



**VAKUMLU İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ TİB2
PARÇACIK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ İLE İŞLENMESİ VE
İŞLEME PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

Javad JOUDİ

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Javad JOUDİ tarafından hazırlanan “VAKUMLU İNFİLTASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ TiB2 PARÇACIK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ İLE İŞLENMESİ VE İŞLEME PARAMETRELERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

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

Başkan: Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Makine 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: 04/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın 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 yararlı ve ığım 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.

.....
Javad JOUDİ
04/07/2019

VAKUMLU İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ TiB2 PARÇACIK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ İLE İŞLENMESİ VE İŞLEME PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Javad JOUDİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Metal Matrisli kompozitler (MMK) yüksek elastik modülü, yüksek aşınma direnci, yüksek mukavemet, ısıya karşı dirençli olan yeni geliştirilmiş malzemelerdendir. Yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi fiziksel özellikler MMK'lerin geleneksel işleme yöntemleri ile işlenmelerini zorlaştırmıştır. Geleneksel işleme yöntemlerini kullanarak çok sert seramik takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi seramik partiküllerinin aşındırıcı özelliği nedeni ile yüksek takım aşınmasına sebep olduğu bilinmektedir, aşınma ise takım ömrünü azaltmaktadır. Su jeti ve lazer ışını ile işleme gibi gelişmiş geleneksel olmayan işleme yöntemlerinde bu malzemelerin işlenmesinde uygulanmaktadır, fakat bu yöntemlerde takım maliyeti ve işparçanın boyutsal kısıtlamaları gibi problemler meydana çıkmaktadır. Bu nedenle, Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) Yöntemi ile üç boyutlu karmaşık şekilli geometrilerin geleneksel yöntemlere kıyasla, takım ve işparçası arasında bir temas olmaksızın işlenmesi bu yöntemi ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışma, TiB₂ ile takviye edilmiş Al 2014 metal matris kompozitin (MMK) EEİ Yöntemi ve toz-katkılı Elektro Erozyon ile İşleme (TKEEİ) Yöntem ile işlenebilirliği araştırılmıştır. %2, %4 ve %8 TiB₂ oranı ile takviye edilmiş üç farklı Al 2014 kompozit numunesi, vakumlu infiltrasyon yöntemi kullanılarak optimum koşullarda üretilmiştir. Farklı takviye hacim oranlarına sahip kompozit numunelerin, proses parametrelerine bağlı olarak işlenebilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, TiB₂ içeriğinin işparça işleme hızı (İİH) ve takım aşınma hızı (TAH) üzerindeki etkisini belirlemek için farklı akımlar ve takviye oranları ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, İİH ve TAH karşılaştırıldığında TKEEİ yönteminin EEİ yöntemine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Uygulanan akım ve takviye oranı da İşparça İşleme Hızı (İİH) üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda, uygulanan akımın artmasıyla birlikte İİH'nin arttığı ancak İİH'nin daha yüksek takviye oranlarında azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek akımlar ve takviye oranlarında, takım aşınma hızının arttığı da görülmüştür. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ayrıca araştırılmıştır. Uygulanan akımın ve takviye oranının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmuştur. Elde edilen sonuçlarla ANOVA analizi yapılmış, parametrelerin yüzde olarak etkileri belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Metal matris kompozitler, elektro erozyon ile işleme, işparça işleme hızı, takım aşınma hızı, ANOVA

Sayfa Adedi : 131

Danışman : Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MACHINING CHARACTERISTICS FOR
AL2014 ALLOY REINFORCED WITH TiB₂ COMPOSITES IN POWDER-MIXED EDM

(M. Sc. Thesis)

Javad JOUDI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Metal Matrix Composites (MMC) are newly developed materials with high elastic modulus, high abrasion resistance, high strength, heat resistance. Physical properties such as high hardness and abrasion resistance make it difficult for MMCs to be processed with conventional processing methods. Processing of very hard composite materials using conventional machining methods has resulted in high tool wear due to the abrasive nature of reinforcement particles, which reduces tool life. In advanced non-traditional machining methods such as water jet machining and laser beam machining, these materials are applied in machining, but in these methods, there are problems such as tool cost and work piece dimensional constraints. This study investigated the processing properties of TiB₂-reinforced Al 2014 metal matrix composite (MMC) with electro-discharge machining (EDM) and powder-mixed electro-discharge machining (PMEDM). Three different Al 2014 composite samples supplemented with 2%, 4% and 8% TiB₂ were produced under optimum conditions using a vacuum infiltration method. Composite samples with different reinforcement volume ratios were examined to show the effect of different reinforcement ratios and different process parameters on the machinability of MMKs. The experiments were carried out with different currents and reinforcement ratios to determine the effect of TiB₂ content on the workpiece speed (HR) and tool wear rate (TAH). When the results obtained from the experiments are compared, it is seen that when compared to İHI and TAH, the method of TEEI is better than EEI method. The applied current and the reinforcement rate also had a significant effect on the Workpiece Machining speed (IR) value. Studies have shown that with the increase of the applied current, İHI increases, however, İGE has decreased in higher reinforcement ratios. The results also show an increased tool wear rate at higher currents and reinforcement ratios. The effects of surface roughness on the processing parameters were also investigated. The increase in the applied current and the reinforcement rate caused the surface roughness to increase. Moreover, ANOVA analysis was performed on the results obtained in this study and the effects of the parameters as a percentage were determined. In addition, the regression equation obtained as a result of the analysis is given.

