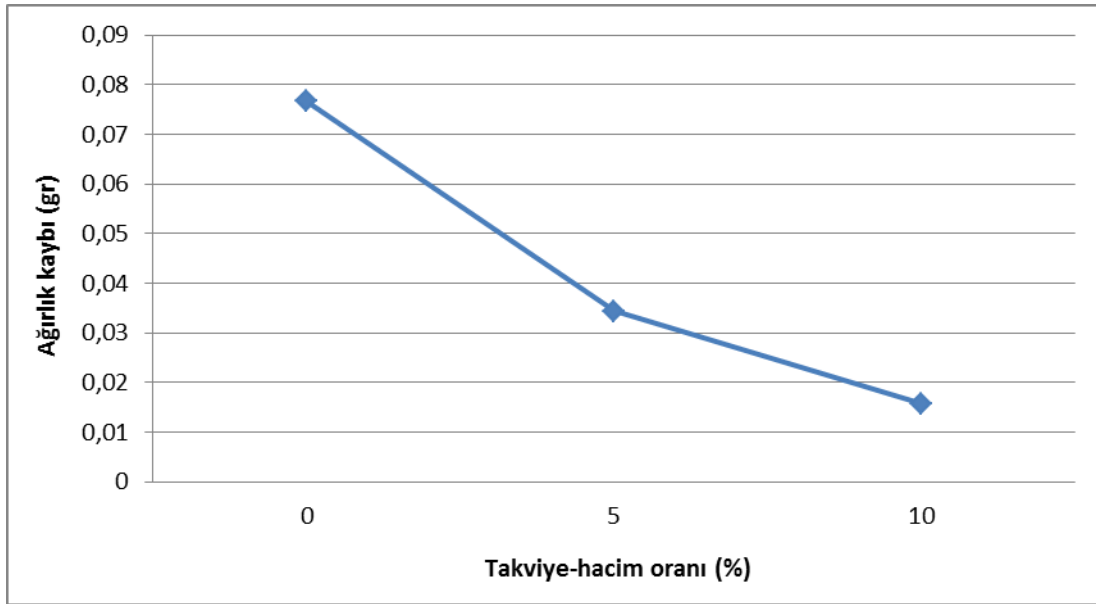
6.6.3. EAH değerinin hesaplanması

İşparçasına benzer şekilde, her deneyde kullanılan elektrot işlemeden önce ve sonra dijital terazi ile tartılarak aradaki ağırlık kaybı elde edilmiştir. Ağırlık kaybı işleme süresine bölünerek EAH [g/dak] değeri hesaplanmıştır.

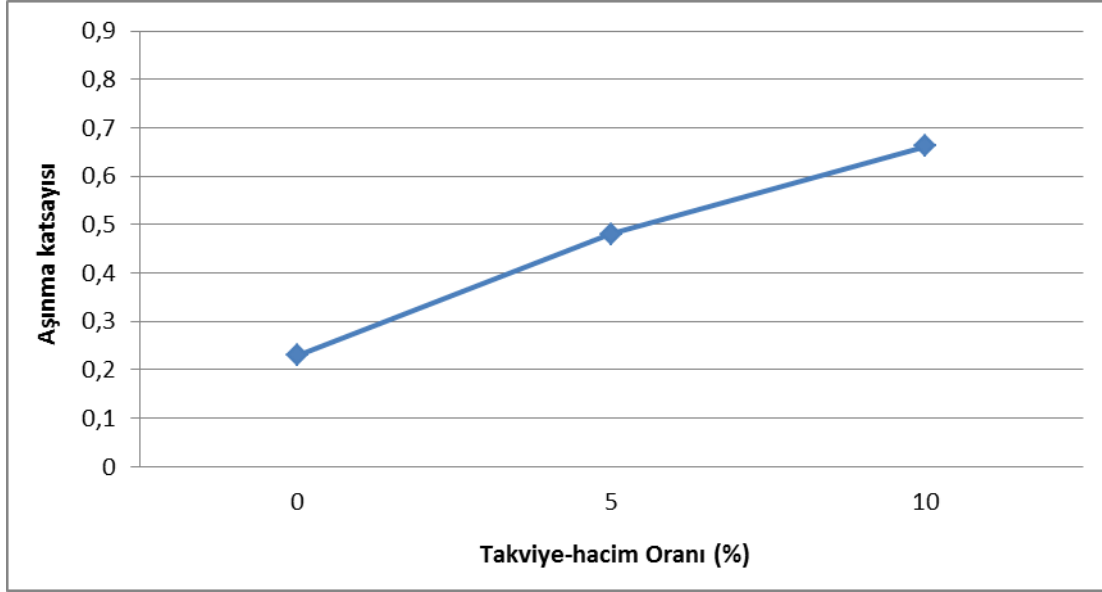
7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Aşınma Testi Sonuçları

Vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerden işparçalarına çizelge 5.5’de belirtilen parametreler kullanılarak aşınma testi yapılmıştır. Bu testler sonucu her bir takviye-hacim oranına ait ağırlık kaybı (şekil 7.1) ve aşınma katsayısı (şekil 7.2) elde edilmiştir. Şekil 7.1’de görüldüğü üzere takviye-hacim oranı arttıkça ağırlık kaybı azalmıştır. Bunun nedeni aşınmaya karşı dayanıklı B_4C parçacıkların yüksek takviye-hacim oranlarında zımparayla daha fazla temas etmesi ve aşınmayı yavaşlatmasıdır. Şekil 7.2 ‘de ise aşınma katsayısının takviye-hacim oranının artmasıyla arttığı görülmektedir.



Şekil 7.1. Farklı takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerde aşınma testi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları



Şekil 7.2. Farklı takviye-hacim oranlarına sahip kompozitlerden aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayıları

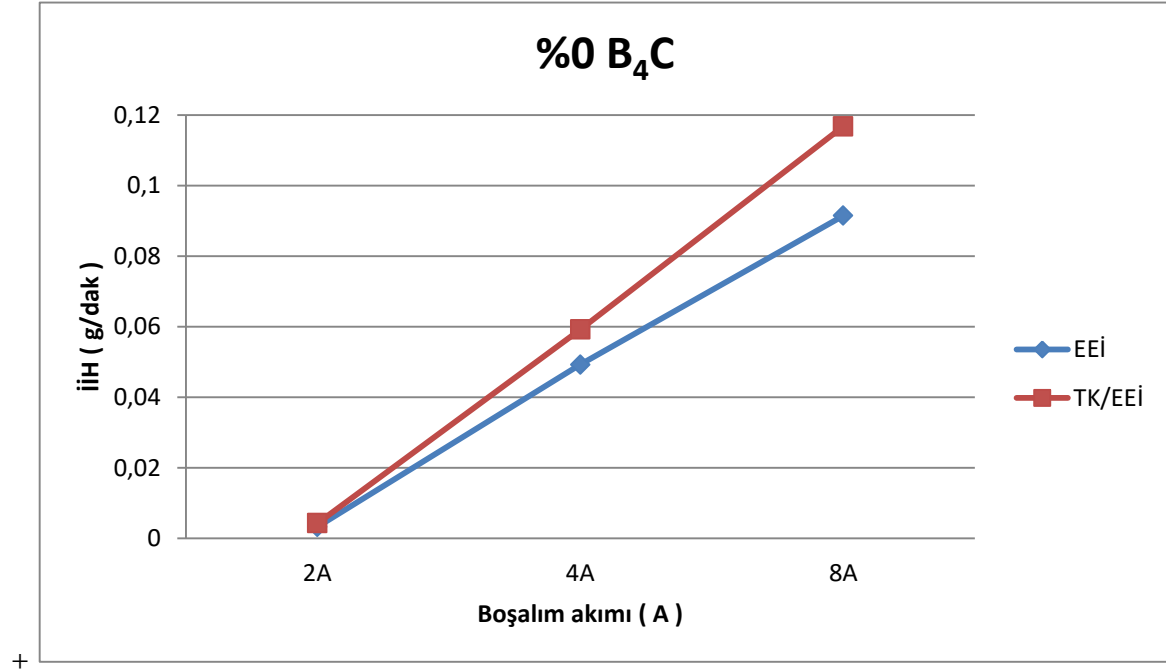
7.2. İşlem Parametrelerin İşparçası İşleme Hızı (İİH) Üzerindeki Etkisi

Tez çalışmasında vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler aynı işleme parametreleri uygulanarak normal EEİ ve TK/EEİ yöntemleriyle işlenmiştir. Boşalım akımı, takviye-hacim oranı ve işleme türünün işleme performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla toplamda 54 adet deney yapılmıştır. Her iki yöntemde takım elektrot malzemesi olarak sabit çap ve uzunluğa sahip bakır elektrotlar kullanılmıştır. İşleme derinliği ise her iki yöntemde 2 mm olarak belirlenmiştir. EEİ sırasında kompozitin takviye-hacim oranı arttıkça daha kararsız işlemenin meydana geldiği görülmüştür. Deneyler tamamlandıktan sonra TK/EEİ yönteminin işleme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Genel olarak her iki yöntem ile gerçekleşen deneylerde düşük EAH meydana gelmiştir. Ancak TK/EEİ yöntemiyle yapılan deneylerin performans kriterleri (İİH ve EAH) ve işleme kararlılığı üzerinde pozitif bir etki bıraktığı tespit edilmiştir. En fazla işleme hızı %0 takviye-hacim oranı ve 8A boşalım akımı, En fazla takım aşınması ise %10 takviye-hacim oranı ve 8A boşalım akımı kullanıldığında elde edilmiştir.

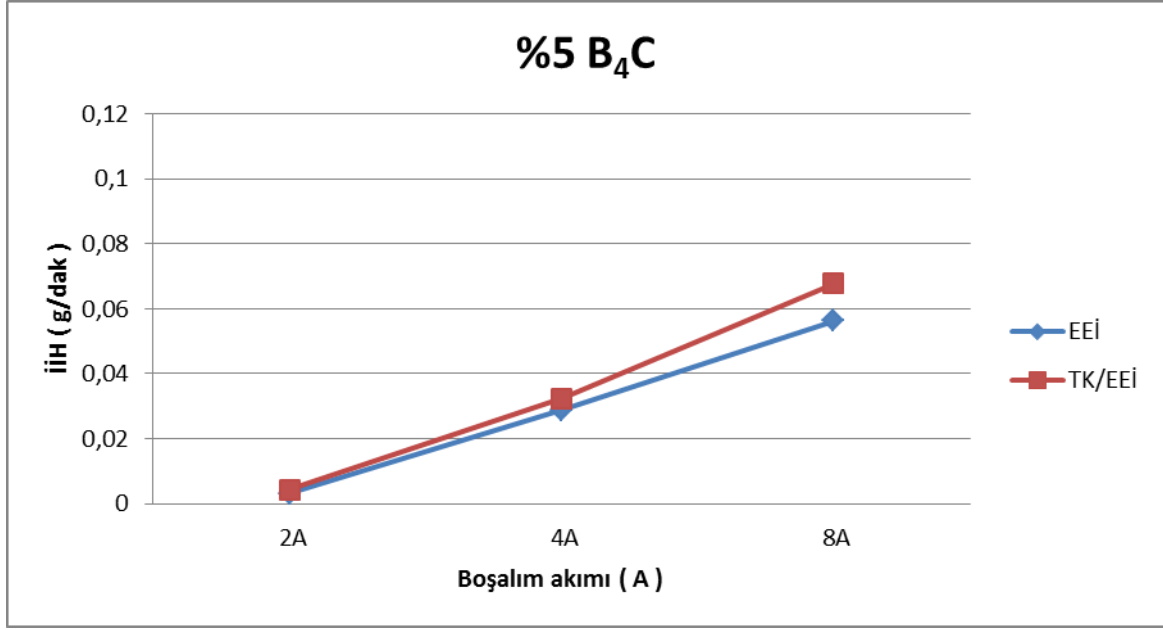
Deneylerde elde edilen işleme hızları Eş.4.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 7.3 'de görüldüğü gibi %0 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerin işlenmesinde, boşalım akımının artmasıyla işleme hızında artış meydana gelmiştir. İşleme sırasında seramik

parçacıklara rastlanmadığından ötürü meydana gelen artış kararlı şekilde ve çizgisel olarak devam etmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer takviye-hacim oranlarıyla kıyaslandığında daha yüksek İİH elde edildiği görülmüştür. Ayrıca TK/EEİ yönteminin kullanılması EEİ kıyasla işleme hızında iyileşmeye sebep olmuştur. Elde edilen iyileşme oranı yüksek akımların uygulandığı deneylerde daha belirgindir.