Science Code : 91417

Key Words : Metal matrix composites, electro discharge machining, material removal rate, tool wear rate, ANOVA

Page Number : 131

Supervisor : Assoc. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Araştırma sürecimin her aşamasında benden desteğini esirgemeyen ve bana rehber olan, süreç boyunca fikirlerime yol gösterici olan, bu süreçte elinden gelen tüm imkanları seferber eden, sadece akademik hayatta değil aynı zamanda sosyal hayatta da bana rehber olan değerli hocam Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e teşekkür ediyorum.

Ayrıca bu süreçte yardımlarını esirgemeyen tüm tez süreci boyunca maddi ve manevi desteklerini geçen çalışma süreci boyunca süreçle ilgili beni bilgilendiren sayın Prof. Dr. Recep ÇALIN ve Doç. Dr. Hakan GÜRÜN'e teşekkür ediyorum. Bunun yanı sıra gazi üniversitesi ve Kırıkkale üniversitesi bünyesinde tüm görevlilere bana emeği geçen her kese teşekkürlerimin sunuyorum.

En sonda yüksek lisans sürecinde her zaman benim arkamda olan, tüm zorluklarda bana yardım eden ve maddi ve manevi desteği olan annem ve babam başta olmak üzere aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Malzemeler ve Yapılan Araştırmalar	5
2.2. Elektro Erozyon ile İşleme Yöntemi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	12
2.3. Toz Katkılı Elektro Erozyon Yöntemi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	18
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	25
3.1. Metal Matris Kompozitlerin Tipleri.....	25
3.2 Metal Matris Kompozitlerin Özellikleri.....	26
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ	27
4.1. Sıvı Hal Prosesi	27
4.1.1. Döküm.....	28
4.1.2. İnfiltrasyon	29
4.1.3. Püskürtme çökeltisi	32
4.1.4. İn situ yöntemi	32
4.2. Katı hal prosesi.....	33
4.2.1. Toz metalurjisi yöntemi	33

Sayfa

4.2.2. Ekstrüzyon	34
4.2.3. Difüzyon Yapışması.....	35
5. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME.....	37
5.1. Elektro Erozyon İşlemenin Avantajları.....	37
5.2. İşleme Mekanizması.....	38
5.3. Elektro Erozyon ile İşleme Tezgâhı	40
5.3.1. Elektro Erozyon ile İşleme Elektrotları.....	40
5.3.2. Dielektrik Akışkanlar	41
5.4. Malzeme İşleme Hızları	42
5.5. Yüzey Tamlığı.....	44
5.6. Isıdan Etkilenmiş Bölge	44
5.7. Uygulamalar	45
5.7.1. Delme	45
5.7.2. Testereyle kesme	45
5.7.3. Küre işlemleri	45
5.7.4. Freze	45
5.7.5. Telle kesme	46
5.7.6. Taşlama	47
5.7.7. Tekstüre etme	47
6. TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ	49
6.1. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Yöntemin Tarihi.....	49
6.2. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Teknolojisi	50
6.3. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Uygulamaları	52
6.3.1. Mikro elektro erozyon işleme	52

6.3.2. Seramik takviyeli kompozit malzemelerinin işlenmesi	52
7. MALZEME VE METOD.....	55
7.1. Malzeme	55
7.2. İnfiltrasyon	56
7.2.1. Takviye hacim oranına göre hesaplamaların yapılması	56
7.2.2. Tozların kurutulması	58
7.2.3. Tozların karıştırılması	59
7.2.4. Cam tüplerin hazırlanması	61
7.2.5. Ana matrisin ergitilmesi	61
7.2.6. Vakumlama işlemi	63
7.2.7. İnfiltrasyon işlemi	63
7.2.8. İnfiltrasyon işlem parametreleri	65
7.3. Parçaların Hazırlanması	66
7.4. Elektro Erozyon ile İşleme Deneyleri	67
7.4.1. EEİ’de kullanılan tezgâh	67
7.4.2. Kullanılan elektrot.....	68
7.4.3. Kullanılan toz.....	69
7.5. Elektro Erozyon İşleme Parametreleri	69
7.5.1. Uygulanan akım	69
7.5.2. Kullanılan dielektrik sıvısı	70
7.6. Tez Süresi Boyunca Yapılan Ölçümler	70
7.7. İşparçaların resimlerin alınması	70
7.8. İşleme Parametreleri.....	71
7.9. Aşınma Deneylerinin Yapılması	71