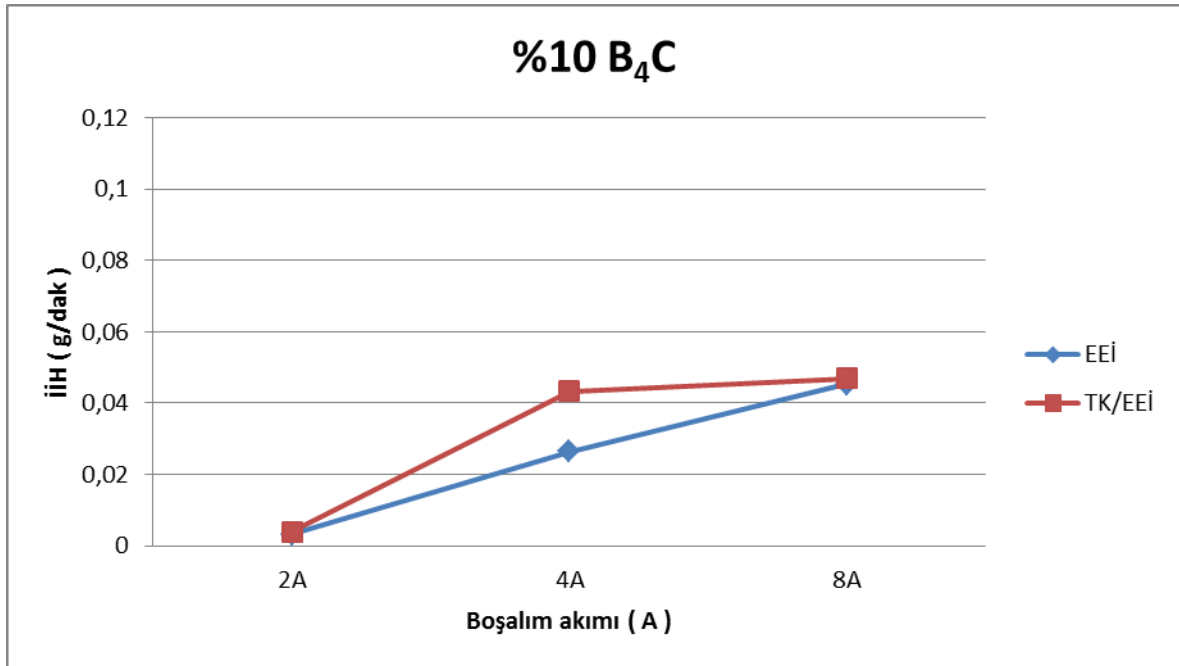


Şekil 7.3. %0 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması

%5 B₄C işparçasından elde edilen sonuçlara bakıldığında, işleme hızının %0 B₄C işparçasına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 7.4). Bu deneylerde de boşalım akımı arttıkça İİH 'ında artış görülmüştür. İşleme sırasında zaman zaman seramik parçacıklara rastlanıldığı için kararsız işleme meydana gelmiştir. Ancak %10 takviye-hacim oranına kıyasla meydana gelen kararsız işleme oranı daha azdır. %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerin işlenmesinde ise diğer takviye-hacim oranlara kıyasla daha düşük İİH elde edilmiştir (Şekil 7.5). kompozit içerisindeki seramik parçacık oranının fazla olması nedeniyle özellikle 8A boşalım akımı uygulandığı deneylerde sıkça ark oluşumu ve kararsız işleme meydana gelmiştir. Ayrıca 4A boşalım akımı uygulandığı deneylerde ise düşük seramik parçacık yoğunluğu nedeniyle zaman zaman beklenen değerden daha yüksek İİH elde edilmiştir.



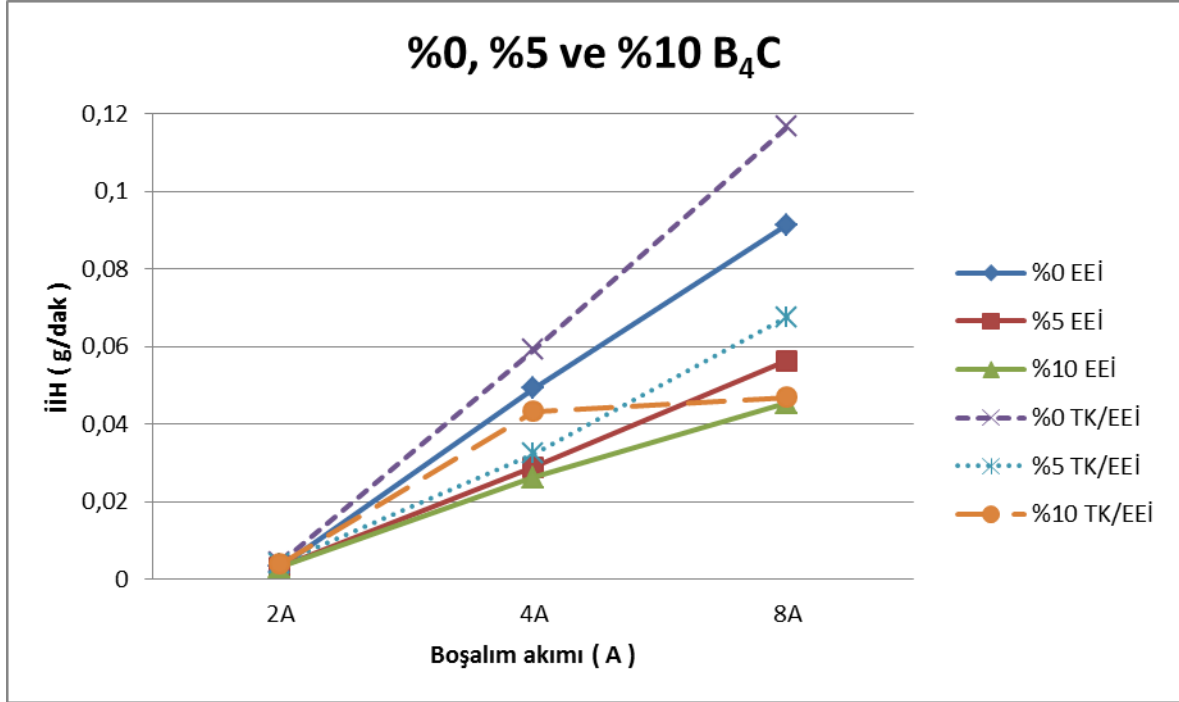
Şekil 7.4. %5 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.5. %10 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması

Tüm deneylerden elde edilen İİH değerleri Şekil 7.6 'te sunulmuştur. Grafikten anlaşıldığı gibi TK/EEİ yöntemi kullanılarak daha yüksek işleme hızları elde edilmiştir. Bunun nedeni dielektrik sıvısında bulunan iletken tozlar sayesinde işparçası yüzeyinin daha düşük enerjili

ve daha geniş etki alanlı boşalım ile işlenilmesidir. En yüksek işleme hızı TK/EEİ yönteminde 8A boşalım akımı uygulanan %0 takviye-hacim oranına sahip işparçasında elde edilmiştir. En düşük işleme hızı ise EEİ yönteminde 2A boşalım akımı uygulanan %10 takviye-hacim oranına sahip işparçasında elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Tüm deneylerin klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin İİH değerlerinin karşılaştırılması

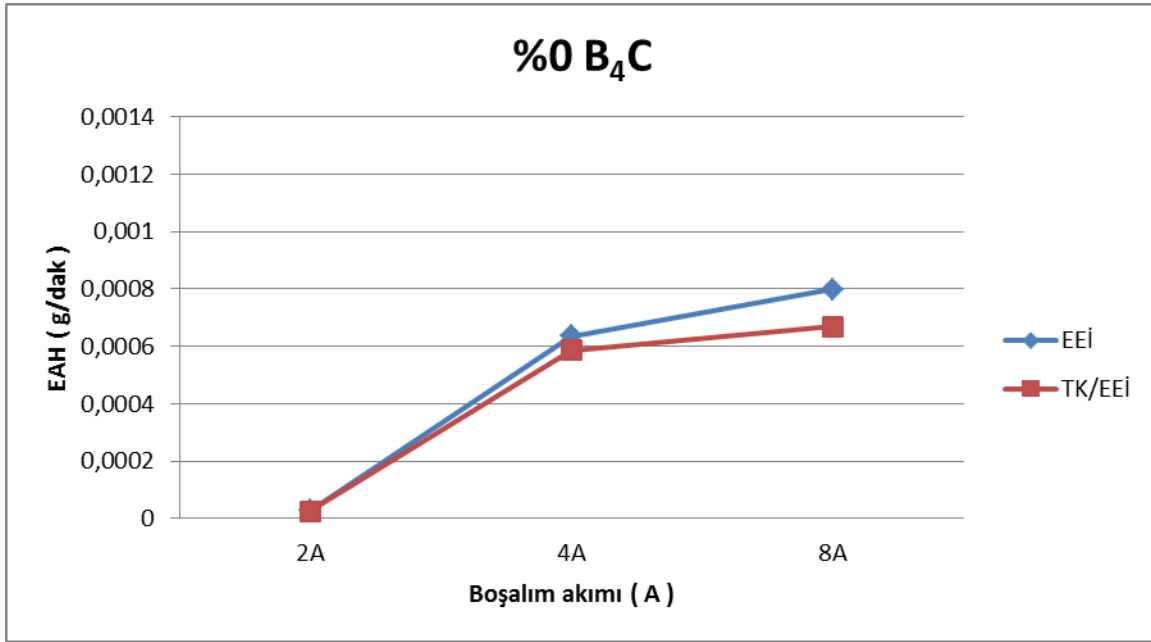
7.3. İşlem Parametrelerin Elektrot Aşınma Hızı (EAH) Üzerindeki Etkisi

Malzeme kaldırma işlemi tamamlandıktan sonra Eş.4.6 kullanılarak elektrotların aşınma hızları hesaplanmıştır. Elde edilen değerlere göre takviye-hacim oranı ve uygulanan akım değeri arttıkça daha yüksek takım aşınması meydana gelmiştir (Şekil 7.7). Bunun nedeni ise sert seramik parçacıkların oluşan boşalımlara karşı daha dayanıklı olması ve bu olayın takım elektrotta negatif yönden etki ederek aşınmasına neden olması olarak açıklanabilmektedir. Özellikle TK/EEİ yöntemi kullanıldığında boşalımların daha kolay oluşabilmesi ve takım elektrotun daha az zorlanması nedeniyle EAH değerinde iyileşme meydana gelmiştir.

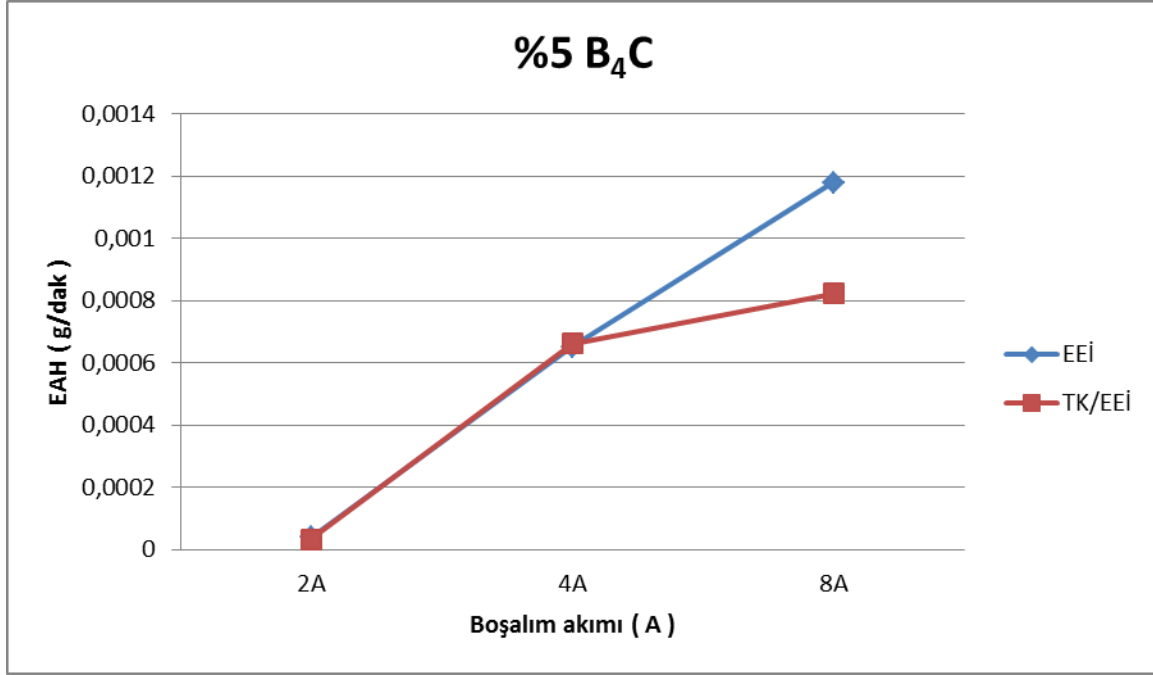
%5 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerden elde edilen sonuçlara bakıldığında, %0 takviye-hacime göre daha yüksek takım aşınmasının meydana geldiği açıkça görülmektedir

(Şekil 7.7 ve Şekil 7.8). Özellikle 8A boşalım akımı uygulandığı deneylerde, işleme sırasında açığa çıkan yüksek sıcaklık ve işparçası yüzeyinden ayrılan parçacıkların işleme mesafesinden uzaklaşmaması gibi sebeplerden dolayı takım aşınması yüksek değerlere ulaşmıştır. TK/EEİ yönteminin kullanılmasıyla bu değerinin daha düşük değerlere düşürülmesi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.

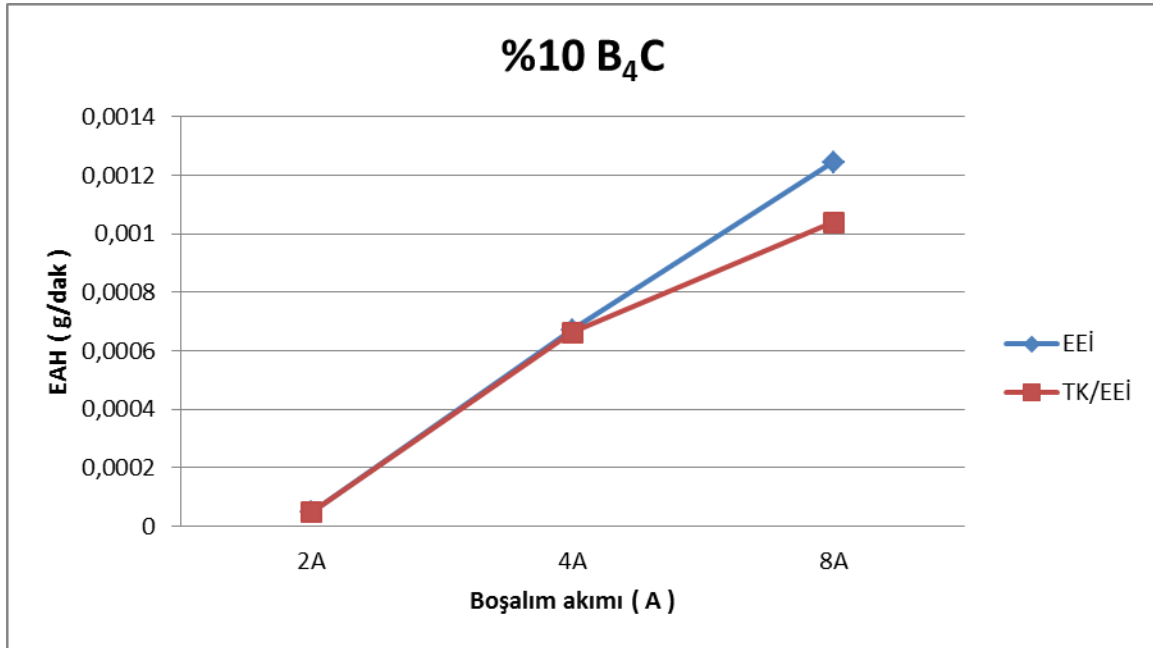
%10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerden elde edilen sonuçlara bakıldığında ise aynı şekilde boşalım akımı artışıyla elektrot aşınma değerinde artış görülmüştür. TK/EEİ yöntemi kullanarak soz konusu değerin daha az değerlere indirilmesi başarılmıştır. Aşınma oranındaki iyileşme özellikle yüksek akım (8A) uygulandığı deneylerde daha belirgindir (Şekil 7.9).