Sayfa

8. DENEY SONUÇLARI	73
8.1. Aşınma Deney Sonuçları	73
8.2. Elde edilen sonuçların İİH'na olan etkilerinin incelenmesi	76
8.5. İşparçalarının Görüntülerinin İncelenmesi	89
8.5.1. Yüzey görüntülerinin incelenmesi	89
8.5.2. İşlemeden önce mikroyapı görüntülerinin incelenmesi	91
8.6. İşlemeden Sonra Alınan SEM Görüntülerin İncelenmesi	94
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	109
EK-1. Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri.....	110
EK-2. Abrasive aşınma testinden elde edilen grafikler	128
ÖZGEÇMİŞ	130

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Kullanılan elektrotların fiziksel özellikleri.....	41
Çizelge 6.1. Çeşitli katkı maddelerinin termofiziksel özellikleri.	51
Çizelge 7.1. Al 2014 alaşımın kimyasal bileşeni.....	55
Çizelge 7.2. Al 2014 ve TiB2 fiziksel ve elektriksel özellikleri.....	56
Çizelge 7.3. Her bir cam borusu için hesaplanan ağırlıklar.....	58
Çizelge 7.4. Tozların kurutulması için yapılan işlemler.....	58
Çizelge 7.5. TEEİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri	66
Çizelge 7.6. Grafit tozun malzeme özellikleri	69
Çizelge 7.7. Tüm deneylerde kullanılan ortak parametreler.....	71
Çizelge 7.8. Deneylerde kullanılan değişken parametreler	71
Çizelge 7.9. Aşınma testi için kullanılan parametreler	72
Çizelge 8.1. Aşınma deney sonuçları.....	74
Çizelge 8.2. Kullanılan işleme parametreleri ve yapılan deneylerin sırası.....	75
Çizelge 8.3. İİH varyans analiz sonuçları	80
Çizelge 8.11. Yüzey pürüzlülüklerinin varyans analiz sonuçları	84
Çizelge 8.12. Ra denklemi için elde edilen katsayılar	85
Çizelge 8.13. Ra denklemi için doğrulama deney sonucu	85
Çizelge 8.14. EEİ yöntemi ile yapılmış olan deneylerin sonuçları.....	87
Çizelge 8.15. TKEEİ yöntemi ile yapılmış olan deneylerin sonuçları	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Parçacık takviyeli MMK'lerin üretimi için geleneksel döküm yolu.....	28
Şekil 4.2. a) Savurmalı döküm işleminin şeması, (b) döner kalıp ve (c) dökümün enine kesiti.....	29
Şekil 4.3. MMK'lerin basınçsız infiltrasyonu: (a) Parçacık preformunun alaşımlı matris infiltrasyonu ve (b) metalik alaşımlı partikül ve seramik partikül preformunun saf matris ile infiltrasyonu.....	30
Şekil 4.4. Üç tip ekstrüzyon işlemi: (a) direkt, (b) konvansiyonel ve (c) hidrostatik. İkincisi, kalıp sürtünmesini en aza indirir.....	35
Şekil 5.1. Elektro erozyon ile işlemin ana faktörleri.....	37
Şekil 5.2. Elektro erozyon işlemede boşalmanın şematik gösterimi.....	38
Şekil 5.3. Elektro erozyon ile işleme tezgâhın ana bileşenleri.....	40
Şekil 5.4. Kullanılan farklı dielektrik yıkama modları.....	42
Şekil 5.5. EEİ performansını etkileyen parametreler.....	43
Şekil 5.6. Boşalma darbenin (akım) elektro erozyon işleminde yarattığı kraterler.....	43
Şekil 5.7. Boşalma süresinin elektro erozyon işlemede krater boyutu üzerindeki etkisi.....	44
Şekil 5.8. Elektro erozyon işleme, kalıp dalması ve frezeleme kalıbı.....	46
Şekil 5.9. Tel elektro erozyon işleme şeması.....	46
Şekil 6.1. TKEEİ deney düzeneğinin şeması.....	50
Şekil 6.2. Toz katkılı EEİ prensibi.....	52
Şekil 7.1. Takviye tozlarının serbest halde gözeneklerle beraber oluşturduğu hacim.....	57
Şekil 7.2. İnfiltrasyon sistemin şematik görüntüsü.....	62
Şekil 7.3. Vakum sistemi.....	63
Şekil 8.1. Aşınma sonucu takviye hacim oranının ağırlık kaybına olan etkisi.....	73
Şekil 8.2. Aşınma katsayısının takviye hacim oranıyla olan ilişkisi.....	74