Şekil 7.7. %0 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması



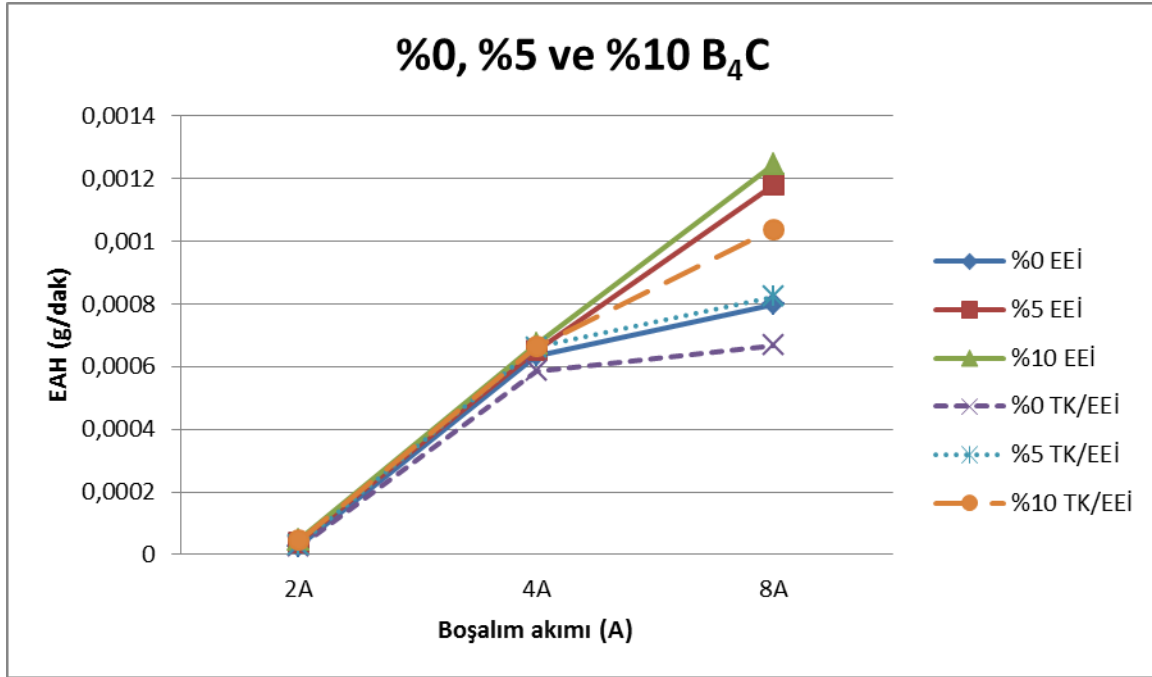
Şekil 7.8. %5 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.9. %10 B₄C işparçasının klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması

Tüm deneylerin işlenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.10 'da sunulmuştur. Grafikten anlaşıldığı gibi boşalım akım değeri ve takviye-hacim oranı arttıkça elektrot takımında meydana gelen aşınma oranı da artmaktadır. TK/EEİ yöntemi kullanılarak takım

aşınma değerinde iyileşme elde edilmiştir. Bu iyileşme özellikle 8A boşalım akımı uygulanığı deneylerde daha belirgin şekilde görülmektedir. En yüksek takım aşınma oranı EEİ ile işlenen 8A boşalım akımı uygulanan %10 takviye-hacim oranındaki deneylerde elde edilmiştir. En düşük takım aşınma oranı ise TK/EEİ ile işlenen 2A boşalım akımı uygulanan %0 takviye-hacim oranına sahip deneylerde elde edilmiştir.



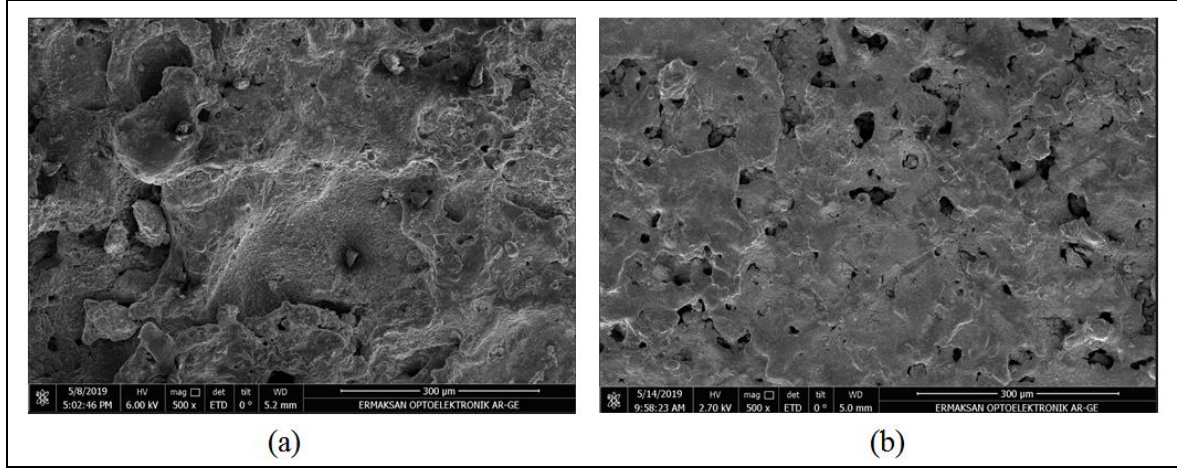
Şekil 7.10, Tüm deneylerin klasik EEİ ve TK/EEİ ile farklı akımlarda işlenmesinin EAH değerlerinin karşılaştırılması

7.4. İşlenmiş Yüzey Görüntüleri

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen işparçası yüzeylerinden SEM görüntüsü alınmıştır. Bu görüntüler ele alınarak işleme sonrası yüzeylerde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Özellikle uygulanan yüksek akımlarda açığa çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle yüzeyde oluşan yanık bölgeler, seramik parçacık topaklanması nedeniyle işlemede meydana gelen kararsızlıklar ve genel olarak yüzey özellikleri SEM görüntüleri kullanılarak incelenmiştir.

Bu kapsamda Resim 7.1’de %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerin geleneksel EEİ ve TK/EEİ yöntemleri kullanılarak işlenmesi sonucunda elde edilen yüzey görüntüleri görülmektedir. Görüntülerden görüldüğü üzere kompozitlerin üretiminde ve işlenmesinde

kullanılan optimum parametreler, yüksek kaliteye sahip kompozitlerin üretilmesine ve yeterli seviyedeki işleme performansının elde edilmesine sebep olmuştur.



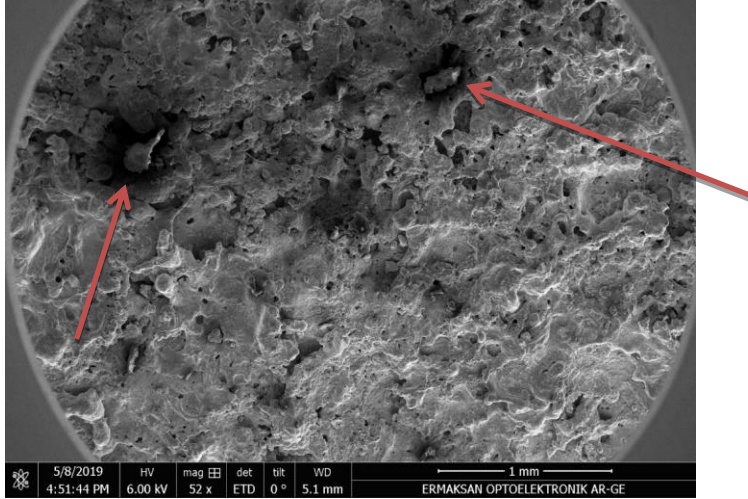
Resim 7.1. %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerden işleme sonucu alınan SEM görüntüleri (a) TK/EEİ (b) % EEİ

Ayrıca Resim 7.2 ‘de görüldüğü gibi vakumlu infiltrasyon sonucunda seramik parçacık ve matris arasında yeterli seviyede ıslatma meydana gelmiştir. Bu sonuç Resim 5.5’de işparçası yüzeyinden alınan optik mikroskop fotoğrafta da görülmektedir.



Resim 7.2. Vakumlu infiltrasyon yöntemi sonucunda meydana gelen ıslatma

Resim 7.3’de %10 takviye-hacim oranına sahip işparçasının 8A boşalım akımı uygulanarak TK/EEİ yöntemi kullanılarak işleme sonucu elde edilen yüzey görüntüsü görülmektedir. Şekilde belirlenen bölgede oluşan seramik parçacık topaklanması, işleme sırasında beklenen değerden daha yüksek EAH ve daha düşük İİH elde edilmesine sebep olmuştur.



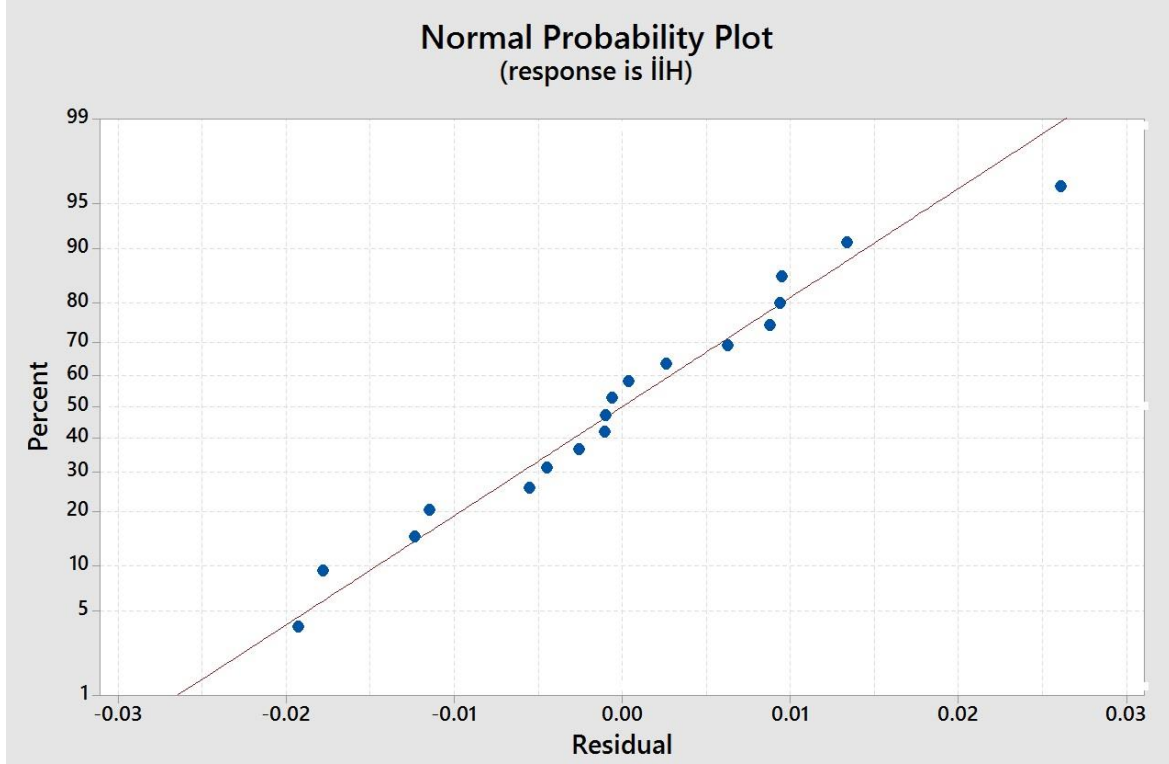
Resim 7.3. %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitin TK/EEİ sırasında meydana gelen seramik parçacık topaklanması

7.5. ANOVA Analizi

Deneylerden elde edilen sonuçların analiz edilebilmesi ve performans kriterleri üzerinde hangi işlem parametresinin daha etkili olduğunun belirlenmesi için varyans analizi kullanılmıştır. Çalışmada ANOVA analizinin yapılması için Minitab yazılımı kullanılmıştır. Söz konusu analiz İİH ve EAH değerleri için ayrı ayrı olarak yapılmıştır.

7.5.1. İşparçası işleme hızı (İİH)

Şekil 7.11 ‘de görüldüğü gibi işparçası işleme hızları için normal dağılım değerlerine yakın değerler elde edilmiştir. Yapılan varyans analiz sonuçları ise çizelge 7.1 ‘de verilmiştir. Bu çizelgede serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), Fisher sabiti (F) ve katkı faktörü (P) değerleri gösterilmektedir.



Şekil 7.11. İİH’ın normal dağılım eğrisi

Çizelge 7.1. İİH varyans analiz sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F-Değeri	P-Değeri	Etkileme Oranı (%)
İşleme Tipi	1	0,000285	0,000285	1,56	0,236	1,55
Akım	2	0,013530	0,006765	37,00	0,000	73,79
T-H %	2	0,002326	0,001163	6,36	0,013	12,69
Hata	12	0,002194	0,000183	-	-	11,97
Toplam	17	0,018335	-	-	-	100

Varyans analizi sonucunda Eş 7.1 ‘de verilen denklem elde edilmiştir. Denklem katsayıları ise çizelge 7.2 ‘de sunulmuştur. Bu çizelgede Standart hata (SH) katsayısı, (T), katkı faktörü (P) ve Varyans Büyütme Faktörü (VBF) değerleri gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{İİH} = & 0,03810 - 0,00398 \text{ İşleme Türü}_1 + 0,00398 \text{ İşleme Türü}_2 - 0,03444 \text{ Akım}_2 + \\ & 0,00179 \text{ Akım}_4 + 0,03265 \text{ Akım}_8 + 0,01592 \text{ T-H \%}_0 - 0,00600 \text{ T-H \%}_5 - 0,00991 \\ & \text{T-H \%}_{10} \end{aligned} \quad (7.1)$$

Çizelge 7.2. İİH denklemi için elde edilen katsayılar

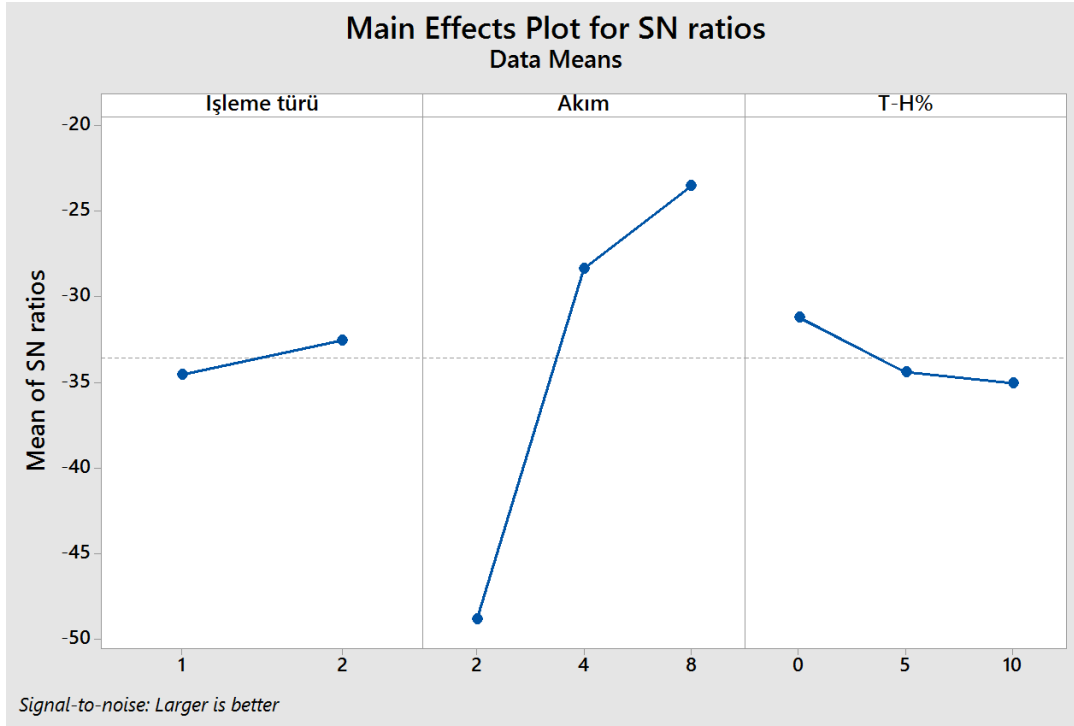
Terim	Katsayı	SH Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VBF
Sabit	0,03810	0,00319	11,95	0,000	-
İşleme Tipi	-	-	-	-	-
1	-0,00398	0,00319	-1,25	0,236	1,00
Akım	-	-	-	-	-
2	-0,03444	0,00451	-7,64	0,000	1,33
4	0,00179	0,00451	0,40	0,699	1,33
T-H %	-	-	-	-	-
0	0,01592	0,00451	3,53	0,004	1,33
5	-0,00600	0,00451	-1,33	0,208	1,33

Yapılan doğrulama deneyi sonucunda 16 numaralı deneyin İİH değerinde sapma görülmüştür. Bu sapma söz konusu işparçası yüzeyinde seramik parçacık topaklanması sonucunda meydana gelen yüksek takım aşınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 7.3 ‘de verilmiştir.

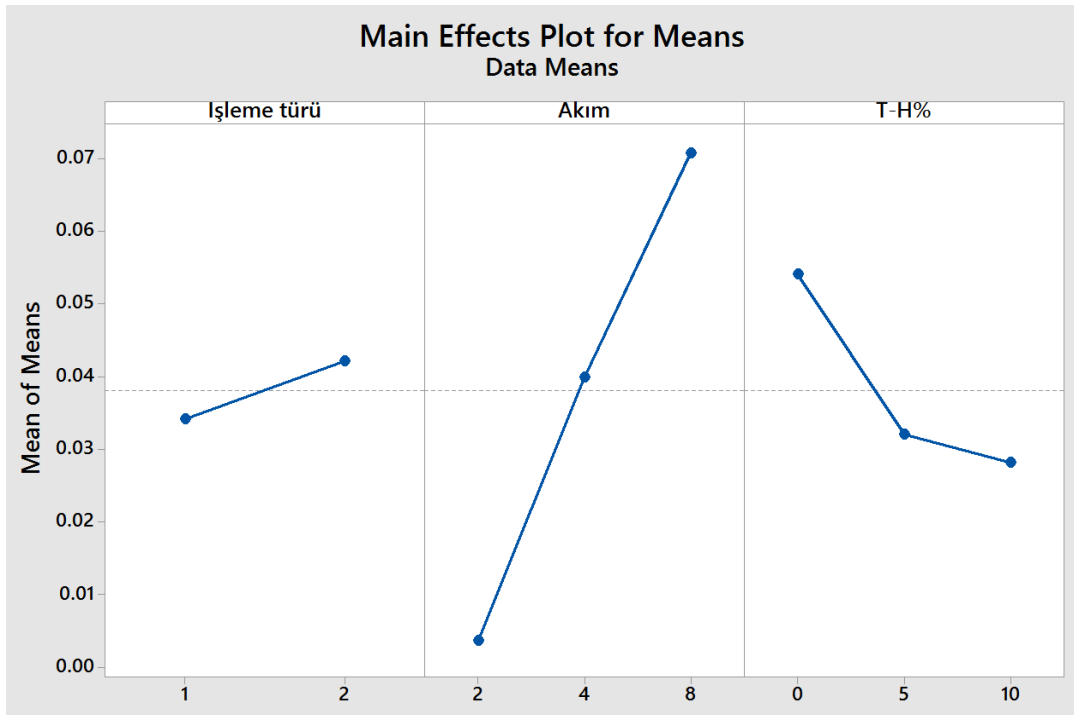
Çizelge 7.3. Yapılan doğrulama deney sonucu İİH’ında meydana gelen sapma

Obs	İİH	Fit	Resid	Std Resid
16	0,11675	0,09064	0,02610	2,36 R

Şekil 7.12 ve 7.13’de işleme parametrelerin işparçası işleme hızını nasıl etkiledikleri görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere işleme sırasında uygulanan akım değeri İİH değerini diğer parametrelere kıyasla daha yüksek oranda etkilediği görülmektedir. Bunu sırayla takviye-hacim oranı ve işleme türü takip etmektedir. En yüksek İİH, 8A boşalım akımı ve %0 takviye-hacim oranı kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca toz katkılı EEİ yöntemi kullanılarak yapılan deneylerde işleme hızında iyileşme görülmüştür.



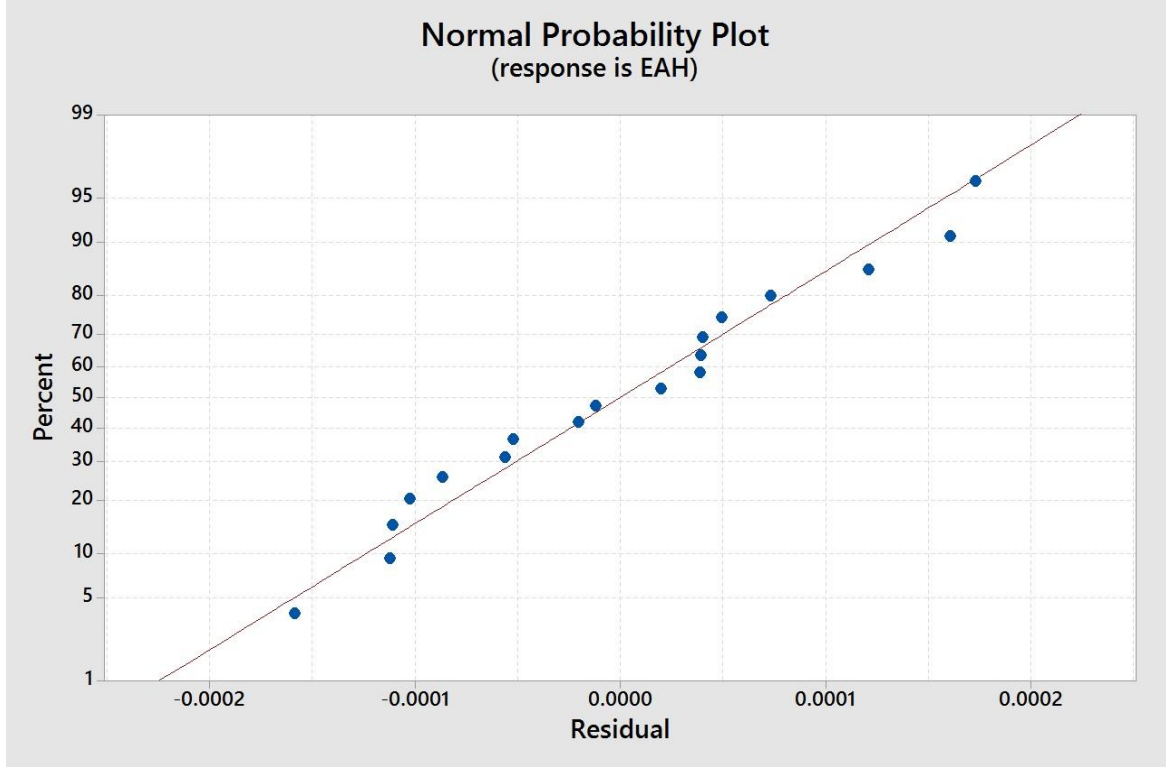
Şekil 7.12. İşleme parametrelerin İİH üzerindeki etkisi



Şekil 7.13. İşleme parametrelerin İİH üzerindeki etkileri

7.5.2. Elektrot aşınma hızı (EAH)

Şekil 7.14’de görüldüğü gibi EAH değerleri normal dağılım değerlerine yakındır. Yapılan varyans analiz değerleri ise çizelge 7.4’ de sunulmuştur.



Şekil 7.14. EAH ‘ın normal dağılım eğrisi

Çizelge 7.4. EAH varyans analiz sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F-Değeri	P-Değeri
İşleme Tipi	1	0,000000	0,000000	2,37	0,150
Akım	2	0,000003	0,000001	100,10	0,000
T-H %	2	0,000000	0,000000	3,07	0,084
Hata	12	0,000000	0,000000	-	-
Toplam	17	0,000003	-	-	-

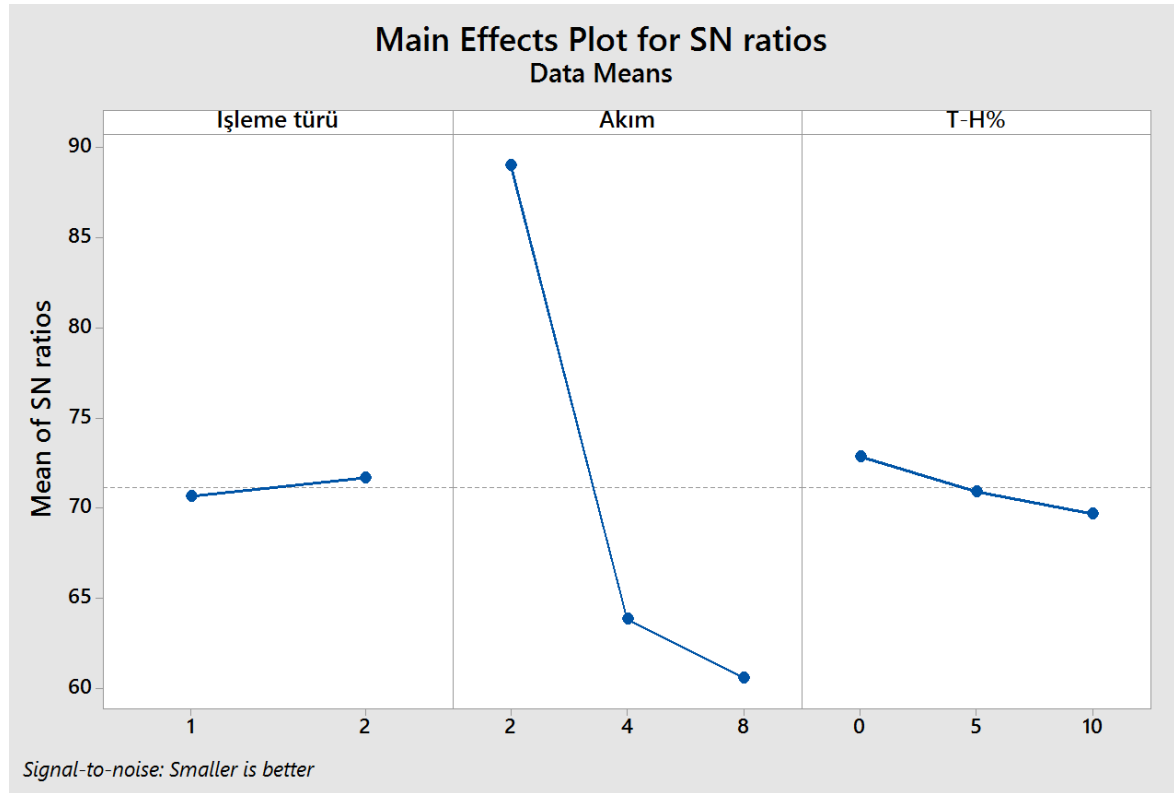
Analiz sonucunda elde edilen denklem ise Eş 7.2 ‘de verilmiştir. Denklem katsayıları çizelge 7.5 ‘de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 \text{EAH} = & 0,000546 + 0,000042 \text{ İşleme Türü}_1 - 0,000042 \text{ İşleme Türü}_2 - 0,000510 \\
 & \text{Akım}_2 + 0,000098 \text{ Akım}_4 + 0,000412 \text{ Akım}_8 - 0,000090 \text{ T-H \%}_0 + 0,000018 \text{ T-H} \\
 & \%_5 + 0,000072 \text{ T-H \%}_{10}
 \end{aligned}
 \quad (7.2)$$