Şekil**Sayfa**

Şekil 8.3. T-H %2 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması.....	76
Şekil 8.4. T-H %4 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması.....	77
Şekil 8.5. T-H %8 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması.....	78
Şekil 8.6. Tüm işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması.....	79
Şekil 8.7. İİH'ın normal dağılım eğrisi.....	79
Şekil 8.17. T-H %2 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 8.18. T-H %4 takviyeye sahip işparçaların EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerin karşılaştırılması.....	81
Şekil 8.19. T-H %8 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 8.20. Tüm işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlüklerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 8.21. Ra'ın normal dağılım eğrisi.....	84
Şekil 8.22. İşleme parametrelerinin ortalama Ra'ın SN oranlarına olan etkileri.....	86
Şekil 8.23. İşleme parametrelerinin ortalama Ra'ın SN oranları üzerinde etkileri.....	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 7.1. Tozların kurutululması için kullanılan fırın.....	59
Resim 7.2. Kurutulan tozların nem önleyici kaplarda yerleştirilmiş hali	60
Resim 7.3. Tozların karıştırılması için kullanılan cihaz	60
Resim 7.4. Toz karışımların cam tüplerin içine doldurulmuş hali.....	61
Resim 7.5. İnfiltrasyon işlemi için kullanılan ergitme ocağı	62
Resim 7.6. Deneyin infiltrasyon işlemi gerçekleştikten hemen sonra bekletilme şekli.....	64
Resim 7.7. İnfiltrate edilmiş deneylerin soğutma işlemi	64
Resim 7.8. İnfiltrate edilmiş deneylerin cam borulardan arandıktan sonraki hali.....	65
Resim 7.9. EEİ yönteminde kullanılan tezgâh düzeneyi	67
Resim 7.10. TKEEİ yönteminde kullanılan dielektrik tankı.....	68
Resim 7.11. EEİ’de kullanılan takımlar.....	69
Resim 7.12. Abrasiv aşınma deneyi için kullanılan cihaz	72
Resim 8.1. EEİ yöntemi ile işlenmiş bazı işparçalarının görüntüleri	89
Resim 8.2. EEİ yönteminde kullanılan bazı takımların görüntüleri	89
Resim 8.3. TKEEİ yöntemi ile işlenmiş bazı işparçalarının görüntüleri	90
Resim 8.4. TKEEİ yöntemimde kullanılan bazı takımların görüntüleri.....	90
Resim 8.5. T-H %2 takviye oranına sahip iş parçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri. a) 10x büyütme. b) 20x büyütmesi.....	91
Resim 8.6. T-H %2 takviye oranına sahip işparçasının 100x büyütmedeki görüntüsü	92
Resim 8.7. T-H %4 takviye oranına sahip işparçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri. a) 10x büyütme. b) 20x büyütmesi.....	92
Resim 8.8. T-H%4 takviye oranına sahip işparçasının 50x büyütmedeki görüntüsü	93
Resim 8.9. T-H %4 takviye oranına sahip işparçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri.	93

Resim**Sayfa**

- Resim 8.10. 150X büyüklüğünde 8A akımında EEİ yöntemi ile işlenmiş işparçalarında alınan SEM görüntüleri: a) T-H %2, b) T-H %4 ve c) T-H %8.94
- Resim 8.11. T-H %8 takviye oranına sahip farklı akımlarda EEİ yöntemi ile işlenmiş işparçalarında alınan SEM görüntüleri: a) 2 A, b) 4 A ve c) 8 A 94
- Resim 8.12. T-H %4 takviye oranına sahip 4A akımı ile işlenmiş işparçalarının SEM görüntüleri: a) EEİ ve b) TKEEİ 95

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

dak	Dakika
I_p	İşleme akımı
R_a	Yüzey pürüzlülüğü
T_{on}	Boşalma süresi
T_{off}	Bekleme süresi
T-H%	Takviye hacim oranı
μm	Mikrometre
V	Volt
μΩ	Mikro ohm
Ω-m	Ohm-metre
%wt	Ağırlıkça takviye oranı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AEM	Yardımcı elektrot yöntemi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CNT	Nanotüp karbon
EEİ	Elektro erozyon işleme
EWR	Elektrot aşınma oranı
İİH	İşparça işleme hızı
MMK	Metal matris kompozit
rpm	Dakikada dönme sayısı
TAH	Takım aşınma hızı
T-H	Takviye hacim oranı
TKEEİ	Toz katkılı elektro erozyon işleme
YP	Yüzey pürüzlülüğü