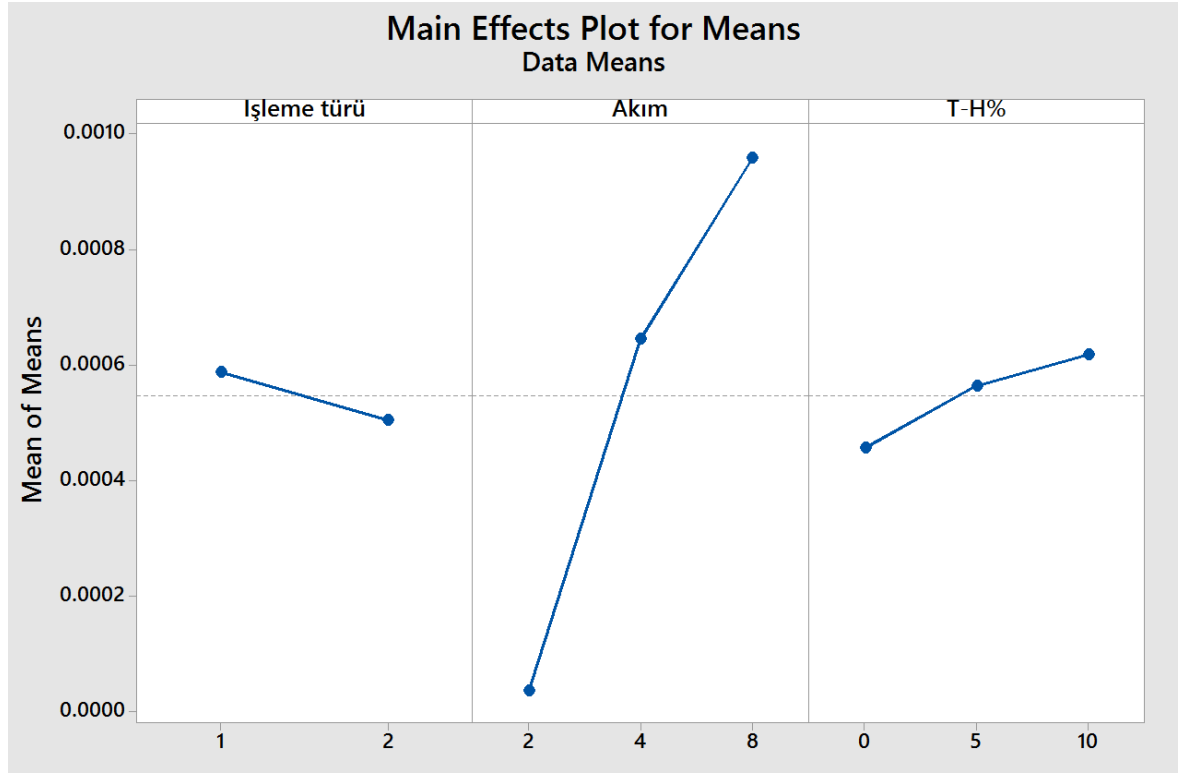
Çizelge 7.5. EAH denklemi için elde edilen katsayılar

Terim	Katsayı	SH Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VBF
Sabit	0,000546	0,000027	20,20	0,000	-
İşleme Tipi	-	-	-	-	-
1.0	0,000042	0,000027	1,54	0,150	1,00
Akım	-	-	-	-	-
2	-0,000510	0,000038	-13,34	0,000	1,33
4	0,000098	0,000038	2,57	0,025	1,33
T-H %	-	-	-	-	-
0	-0,000090	0,000038	-2,34	0,037	1,33
5	0,000018	0,000038	0,47	0,647	1,33

İşleme parametrelerinin Elektrot aşınma hızına olan etkisi Şekil 7.15 ve Şekil 7.16 ‘da görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda elektrot aşınma hızını etkileyen en önemli faktörün boşalım akımı olduğu tespit edilmiştir. Bunu sırayla takviye-hacim oranı ve işleme türü takip etmektedir. En düşük EAH, 2A boşalım akımı ve %0 takviye-hacim oranı kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca toz katkılı EEİ yöntemi kullanılarak daha düşük EAH elde edilmiştir.



Şekil 7.15. İşleme parametrelerinin EAH üzerindeki etkisi



Şekil 7.16. İşleme parametrelerin EAH üzerindeki etkisi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Vakumlu infiltrasyon yönteminin basit ve ekonomik olması, bu yöntemin metal matrisli kompozitlerin üretiminde geniş bir uygulama alanına sahip olmasına neden olmuştur. Tez çalışmasında, %0, %5 ve %10 takviye-hacim oranlarında B₄C seramik parçacık takviyeli ve Al matrisli kompozitlerin vakumlu infiltrasyon yöntemiyle üretilmesi üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan ilk denemelerde matris malzemesi olarak Al5154 alaşımı kullanılmıştır. Al5154 alaşımının B₄C takviyeli kompozitin vakumlu infiltrasyon yöntemi ile üretiminde başarılı üretimin kısmen veya hiç gerçekleşmemiş olmasından, Al5154'ün ıslatma özelliklerinin B₄C ile uyumlu olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, özellikle EEİ yöntemi ile işleme sırasında sıkça kararsız işleme ve ark oluşumunun meydana gelmesinden ötürü matris malzemesi olarak daha yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip Al2014 alaşımı seçilmiştir. Bunun yanı sıra kullanılan tozların (B₄C, Al2014) atmosfer kontrollü fırında kurutularak muhtemel nemlenme ve oksitlenmenin engellenmesi sağlanmıştır. Homojen dağılımın sağlanması amacıyla üç boyutlu karıştırıcıda yeterli süre zarfında karıştırılmasıyla homojen dağılımlı kesit kompozisyonu elde edilmiştir.

İşparçası yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntülerinden de görülebileceği üzere takviye ve matris arasında yeterli ıslatma meydana gelip MMK üretimi başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen kompozitler üzerinde yapılan aşınma testi sonucunda, takviye-hacim oranı arttıkça aşınma miktarının (ağırlık kaybının) ve aşınma katsayısının arttığı görülmüştür. Aşınma testinden alınan sonuçların uyumluluğu beklendiği şekilde takviye hacim oranının artışına göre aşınma miktarının azalışı ve sürtünme katsayısının artış göstermesi, üretilen kompozitin homojen dağılıma sahip olduğunu ve başarılı bir kompozit üretiminin gerçekleştiğini kanıtlar nitelikte olduğunu göstermektedir.

Al5154 matrisli kompozitlerin işlenmesinde yaşanan sorunlar nedeniyle, malzeme kaldırma işlemine Al2014 alaşımı kullanılarak devam edilmiştir. Al2014 matris malzemesi olarak kullanıldığı deneylerde, daha yüksek elektrik iletkenlik özelliği nedeniyle işleme sırasında daha kararlı işleme elde edilmiştir. Genel olarak takviye-hacim oranı arttıkça İİH düşmekte olup, EAH artmıştır. Boşalım akımının artması ise İİH ve EAH 'nın artmasına sebep olmuştur.

%0 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerin işlenmesi sırasında diğer takviye-hacim oranlara sahip kompozitlere kıyasla daha yüksek İİH elde edilmiştir. Bunun sebebi sert seramik parçacıkların kompozitin yapısında bulunmaması ve malzeme kaldırmanın hızlı şekilde ilerlemesi olarak açıklanabilmektedir. Seramik parçacıkların bulunmaması ayrıca EAH 'da etkilemektedir. Bu kapsamda işleme sırasında takım elektrot sert parçacıklara rastlamayıp zorlanmadan ve daha kısa boşalım sürelerinde malzeme kaldırma işlemi gerçekleşmiştir.

%5 takviye-hacim oranına sahip deneylerde ise %0 takviye-hacim oranına kıyasla daha düşük İİH elde edilmiştir. Bunun sebebi işleme sırasında rastlanılan seramik parçacıkları ve bu parçacıkların sebep olduğu kararsız işlemedir. Bu deneylerde özellikle işleme sırasında meydana gelen yüksek sıcaklıklar ve rastlanılan sert seramik parçacıklar sebebiyle %0 takviye-hacim oranına kıyasla daha yüksek EAH elde edilmiştir. Bazı deneylerde düşük seramik parçacık yoğunluğu nedeniyle beklenen değerlerden daha yüksek İİH ve daha düşük EAH meydana gelmiştir.

En düşük İİH ve en yüksek EAH değerleri %10 takviye-hacim oranına sahip kompozitlerin işlenmesi sırasında elde edilmiştir. Bu deneylerde sert seramik parçacıkların daha yüksek oranda bulunması, işleme sırasında takımın zorlanması ve yüksek sıcaklıkların meydana gelmesi ve yüksek işleme hızlarında aşınan malzemenin işleme boşluğundan yeterli miktarda uzaklaşmaması gibi sebeplerden dolayı daha düşük işleme hızı ve takım aşınması elde edilmiştir.

İşparçaları TK/EEİ yöntemiyle işlenerek elde edilen sonuçlar geleneksel EEİ yöntemiyle kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda İİH ve EAH değerlerinde iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir.

TK/EEİ yöntemi kullanılarak İİH ve EAH değerlerinde iyileşme görülmüştür. TK/EEİ sırasında uygulanan gerilim sonucu elektrik iletken tozlar elektrotlar arasında köprü oluşturarak kıvılcımların daha kolay oluşmasına yol açar. Bu olay işleme sırasında yüksek sıcaklıkların meydana gelmemesi ve sonuç olarak yüksek işleme hızları ve düşük elektrot aşınmanın elde edilmesine sebep olur. Özellikle geleneksel EEİ ve TK/EEİ değerleri arasındaki fark, yüksek akımların uygulandığı ve yüksek sıcaklıkların olduğu deneylerde daha belirgin şekilde görülmektedir.

Deneylerden elde edilen sonuçların analiz edilebilmesi ve performans kriterleri üzerinde hangi işlem parametresinin daha etkili olduğunun belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Analiz sonucunda İİH ve EAH değerleri için normal dağılım değerlerine yakın değerlerin elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca İİH ve EAH değerlerini etkileyen en önemli faktörün boşalım akımı olduğu tespit edilmiştir. Bunu sırayla takviye-hacim oranı ve işleme türü takip etmektedir.

8.2. Öneriler

Vakumlu infiltrasyon yönteminde vakum değerinin 1 atm basıncı geçmemesi, bu yöntemin yüksek T-H oranlarındaki üretim işlemleri için uygun olmamasına neden olmuştur. Bu sebeple yüksek T-H oranlarındaki üretim denemelerinde eksik infiltrasyon meydana gelmektedir. Yüksek T-H oranlarına sahip kompozitlerin üretiminde yüksek basınçların uygulanabildiği basınçlı infiltrasyon yöntemi araştırılabilir. Ayrıca, vakumlu infiltrasyon sırasında tam infiltrasyonun elde edilmesi için düşük oranlarda Mg ilavesi yapılabilmektedir [2].

EEİ yöntemi sırasında dielektrik sıvısına grafit tozunun ilavesi işleme parametrelerinin iyileşmesine sebep olmuştur. Farklı oranlarda grafit tozunu dielektrik sıvısına ilave ederek işleme parametrelerindeki değişimler araştırılabilir. Ayrıca nano boyutlardaki grafit tozları kullanılarak daha iyi sonuçların elde edileceği konusunda öngörümüz bulunmaktadır. Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Hu, Z., Tong, G., Lin, D., Chen, C., Guo, H., Xu, J. and Zhou, L. (2016). Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites – a review. *Materials Science and Technology*, 32(9), 930-953.
2. Çalın, R. (2006). *Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Göller, G. (1997). *Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş Cu-C kompozitlerin tribolojik davranışının karakterizasyonu*. 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.
4. Couteau, O. and Schaller, R. (2003) Effect of fiber orientation on the transient damping in metal matrix composites. *Materials Science and Engineering*, 387(1), 862-866.
5. Dhandapani, S. P. Jayaram, V. and Surappa, M. K. (1994). Growth and microstructure of Al₂O₃ - SiC - Si(Al) composites prepared by reactive infiltration of silicon carbide preforms. *Acta Metallurgica et Materialia.*, 42, 649-656.
6. El-Hofy, H. A. (2005). *Advanced machining processes nontraditional and hybrid machining processes*. New York : McGraw-Hill Mechanical Engineering Series, 115-177.
7. Günay, M. (2009). *Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiC_p kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
8. Dileep, B. P. Ravikumar, V. and Vital, H. R. (2018). Mechanical and corrosion behavior of Al-Ni-SiC metal matrix composites by powder metallurgy. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12257-12264.
9. Bodukuri, A. K. Eswaraiah, K. and Rajendar, K. (2016). Fabrication of Al-SiC-B₄C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties. *Perspectives in Science*, 8, 428-431.
10. Çelik, Y. H., and Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B₄C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224.
11. Fathy, A., El-Kady, O. and Mohammed, M. (2015). Effect of iron addition on microstructure, mechanical and magnetic properties of Al-matrix composite produced by powder metallurgy route. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(1), 46-53.
12. Davidson, A. M. and Regener, D. (2000). A comparison of aluminium-based metal-matrix composites reinforced with coated and uncoated particulate silicon carbide. *Composites Science and Technology*, 60, 865–869.

13. Arik, H. (2004). Production and characterization of in situ Al_4C_3 reinforced aluminum-based composite produced by mechanical alloying technique. *Materials & Design*, 25(1), 31-40.
14. Karabulut, H. Çitak, R. and Çinici, H. (2013). Mekanik alaşımlama süresinin $\text{Al} + \%10 \text{ Al}_2\text{O}_3$ kompozitlerde eğme dayanımına etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(3), 635-643.
15. Patel, M., Singh, V., Singh, S. and Prasad, V. V. (2018). Micro-structural evolution during diffusion bonding of C-SiC/C-SiC composite using Ti interlayer. *Materials Characterization*, 135, 71-75.
16. Song, Ch., He, P., Lin, T., Wei, H. and Yang, W. (2014). Electroplating assisted diffusion bonding of ZrC-SiC composite for full ceramic joints. *Ceramics International*, 40(5), 7613-7616.
17. Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R. and Torabi Parizi, M. (2012). Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/ Al_2O_3 composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Materials & Design*, 34, 106-111.
18. Bobić, I., Ružić, J., Bobić, B., Babić, M. and Vencl, A. (2014). Microstructural characterization and artificial aging of compo-casted hybrid A356/SiC_p/Gr_p composites with graphite macroparticles. *Materials Science and Engineering*, 612, 7-15.
19. Sukumaran, K., Ravikumar, K. K., Pillai, S. G. K., Rajan, T. P. D., Ravi, M., Pillai, R. M. and Pai, B.C. (2008). Studies on squeeze casting of Al 2124 alloy and 2124-10% SiC_p metal matrix composite. *Materials Science and Engineering*, 490(1-2), 235-241.
20. Chen, W., Liu, Y., Yang, Ch., Zhu, D., and Li, Y. (2014). (SiC_p+Ti)/7075Al hybrid composites with high strength and large plasticity fabricated by squeeze casting. *Materials Science and Engineering*, 609, 250-254.
21. Leng, J., Wu, G., Zhou, Q., Dou, Z. and Huang, X. (2008). Mechanical properties of SiC/Gr/Al composites fabricated by squeeze casting technology. *Scripta Materialia*, 59(6), 619-622.
22. Chu, S. and Wu, R. (1999). The structure and bending properties of squeeze-cast composites of A356 aluminium alloy reinforced with alumina particles. *Composites Science and Technology*, 59, 157-162.
23. Pazhouhanfar, Y. and Eghbali, B. (2018). Microstructural characterization and mechanical properties of TiB₂ reinforced Al6061 matrix composites produced using stir casting process. *Materials Science and Engineering*, 710, 172-180.
24. Ravi, B. & Naik, B. B. and Prakash, J. U. (2015). Characterization of aluminium matrix composites (AA6061/B4C) fabricated by stir casting technique. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2984-2990.

25. Pul, M. (2010). *Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Çıtak, R., Çalın, R. and Pehlivanlı, Z. (2010). Effect of reinforcement volume ratio on thermal conductivity of MgO reinforced al matrix composite produced by vacuum infiltration method. *Asian Journal of Chemistry*, 22(5), 4054-4060.
27. Calin, R. and Cıtak, R. (2007). Designing of a powder compressing device with vibration and investigation of compressibility of MgO powders with this device. *Materials & Design*, 28(10), 2654-2657.
28. Pul, M., Küçüktürk, G., Çalın, R., and Seker, U. (2011). Effects of reinforcement volume fraction on the abrasive wear behaviour of Al—MgO composites produced by the vacuum infiltration method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(2), 84-90.
29. Pul, M., Çalın, R., Çıtak, R. and Şeker, U. (2011). Al matrisli MgO takviyeli kompozit malzemelerin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 81-88.
30. Çalın, R., Pul, M., Bican, O. and Küçüktürk, G. (2017). Effect of matrix temperature and powder size on the infiltration height of SiO₂-reinforced Al 7075 matrix composites produced by vacuum infiltration. *Science and Engineering of Composite Materials*, 24(1), 1-5.
31. Aksöz, S., Özdemir, T., Çalın, R. and Altınok, Z. (2013). Sinterleme, yaşlandırma ve kriyojenik ısıl işlemlerinin AA2014-B₄C kompozit yapısına ve mekanik özelliklerine etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 831-839.
32. Candan, S. (2009). An investigation on corrosion behaviour of pressure infiltrated Al—Mg alloy/SiCp composites. *Corrosion Science*, 51(6), 1392-1398.
33. Demir, A. and Altınok, N. (2004). Effect of gas pressure infiltration on microstructure and bending strength of porous Al₂O₃/SiC-reinforced aluminium matrix composites. *Composites Science and Technology*, 64(13-14), 2067-2074.
34. Şimşek, İ., Yıldırım, M., Özyürek, D. and Şimşek, D. (2018). Basıncsız infiltrasyon yöntemiyle üretilen SiO₂ takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 22(1), 81-85.
35. Pul, M., Çalın, R., Çıtak, R. and Şeker, U. (2009). Düşük takviyeli MgO-Al kompozitlerin vakumlu infiltrasyonunda takviye oranının infiltrasyon davranışına etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(3), 173-177.
36. Assar, M. (1999). Fabrication of metal matrix composite by infiltration process—part 2: experimental study. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 152–158.
37. Liu, B., Liu, M. and Zhao, Z. (2011). Infiltration mechanism in SiCp/aluminum-matrix composite prepared by nonpressure. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(11), 1339-1345.

38. Yao, Y. and Chen, L. (2014). Processing of B₄C particulate-reinforced magnesium-matrix composites by metal-assisted melt infiltration technique. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(7), 661-665.
39. Ates, S., Uzun, İ., Calin, R. and Citak, R. (2012). Effect of infiltration pressure on thermal conductivity of Al 2014 matrix composite powered by silicon carbide. *Asian Journal of Chemistry*, 24, 76-80.
40. Guan, J., Qi, L., Liu, J., Zhou, J. and Wei, X. (2013). Threshold pressure and infiltration behavior of liquid metal into fibrous preform. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(11), 3173-3179.
41. Khademian, N. and Gholamipour, R. (2013). Effects of infiltration parameters on mechanical and microstructural properties of tungsten wire reinforced Cu₄₇Ti₃₃Zr₁₁Ni₆Sn₂Si₁ metallic glass matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(5), 1314-1321.
42. Zahedi, A. M., Javadpour, J., Rezaie, H. R. and Mazaheri, M. (2011). The effect of processing conditions on the microstructure and impact behavior of melt infiltrated Al/SiCp composites. *Ceramics International*, 37(8), 3335-3341.
43. RAO, B. S. and Jayaram, V. (2001). Pressureless infiltration of Al–Mg based alloys into Al₂O₃ preforms: mechanisms and phenomenology. *Acta materialia*, 49, 2373–2385.
44. Leon-Patiño, C. A. and Drew, R. A. L. (2005). Role of metal interlayers in the infiltration of metal–ceramic composites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 9(4-5), 211-218.
45. Daoud, A. (2005). Microstructure and tensile properties of 2014 Al alloy reinforced with continuous carbon fibers manufactured by gas pressure infiltration. *Materials Science and Engineering*, 391(1-2), 114-120.
46. Ren, S., He, X., Qu, X., Humail, I. and Li, Y. (2007). Effect of Mg and Si in the aluminum on the thermo-mechanical properties of pressureless infiltrated SiCp/Al composites. *Composites Science and Technology*, 67(10), 2103-2113.
47. Joel, J. and Anthony Xavior, M. (2018). Aluminium alloy composites and its machinability studies; A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13556-13562.
48. El-Gallab, M. and Sklad, M. (1998). Machining of Al:SiC particulate metal-matrix composites part I: Tool performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 151-158.
49. Shoba, C., Ramanaiah, N., and Nageswara Rao, D. (2015). Effect of reinforcement on the cutting forces while machining metal matrix composites–An experimental approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(4), 658-663.
50. Kannan, S., Kishawy, H. and Balazinski, M. (2006). Flank wear progression during machining metal matrix composites. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(3), 787-791.

51. Razavykia, A., Farahany, S. and Yusof, N. M. (2015). Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg₂Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach. *Measurement*, 76, 170-182.
52. Suresh, P., Marimuthu, K., Ranganathan, S. and Rajmohan, T. (2014). Optimization of machining parameters in turning of Al-SiC-Gr hybrid metal matrix composites using grey-fuzzy algorithm. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(9), 2805-2814.
53. Kılıçkap, E., Çakır, O., Aksoy, M. and İnan, A. (2005). Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 862-867.
54. De Silva, A. K. M., Altena, H. S. J. and Mc Geough, J. A. (2000). Precision ECM by process characteristic modeling. *CIRP Annals*, 49, 151-155.
55. Senthilkumar, C., Ganesan, G. and Karthikeyan, R. (2009). Study of electrochemical machining characteristics of Al/SiC_p composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 256-263.
56. Osman, H. M., and Abdel-Rahman, M. (1993). Integrity of surface produced by ECM. *Journal of Materials Processing Technology*, 37, 667-677.
57. Senthilkumar, C., Ganesan, G. and Karthikeyan, R. (2011). Parametric optimization of electrochemical machining of Al/15%SiC_p composites using NSGA-II. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 2294-2300.
58. Muller, F. and Monaghan, J. (2000). Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, 1351-1366.
59. Pramanik, A. (2014). Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86, 44-61.
60. Wang, J., Kuriyagawa, T. and Huang, C. Z. (2003). An experimental study to enhance the cutting performance in abrasive waterjet machining. *Machinig Science and Technology*, 7, 191-207.
61. Hashish, M. (1995). Waterjet machining of advanced composites. *Material and Manufacturing Process*, 10, 1129-1152.
62. Srinivas, S. and Babu, N. R. (2012). Penetration ability of abrasive waterjets in cutting of aluminum-silicon carbide particulate metal matrix composites. *Machining Science and Technology*, 16, 337-354.
63. Dubey, A. K. and Yadava, V. (2008). Laser beam machining - a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 609-628.
64. Hong, L., Vilar, R. and Youming, W. (1997). Laser beam processing of a SiC particulate reinforced 6061 aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Science*, 32(20), 5545-5550.

65. Liu, J. W. and Yue, T. M. (2012). Electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites. *Woodhead Publishing Limited*, 242–265.
66. Liu, J. W., Yue, T. M., and Guo, Z. N. (2013). Grinding aided electrochemical discharge machining of particulate reinforced metal matrix composites. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 68, 2349-2357.
67. Hocheng, H., Lei, W. T. and Hsu, H. S. (1997). Preliminary study of material removal in electrical discharge machining of SiC/Al. *Journal of Materials Processing Technology*, 813-818.
68. Kathiresan, M. and Sornakumar, T. (2010). EDM studies on aluminum alloy-silicon carbide composites developed by vortex technique and pressure die casting. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9, 79-88.
69. Singh, P. N., Raghukandan, K., Rathinasabapathi, M. and Pai, B. C. (2004). Electric discharge machining of Al–10%SiCP as-cast metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156,1653-1657.
70. Dhar, S., Purohit, R., Saini, N., Sharma, A. and Kumar, G. (2007). Mathematical modeling of electric discharge machining of cast Al–4Cu–6Si alloy–10wt.% SiCP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1-3), 24-29.
71. Prabu, M., Ramadoss, G., Narendersingh, P., Christy, T.V., and Eswaran, V. (2013). Electrical discharge machining of Al-TiB₂ with low-frequency vibrating tool. *Science and Engineering of Composite Materials*, 0, 1-8.
72. Senthil, P., Vinodh, S. and Singh, A. K. (2014). Parametric optimisation of EDM on Al-Cu/TiB₂ in-situ metal matrix composites using TOPSIS method. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 16, 80-94.
73. Prasanna, P., Sashank, T., Manikanta, B. and Aluri, P. (2017). Optimizing the process parameters of electrical discharge machining on AA7075 - SiC alloys. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8517-8527.
74. Shukla, M. and Dhakad, S. K. (2018). Optimisation of electrical discharge machining of Al-LM-6/ SiC/ B₄C composite: A grey relational approach. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19147-19155.
75. Kandpal, B. C., Kumar, J. and Singh, H. (2018). Optimization of electrical discharge machining AA6061/ 10 %Al₂O₃ composite using Taguchi optimization technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18946-18955.
76. Kar, Ch., Surekha, B., Jena, H. and Choudhury, S. (2018). Study of influence of process parameters in electric discharge machining of aluminum – red mud metal matrix composite. *Procedia Manufacturing*, 20, 392–399.
77. Singh Sidhu, S. and Singh Bains, P. (2017). Study of the recast layer of particulate reinforced metal matrix composites machined by EDM. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3243-3251.