1. GİRİŞ

Son yirmi yılda, endüstrilerin ileri kompozit malzemelerin kullanımına doğru eğilimi artmıştır. Kompozit malzemeler, makine, havacılık, otomotiv, elektrik ve elektronik sektörlerinde kullanılmaktadır. Bunlar, balistik zırhlar, seramik kompozit otomobil frenler, dizel partikül filtreler, protez ürünler, piezo-seramik sensörler ve yeni nesil bilgisayar bellek gibi yaygın şekilde kullanılan ürünlerdir (Divecha, Fishman, ve Karmarkar, 1981; Schwartz, 1985). Kompozitler malzemeler mühendislik uygulamalarında metallerin performans sınırlarının ötesine geçmesine ve farklı mühendislik alanlarında metallerin kullanıldığı teknolojik alanlardaki kısıtlamaların üstesinden gelmektedir. Yüksek aşınma, korozyon ve sıcaklık direncine, yüksek basınç dayanımına, yüksek sertlik ve mukavemet özelliklerine sahiptirler (Schwartz, 1985). Bu özellikler, uygulama açısından önemli olmakla birlikte, kompozitlerin imal edilmesinin yanı sıra üretimini de zorlaştırdığından kompozitlerin kullanım alanı sınırlanmaktadır. Kompozitlerin işlenebilirliği için geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle ince cidarlı Kompozit malzemelerin mikro çatlaklar olmadan geleneksel imalat yöntemleriyle işlenebilmesinde zorluklar yaşanmaktadır (Fukuzawa, Mohri, Gotoh, ve Tani, 2009). Alışılmamış imalat yöntemleri, malzeme kaldırma mekanizmalarındaki farklılıkların dolaylı geleneksel işleme yöntemlerindeki dezavantajların önüne geçmektedir. Isıl yöntemle (elektro erozyon ile işleme (EEİ)), mekanik yöntemle (aşındırıcı jet, aşındırıcı su jeti, ultrasonik), kimyasal yöntemle (kimyasal), elektroliz yöntemle (elektro kimyasal (EKİ)), vb. gibi işleme mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada EEİ yöntemi kompozit malzemelerin işlenmesi için belirlenmiştir. EEİ, malzemeyi işlenen bölgeden kaldırmak için kontrollü frekanslar ile elektriksel boşalmalar üreten, temassız bir ısıl işleme prosesidir. Elektriksel boşalmaları, elektrotlar arasında iyonların ve elektronların hareketini kolaylaştıran bir plazma kanalı oluşturur. Plazma kanalı, mikro düzeydeki mesafede dielektrik akış ve a, takım elektrotu ve iş parçası arasında gerçekleşir. Plazmanın sıcaklığı 12000 oC seviyelerine kadar yükselebilir (McGeough, 1988). Deşarjdan sonra plazma kanalı bozulur. Dielektrik, plazma kanalında ani bir düşüşe neden olur ki bu da bir kanal veya vakum oluşumu ile sonuçlanır ve yeni dielektrik sıvı içine alır. Ergimiş malzeme boşalım bölgesinden katılarak dielektrik sıvı yardımıyla taşınır.

Araştırmalara bakılarak EEİ sürecinin sunduğu avantajlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Üç boyutlu karmaşık şekiller, iş parçasının sertliğinden ve boyutlarından bağımsız olarak verimli ve etkili bir şekilde işlenebilmektedir (Fukuzawa, Mohri, Gotoh, ve Tani, 2009). Örneğin, Gupta ve Jain (Gupta ve Jain, 2014), geleneksel mikro dişli üretim proseslerinden daha iyi olduğu tespit edilen tel EEİ prosesi kullanarak mikro dişliler üretmişlerdir.
- Takımdaki kinematik değişiklikler sayesinde, aynı takım kullanılarak karmaşık şekilli boşluklar oluşturulabilir. Ziada ve Koshy (Ziada ve Koshy, 2007), Reuleaux üçgenin kinematiğini kullanarak keskin köşeli normal ve normal olmayan çokgen şekilleri işleyebildiler. EEİ'nin çok sayıda hibrit varyantı da mümkündür, bu da farklı materyalleri işlemek için daha ilgi çekici hale getirmektedir.
- EEİ işleminin bir başka avantajı, işleme düzeneğinin temel konfigürasyonunu değiştirerek sunabileceği çok yönlü seçeneklerdir. Kumar (Kumar S. , 2013), yüzey işleme operasyonunda yüzeylerin işlenmesi için uygun işleme koşulları sunmuştur. Yarı iletken malzemeler konusunda, sıcaklık ve yüksek radyasyon ortamlar gibi zıt ortamlarda kullanılmak üzere silikon plaka gibi bazı alternatifler aranmaktadır (Friedrichs, Kimoto, Ley, Pensl, ve Wiley , 2011). Son zamanlarda EEİ, tek kristalli silisyum karbürden plakalarının kesmesi için geliştirilmiştir. EEİ malzemenin sertliğinden bağımsız olarak plakaların dilimlenmesinde avantaj sağlayabilir, çünkü tek gereklilik elektriksel iletkenliktir.