78. Velmurugan, C., Subramanian, R., Thirugnanam, S. and Ananadavel, B. (2012). Experimental investigations on machining characteristics of Al 6061 hybrid metal matrix composites processed by electrical discharge machining. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8), 87-101.
79. Suresh Kumar, S., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., Parameswaran, P. and Mohandas, E. (2014). Electrical discharge machining of Al (6351)-5% SiC-10% B₄C hybrid composite: A grey relational approach. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2014, 1-7.
80. Gopalakannan, S., Senthilvelan, T. and Ranganathan, S. (2013). Statistical optimization of EDM parameters on machining of aluminum hybrid metal matrix composite by applying Taguchi based Grey analysis. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 72, 358-365.
81. Radhika, N., Sudhamshu, A. R. and Kishore Chandran, G. (2014). Optimization of electrical discharge machining parameters of aluminium hybrid composites using taguchi method. *Journal of Engineering Science and Technology*, 9, 502 - 512.
82. Higuchi, T., Furutani, K., Yamagata, Y. and Takeda, K. (1991). Development of pocket-size electro discharge machine. *Annals of CIRP*, 40, 203-206.
83. Lim, H., Wong, Y. S., Rahman, M. and Lee, E. M. K. (2003). A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 318-325.
84. Gang, L., Zhao, W., Hu, F. and Zhang, Y. (2006). *Development and Application of a Prototype Micro EDM Machine*. International Technology and Innovation Conference, 14-18.
85. Leera, R. and Somashekhar, S. (2016). Study of micro channels machined on copper plates using micro electro discharge machining process. *International Conference on Materials, Design and Manufacturing Process ICMDM*, 605-609.
86. Meena, V. and Azad, M. (2012). Grey relational analysis of micro-EDM machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 973-977.
87. Tiwary, A., Pradhan, B. and Bhattacharyya, B. (2015). Study on the influence of micro-EDM process parameters during machining of Ti-6Al-4V superalloy. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 76, 151-160.
88. Lin, Y., Tsao, C., Hsu C., Hung S., and Wen D. (2012). Evaluation of the characteristics of the microelectrical discharge machining process using surface response methodology based on the central composite design. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 62, 1013-1023.
89. Natarajan, N. and Suresh, P. (2014). Experimental investigations on the microhole machining of 304 stainless steel by micro-EDM process using RC-type pulse generator. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9-12), 1741-1750.

90. Pandey, A., Tiwary, K. and Dubey, A. K. (2014). Optimization of the Process Parameters in Micro-Electric Discharge Machining Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(9), 1-5.
91. Liu, H., Yan, B., Huang, F. and Qiu, K. (2005). A study of the characterization of high nickel alloy micro-holes using microEDM and their application. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 418-426.
92. Hyun-Seok, T., Chang-Seung, H., Dong-Hyun, K., Ho-Jun, L., Hae-June, L. and Myung-Chang, K. (2009). Comparative study on discharge conditions in micro-hole electrical discharge machining of tungsten carbide (WC-Co) material. *Transactions of Nonferrous Materials Society of China*, 19, 114-118.
93. Jahan, M., Wong, Y. and Rahman, M. (2009). A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1706-1716.
94. Ekmekci, B., Sayar, A., Opoz, T. and Erden, A. (2009). Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(10), 105030.
95. Schubert, A., Zeidler, H., Hahn, M., Hackert-Oschatzchen, M. and Schneider, J. (2013). Micro-EDM milling of electrically nonconducting zirconia ceramics. *Procedia CIRP*, 6, 297-302.
96. Ali, M. (2009). Fabrication of microfluidic channel using micro end milling and micro electrical discharge milling. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 4(1), 93-97.
97. Maity, K. and Singh, R. (2012). An optimisation of micro-EDM operation for fabrication of micro-hole. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 61, 1221-1229.
98. Prihandana, G., Mahardika, M., Hamdi, M., Wong, Y. and Mitsui, K. (2009). Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-processes-Taguchi approach. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 1035-1041.
99. Pradhan, B. and Bhattacharyya, B. (2008). Improvement in microhole machining accuracy by polarity changing technique for microelectrode discharge machining on Ti-6Al-4V. *Journal of Engineering Manufacture*, 222, 163-173.
100. Opoz, T., Ekmekci, B. and Erden, A. (2009). An experimental study on the geometry of microholes in microelectric discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 24, 1236-1241.
101. Puri, A. B. and Bhattacharyya, B. (2003). An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 151-159.

102. Patil, N. G. and Brahmkankar, P. K. (2010). Determination of material removal rate in wire electro-discharge machining of metal matrix composites using dimensional analysis. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 5, 599-610.
103. Kumar, A., Kumar, V. and Kumar, J. (2015). Semi-empirical model on MRR and overcut in WEDM process of pure titanium using multi-objective desirability approach. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37, 689-721.
104. Nilesh, G. P. and Brahmkankar, P. K. (2014). Some studies into wire electro-discharge machining of alumina particulate-reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36, 335-346.
105. Satishkumar, D., Kanthababu, M., Vajjiravelu, V., Anburaj, R., Sundarrajan, N. and Arul, H. Investigation of wire electrical discharge machining characteristics of Al6063/SiC_p composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(9-12), 975-986.
106. Wong, Y. S., Lim, L. C., Rahuman, I. and Tee, W. M. (1998). Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 79, 30-40.
107. Chow, H., Yan, B. and Huang, F. (1999). Micro slit machining using electro-discharge machining with a modified rotary disk electrode (RDE). *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 161-166.
108. Tzeng, Y. F. and Lee, C. Y. (2001). Effects of powder characteristics on electrodischarge machining efficiency. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 17, 586-592.
109. Yih-fong, T. and Fu-chen, C. (2005). Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 385-391.
110. Chen, S., Lin, M., Huang, G. and Wang, C. (2014). Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized water mixed with titanium powder as dielectric solvent. *Applied Surface Science*, 311, 47-53.
111. Janmanee, P. and Muttamara, A. (2012). Surface modification of tungsten carbide by electrical discharge coating (EDC) using a titanium powder suspension. *Applied Surface Science*, 258, 7255-7265.
112. Marashi, H., Sarhan, A. A. D. and Hamdi, M. (2015). Employing Ti nano-powder dielectric to enhance surface characteristics in electrical discharge machining of AISI D2 steel. *Applied Surface Science*, 357, 892-907.
113. Kumar, S. and Batra, U. (2012). Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric. *Journal of Manufacture Processes*, 14, 35-40.

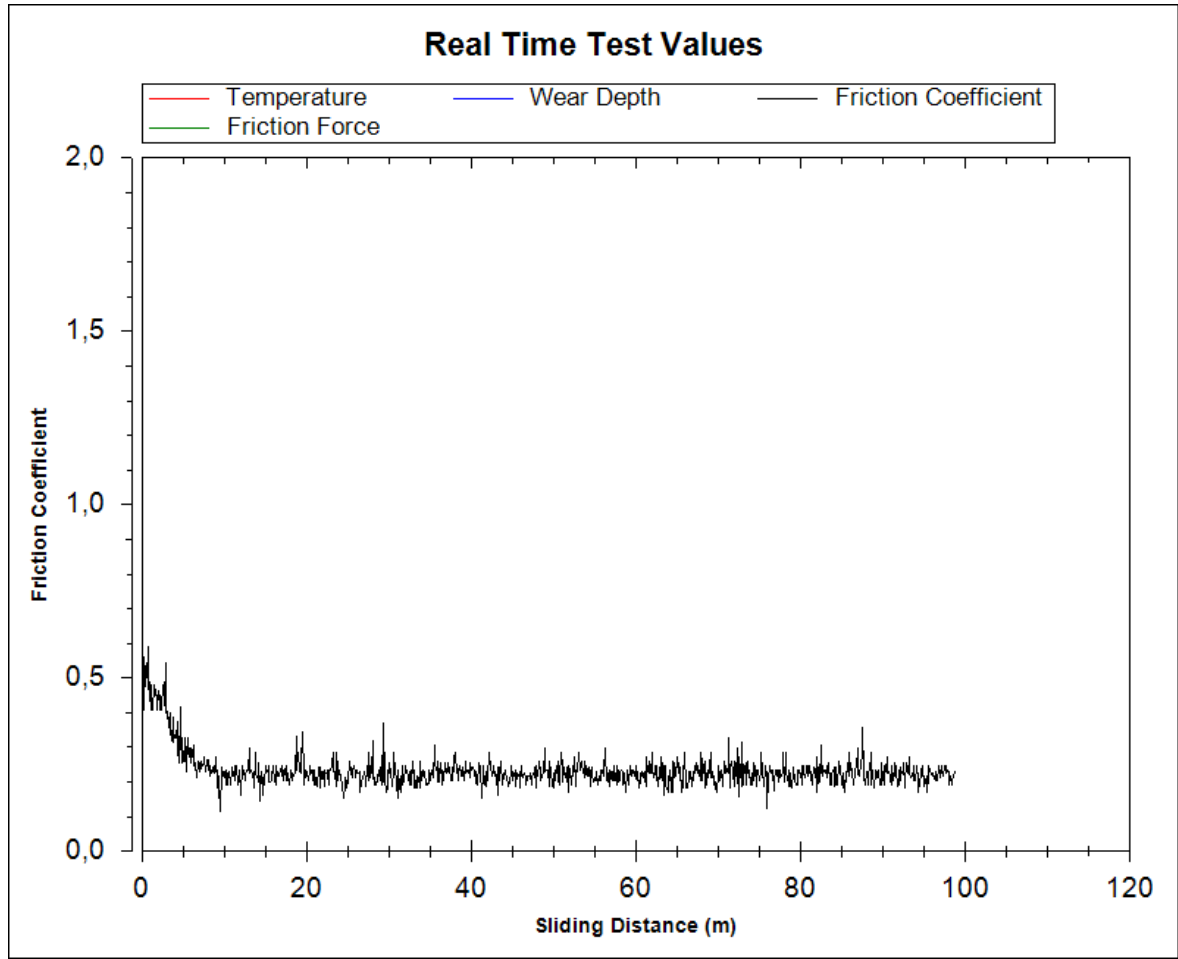
114. Kibria, G. and Bhattacharyya, B. (2010). *Analysis on geometrical accuracy of microhole during micro-EDM of Ti-6Al-4V using different dielectrics*. International Conference on Advanced Materials Processes Technology, 155-160.
115. Chen, Y. F., and Lin, Y. C. (2009). Surface modifications of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4343-4350.
116. Jeswani, M. L. (1981). Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. *Wear*, 70(2), 133-139.
117. Singh, A. K. and Kumar, S. and Singh, V. P. (2015). Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co 605 by EDM process. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 77, 99-106.
118. Jahan, M. P., Rahman, M. and Wong, Y. S. (2010). Study on the nano-powder-mixed sinking and milling micro-EDM of WC-Co. *International Journal of advanced manufacturing technology*, 53, 167-180.
119. Sidhu, S. S., Batish, A. and Kumar, S. (2014). Study of Surface Properties in Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites (MMCs) Using Powder-Mixed Electrical Discharge Machining (EDM). *Materials and Manufacturing Processes*, 29(1), 46-52.
120. Hu, F. Q., Cao, F. Y., Song, B. Y., Houa, P. J., Zhang, Y., Chen, K. and Wei, J.Q. (2013). Surface properties of SiCp/Al composite by powder-mixed EDM. *Procedia CIRP*, 6, 101-106.
121. Dubey, V. and Singh, B. (2018). Study of material removal rate in powder mixed EDM of AA7075/B₄C composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7466-7475.
122. Talla, G., Sahoo, D., Gangopadhyay, S. and Biswas, C. K. (2015). Modeling and multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining process of aluminum/alumina metal matrix composite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 369-373.
123. Kumar, H. and Davim, J. P. (2010). Role of powder in the machining of Al-10%SiC_p metal matrix composites by powder mixed electric discharge machining. *Journal of Composite Materials*, 45(2), 133-151.
124. Agrawal, A., Dubey, A. K. and Shrivastava, P. K. (2013, August). *Modeling and optimization of tool wear rate in powder mixed EDM of MMC*. Paper presented at the 2nd International Conference on Mechanical and Robotics Engineering, Toronto.
125. Roy, C., Syed, K. H. and Kuppan, P. (2016). Machinability of Al/ 10%SiC/ 2.5%TiB₂ metal matrix composite with powder-mixed electrical discharge machining. *Procedia Technology*, 25, 1056-1063.
126. Haghshenas, M. (2016). Metal–Matrix Composites. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-27.

127. Nishida, Y. (2013). *Introduction to Metal Matrix Composites Fabrication and Recycling*. Tokyo: Springer, 27-111.
128. Hayashi, T., Ushio, H. and Ebisawa, M. (1989). The properties of hybrid fiber reinforced metal and its application for engine block. *SAE paper*, 98(5), 506-515.
129. Yamauchi, T. (1991). Development of SiC whiskers reinforced piston. *Society of Automotive Engineers*, 38, 92-98.
130. Angelo, P. C. and Subramanian, R. (2009). *Powder Metallurgy Science, Technology and Applications*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 1-18.
131. Anish, R. Singh, G. R. and Sivapragash, M. (2012). Techniques for processing metal matrix composite; A survey. *Procedia Engineering*, 38, 3846-3854.
132. Saenpong, P., Talangkun, S., Laonapakul, T. and Boonma, A. (2018). Microstructures and hardness of A356-SiC composites produced by the mechanical stir casting. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 9489-9496.
133. Gupta, K., Neelesh, K. J. and Laubscher, R. F. (2016). *Hybrid Machining Processes*. New York: Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 33-43.
134. Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K. P. and Schumacher, B. M. (2005). Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals*, 54(2), 64-87.
135. Gupta, K. (2017). *Advanced Manufacturing Technologies Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing*. Aveiro: Springer International Publishing.
136. Dhakar, D. and Dvivedi, A. (2016). Parametric evaluation on near-dry electric discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(4), 413-421.
137. Raju, L. and Hiremath, S. S. (2016). A state-of-the-art review on micro electro-discharge machining. *Procedia Technology*, 25, 1281-1288.
138. Çoğun, C. and Erden, A. (1987). Elektro Erozyon ile İşleme (EDM) Performansının Bilgisayar Yardımı ile Belirlenmesi ve Denetimi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 1(5), 206-212.
139. Pandey, P. C. and Shan, H. S. (1999). *Modern Machining Process*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 84-113.
140. Hocheng, H. (2012). *Machining technology for composite materials Principles and practice*. UK: Woodhead Publishing, 202-240.
141. K. Jain, V. (2002). *Advanced Machining Processes*. New Delhi: Allied Publishers, 126-186.
142. Singh, G., Singh, G., Singh, K., and Singla, A. (2017). Experimental studies on material removal rate, tool wear rate and surface properties of machined surface by powder mixed electric discharge machining. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1065-1073.