EEİ işleminin sunduğu avantajlara rağmen, elektriksel boşalımlar aracılığıyla malzemelerin işlenmesi söz konusu olduğunda bazı dezavantajlar da söz konusu olabilmektedir. Bunlar aşağıda listelenmiştir:

İletken olmayan seramik malzemeler, çok yüksek bir elektriksel dirence sahiptir; yine de elektriksel iletken yardımcı elektrot tekniğinin kullanımı ile EEİ ile işlenebilirler (Lauwers, Kruth, Liu, ve Eeraerts, 2004). Aslında, 1980'lerin başından beri yalıtkan seramik malzemelerinin işlenmesi için EEİ yöntemi araştırılmıştır (Noble ve Ajmal, 1983). Bu araştırmalarda, tel elektro erozyon (TEEİ), mikro elektro erozyon (μ EEİ), elektro erozyon frezeleme (EE-frezeleme), hibrit versiyonlar benzer toz katkılı elektro erozyon (TKEEİ), ultrasonik-yardımlı elektro erozyon (UEEİ), elektro erozyon taşlama (EET) vb. işleme yöntemleriyle kompozit malzemelerin işlenebilirliği sürekli incelenmiştir.

Bu çalışmada geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan metal matrisli seramik takviyeli kompozitlerin işlenmesi için EEİ ve TKEEİ yöntemi kullanılmıştır. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemi olarak ise vakumlu infiltrasyon yöntemi tercih edilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarında, vakumlu infiltrasyon yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin EEİ ile işlenebilirliği üzerine çok fazla çalışmanın mevcut olmadığı gözlemlenmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ileri çalışmalarda EEİ yöntemi hakkında bir literatür kanağı olacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Malzemeler ve Yapılan Araştırmalar

Lehua Qi ve arkadaşlarının 2017 yılındaki yaptıkları çalışmada (Qi, ve diğerleri, 2017) vakum basıncı infiltrasyonunu takiben sıvı-katı ekstrüzyon (LSEVI) kullanılmıştır. Bu çalışmada, LSEVI tekniği ile imal edilen karbon fiber takviyeli magnezyum esaslı (Cf / Mg) kompozitlerin yorulma performansını anlamaya yönelik deneysel bir araştırmayı ayrıntılarıyla anlatmışlardır. Sonuç olarak Cf / Mg yorulma dayanımı limitinin 250 ile 270 MPa arasında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlere göre Cf / Mg kompoziti çok yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu için herhangi bir yorulma yüklemesi sırasında başarısız olmadığı gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar Cf / Mg kompozitinin yorulma davranışını güçlendirdiğini doğrulamıştır. Cf / Mg kompozitinin yorulma dayanımı, uygulanan ve artan yük ve yorulma döngülerinin artması ile beraber artmıştır. Üstelik yorulma süreci ile sertlik de artmıştır. Bu yorulma arttırımı, yorulmuş Cf / Mg kompozitinin iki çeşit rijitlik performansına sahip olmasını sağlamıştır. Yorulma işlemi, arayüzeyi bağdan çıkarma ve kayma ile sonuçlanacak şekilde fiber koparma veya çatlaklara neden olacak şekilde "arayüz zayıflatma etkisine" neden olmuştur. Çekilen lif ve çatlaklar, uygulanan maksimum yük ve yorulma döngülerinin artması ile beraber artmıştır. "Arayüz zayıflatma etkisi", Cf / Mg kompozitinin özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye bırakmıştır.