143. Kumar, A., Maheshwari, S., Sharma, Ch. and Beri, N. (2010). Research developments in additives mixed electrical discharge machining: A state of art review. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10), 1166-1180.
144. Kosolapova, T. Y. (1971). *Carbides properties, production, and applications*. Kiev: Plenum Press, 183-191.
145. Toptan, F. (2011). *Alüminyum matrisli B₄C partikül takviyeli aşınma direnci yüksek kompozit malzeme üretimi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
146. Küçüktürk, G. (2008). *Elektro erozyon ile iletken olmayan seramiklerin işlenmesi için yöntem geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
147. Liu, R., Wang, W., Chen, H. and Tan, M. (2018). Microstructure evolution and mechanical properties of micro-/nano-bimodal size B₄C particles reinforced aluminum matrix composites prepared by SPS followed by HER. *Vacuum*, 151, 39-50.
148. Dursun, T. and Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 862-871.
149. Li, P. W., Li, H. Z., Huang, L., Liang, X. P. and Zhu, Z. X. (2017). Characterization of hot deformation behavior of AA2014 forging aluminum alloy using processing map. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8), 1677-1688.
150. Bilir, H. (2014). *Al/SiC Kompozitlerin Karıştırmalı Döküm Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

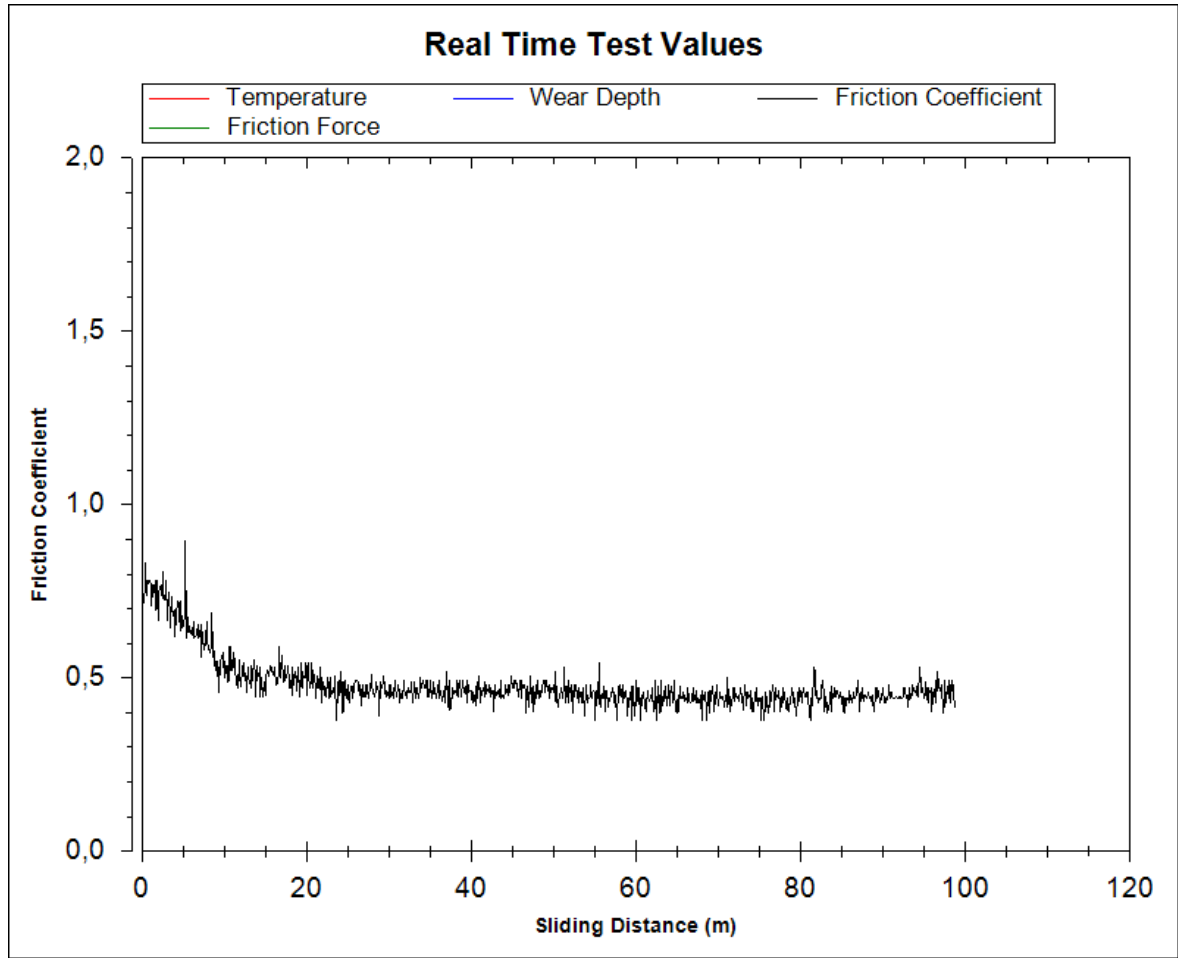
EKLER

EK-1. Aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayısı diyagramları



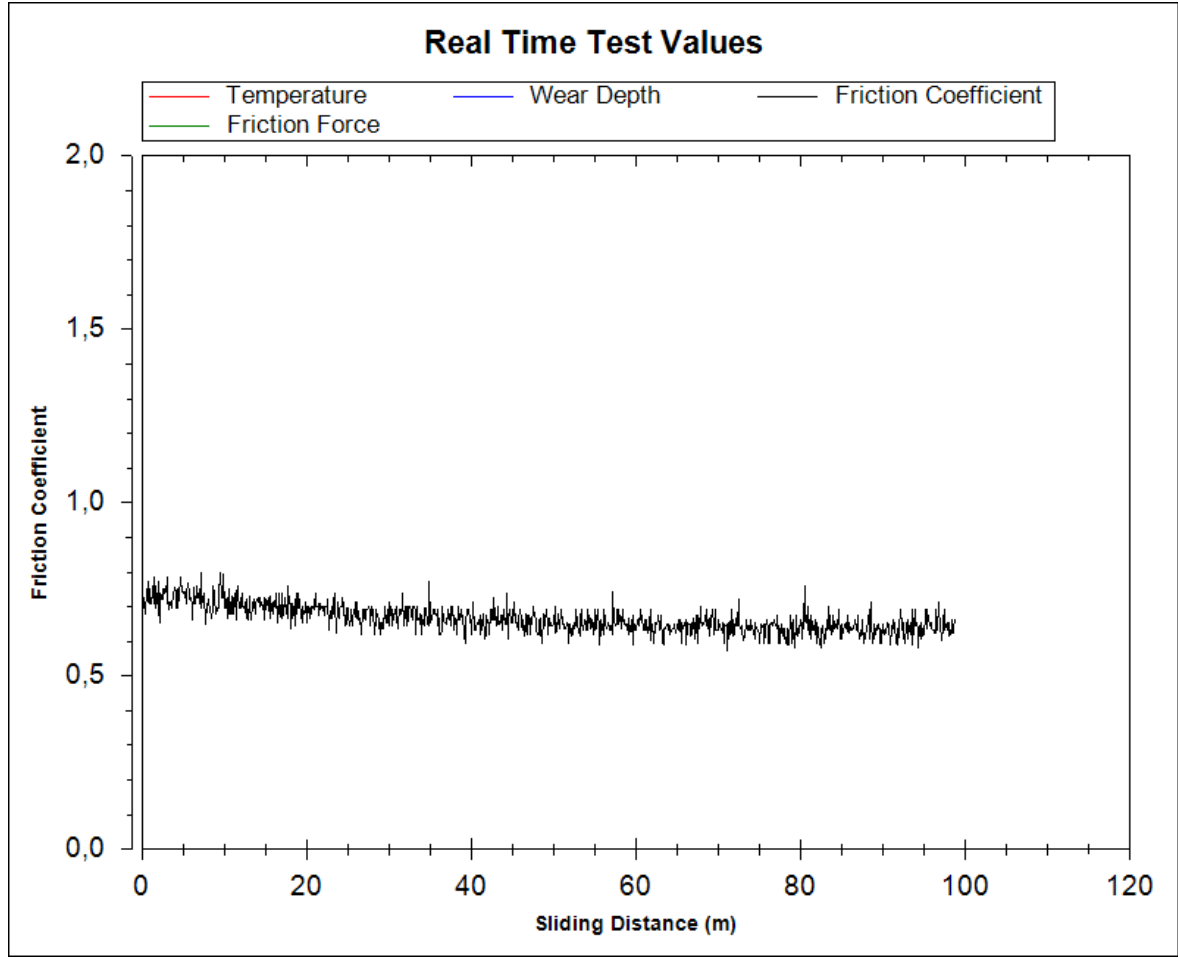
Resim E.1. %0 T-H oranına sahip işparçasından elde edilen aşınma katsayısı

EK-1. (devam) Aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayısı diyagramları



Resim E.2. %5 T-H oranına sahip işparçasından elde edilen aşınma katsayısı

EK-1. (devam) Aşınma testi sonucu elde edilen aşınma katsayısı diyagramları



Resim E.3. %10 T-H oranına sahip işparçasından elde edilen aşınma katsayısı

EK-2. Kullanılan işleme parametreleri ve elde edilen sonuçlar

Deney sayısı	İşleme türü	T-H %	Akım (A)	İİH (g/dak)	EAH (g/dak)
1	EEİ	0	2	0,00309680	0,00002779
2	EEİ	0	2	0,00331228	0,00002931
3	EEİ	0	2	0,00332891	0,00002513
4	EEİ	0	4	0,04546898	0,00069975
5	EEİ	0	4	0,04795174	0,00065951
6	EEİ	0	4	0,05422941	0,00054705
7	EEİ	0	8	0,09219642	0,00083035
8	EEİ	0	8	0,09183050	0,00078813
9	EEİ	0	8	0,09030414	0,00077419
10	EEİ	5	2	0,00237426	0,00004966
11	EEİ	5	2	0,00335218	0,00004627
12	EEİ	5	2	0,00375278	0,00002224
13	EEİ	5	4	0,02424033	0,00071270
14	EEİ	5	4	0,03595061	0,00059259
15	EEİ	5	4	0,02653201	0,00065024
16	EEİ	5	8	0,05543225	0,00145161
17	EEİ	5	8	0,05712786	0,00090491
18	EEİ	5	8	-	-
19	EEİ	10	2	0,00276376	0,00005553
20	EEİ	10	2	0,00329332	0,00004374
21	EEİ	10	2	0,00328142	0,00004177
22	EEİ	10	4	0,02186545	0,00060543
23	EEİ	10	4	0,02996721	0,00055737
24	EEİ	10	4	0,02724840	0,00085031
25	EEİ	10	8	0,04105336	0,00133642
26	EEİ	10	8	0,04427272	0,00116666
27	EEİ	10	8	0,05080341	0,00123076
28	TK/EEİ	0	2	0,00440735	0,00002794
29	TK/EEİ	0	2	0,00418051	0,00002865
30	TK/EEİ	0	2	0,00422750	0,00002037
31	TK/EEİ	0	4	0,05462889	0,00056090
32	TK/EEİ	0	4	0,05927388	0,00063057
33	TK/EEİ	0	4	0,06361467	0,00056880
34	TK/EEİ	0	8	0,08512500	0,00072321
35	TK/EEİ	0	8	0,12540845	0,00067605
36	TK/EEİ	0	8	0,13597122	0,00060431
37	TK/EEİ	5	2	0,00412647	0,00003335
38	TK/EEİ	5	2	0,00394072	0,00003665
39	TK/EEİ	5	2	0,00455628	0,00002738
40	TK/EEİ	5	4	0,02840609	0,00049746
41	TK/EEİ	5	4	0,03090196	0,00059803
42	TK/EEİ	5	4	0,03771252	0,00088706
43	TK/EEİ	5	8	0,06968029	0,00075836
44	TK/EEİ	5	8	0,06672340	0,00080851
45	TK/EEİ	5	8	0,06662365	0,00090322
46	TK/EEİ	10	2	0,00359598	0,00005074
47	TK/EEİ	10	2	0,00368607	0,00004810
48	TK/EEİ	10	2	0,00467292	0,00003860
49	TK/EEİ	10	4	0,03292571	0,00066285
50	TK/EEİ	10	4	0,06696350	0,00059124
51	TK/EEİ	10	4	0,03007523	0,00073354
52	TK/EEİ	10	8	0,05758181	0,00094545
53	TK/EEİ	10	8	0,04812371	0,00103608
54	TK/EEİ	10	8	0,03521364	0,00113105

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : FARİD AHMADİNİA, Omid
 Uyuğu : İran
 Doğum tarihi ve yeri : 11.02.1992, Tabriz
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (553) 151 96 93
 e-mail : omid.farid.ahmadinia@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Tabriz Azad Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2014

Yabancı Dil

İngilizce

Farsça

Yayınlar

Farid Ahmadinia, O. (2018). *An investigation of material removal rate and tool wear rate in powder mixed EDM machining process of al2014 alloy reinforced with b4c composites*. The 18th International Conference on Machine Design and Production, Eskişehir, Turkey.

Hobiler

3D modelleme ve tasarım – Amatör futbolcu



GAZİ GELECEKTİR..