Jingbo Zhu ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan bir çalışmada (Zhu, Wang, Wang, Zhang, ve Wang, 2017) vakumlu infiltrasyon yöntemi ile hazırlanan bir SiC / Al kompozitinin ara yüz yapısının, SiC ve Al arasında spesifik yönlendirme ilişkilerinin bulunduğu ve ara yüzey reaksiyonlarının oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Ortaya çıkan SiC / Al arayüzleri sürekli ve herhangi bir çökelti ve boşluk içermemiştir. 6H-SiC ve Al arasındaki oryantasyon ilişkisi için herhangi bir etkileşim bulunmamıştır. Buna ek olarak, arayüzdeki iki faz arasındaki uyumsuzluk uyumsuzluğun yerinden çıkmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Si / Al kompozitinin 10 saat boyunca 873 oK'de tavlave ıktan sonra kararlılığı belirlenmiştir. Al'un mikro yapısında tane irileşmesi meydana gelmesine rağmen, arayüzde hiçbir Al₄C₃ çökeltisi görülmemiştir. SiC / Al ilk arayüzlerde konsantrasyon değişimleri ile karşılaştırıldığında, tavlama sonrası arayüzde elde edilenler hala dikey olarak dururken, arayüzlerin yakınındaki çok dar bir bölgede SiC ve Al arasında eşzamanlı interdifüzyon

oluştugu görülmüştür. Son olarak da teorik hesaplamalar, tavlama işlemi sırasında benzer şekilde SiC / Al arayüzünün kimyasal ve yapısal stabilitesini göstermiştir.

Shaolin Li arkadaşları ile beraber 2017 yılında yaptıkları bir çalışmada (Zhao, Gu, Ma, Xi, ve Zhang, 2019) 2D karbon fiber takviyeli AZ91D matrisli kompozitleri (2D-Cf / AZ91D kompozitleri) sıvı-katı ekstrüzyon ve vakumlu infiltrasyon tekniği (LSEVI) ile imal edilmiştir. Lifler ve matris arasındaki arayüzü değiştirmek ve lifi korumak için, pirolitik karbon (PC) kaplama T700 karbon elyafının yüzeyine kimyasal buhar birikimi (KBB) ile yerleştirilmiştir. Kompozitlerin mikroyapıları incelenmiş, kompozitlerin LSEVI tekniğiyle iyi bir şekilde imal edildiği gösterilmiştir. Alüminyumun elyafın yüzeyinden ayrılması, ara yüzeyde Mg₁₇Al₁₂ çökelti oluşumuna yol açmıştır. Alüminyum alaşımının infiltrasyonu geliştirdiği ve PC kaplama lifleri etkin bir şekilde korumuş olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak 2D-Cf / AZ91D kompozitlerinin maksimum gerilme mukavemeti yaklaşık %120 iyileşme oluşarak 400 MPa değerine ulaşmıştır.

2016 yılında Lian Xiang ve arkadaşları tarafından yapılan bir deneysel çalışmada (Xiang ve Park, 2016) TiO₂ filmler, kazınmış Al folyolarına vakumlu infiltrasyon yöntemi ile infiltire edilmiştir. Bir sol-jel işlemi kullanılarak hazırlanan TiO₂ filmleri 4 farklı devir için farklı zaman aralığında (10, 30 ve 60 dakika) çeşitli sıcaklıklarda (450 °C, 500 °C ve 550 °C) tavllanmış ve daha sonra 100 V'de anodize edilmiştir. Numuneler, X-ışını kırınımı, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ve alan emisyon transmisyon elektron mikroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. Sonuçlar, numunelerin Al₂O₃ dış tabaka, Al-Ti kompozit oksit orta tabaka ve Al (OH)₃ iç tabakasından oluşan çok katmanlı bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Numunelerin, dayanma gerilimi ve spesifik kapasitans gibi elektriksel özellikleri de ölçülmüştür. TiO₂ kaplanmamış numunelerle karşılaştırıldığında, TiO₂ kaplanmış numunelerin özel kapasiteleri arttırılmıştır. TiO₂ ile kaplanmış anod Al folyosunun özgül kapasitansı, 10 dakika boyunca 550 °C'de tavlave ığında TiO₂ kaplanmamış bir numuneye kıyasla %42 oranında artmıştır. Bu kompozit oksit filmler, dielektrik malzemelerde kullanılan anot Al folyoların özgül kapasitansını artırabilmektedir. Amit Siddharth Sharma ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları bir diğer çalışmada (Sharma, Fitriani, ve Yoon, 2016) ise SiCf / SiC kompozitleri üretmek için kimyasal bulamaç stabilizasyonu, vakumlu infiltrasyonu ve presleme üzerine kurulu bir hibrid işleme yöntemi kullanılmıştır. Densifikasyonun arttırılması için SiC parçacıklarına infiltre edilmiş ve SiC bant katmanları halinde 1750 °C'de ve 20 MPa'da sıvı fazda sinterlenerek 2 saat süreyle

bekletilmiştir. Sinterleme sıcaklığını düşürmek ve matris tanecik boyutunu küçültmek için, sinterleme katkısı olarak hesaplanan silisyum nitrat miktarı (ağırlıkça %5, 7 ve 10) bileşime eklenmiştir. SEM analizi termal olarak yalıtkan parçaların, ağırlıkça %10 silisyum nitrat ilavesi ile kompozitler için 350-380 nm boyut aralığında bir tane boyutu dağılımının elde edilebildiğini doğrulamıştır. Katmanlı kompozitlerdeki tane uzama davranışını açıklamak ve analiz etmek için alternatif bir yöntem olarak, sesüstü analizi kullanılmıştır.

2015 yılında Liaoyu Xue ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada (Wang, Yang, Xu, ve Liu, 2019) faz açısından malzeme yapısını ve gerilim dağılımını iyileştirmek için CuAl_2 fazını Al fazına çökeltmek yolu ile ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sıkıştırma kuvveti artan katı eriyik süresi ve sıcaklık ile artmıştır. Ara yüzey fazının perspektifinden bakıldığında, kısa temas süresi, katı çözelti olmaksızın azalmıştır. Bu dönüşüm katı çözeltinin en önemli etkisi olmuştur. Bununla birlikte, katı eriyik süresi oldukça uzunsa, Al---O---Si da aşırı tabaka kalınlığı, kompozitlerin bükülme mukavemetini azaltmak için yeterlidir. Sonuçlara bakıldığında SiC / Al'da artan sıkıştırma mukavemeti, katı çözeltisinin zamanı ve sıcaklığının artmasıyla 673 ila 971 MPa aralığında değişmiştir. Bükülme mukavemeti, katı çözelti sıcaklığının artması ile 169 ila 183 MPa arasında değişirken, uzatılmış katı çözelti zamanı eğilme mukavemetini 166 MPa düşürmüştür. CuAl_2 , Al fazındaki Cu elementin içeriğini arttıran katı çözeltideki Al fazına girmiştir. Böylece, Al fazının mukavemeti artmıştır ve sonuç olarak SiC / Al miktarı artmıştır.

Joaquim Vila ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan deneysel araştırmada (Vilà, Sket, Wilde, ve Requena, 2015) vakumlu infiltrasyon ile üretilmiş olan deneyler, bir fiber küpe içindeki mikroakışkan akış mekanizmalarını incelemek üzere senkrotron X ışını bilgisayarlı tomografisi (SXCT) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SXCT görüntüsünün yüksek çözünürlüğü, çekim içindeki tek tek liflerin detaylı olarak yeniden yapılanmasını olanak sağlamıştır. Bu tekniğin, kompozit malzemelerdeki mikro akışkan akışı ve boşluk taşınımı hakkında ayrıntılı bilgi verme yeteneği açık bir şekilde belirlenmiştir. Yüksek çözünürlüklü SXCT görüntüleri akışkan ve lifler arasında ufak bir temas açısı göstermiştir. Büyük olasılıkla, akışkan ile elyaf boyutlu ve ırma arasındaki etkileşim vasıtasıyla boşlukta tetiklenen bir yüzey efekti gözlemlenmiştir. Bu işlemin bir sonucu olarak, kılcal basıncın akışkan akış üzerinde bir sürükleyici kuvvet olarak işlem görmüştür. Sonuç olarak, düşük akış hacmi, daha yüksek geçirgenlik ve daha düşük kılcal kuvvetler sunan alanlar olduğundan sıvı akışı tercih edilmiştir.

Muharrem Pul ve arkadaşları tarafından 2012 tarihinde yapılan çalışmada (Pul, Küçüktürk, Çalın, ve Şeker, 2011) takviye hacim oranının vakumlu infiltrasyon yöntemi ile üretilen güçlendirilmiş MgO kompozitlerin aşınma davranışları üzerindeki etkilerini, matrisin takviye hacim oranı %5, %10 ve %15 olan kompozitler incelenmesi ile araştırılmıştır. Aşındırıcı aşınma testleri, 80, 100 ve 180 meşde Al₂O₃ aşındırıcı kâğıt ve 10, 20 ve 30 N altındaki sabit disk üzerindeki aşınma cihazı, 3 saniye boyunca 0,2 m / s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinin sonunda, yıpranmış yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu ile fotoğrafları çekilmiş ve mikroyapılar enerji dağıtıcı spektrometre (EDS) ile analiz edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, aşınan yüzeylerin görüntülerini kontrol ederek, aşınma etkisinin takviye oranının artmasıyla arttığı görülmüştür. Maksimum aşınma oranı 30N yük altında ve 80 meş zımpara kâğıdı ile rapor edilmiştir. Kompozit içinde takviye malzemesi olarak kullanılan MgO'nun artışına göre aşınma miktarının da arttığı bulunmuştur. Diğer taraftan, aşındırıcı aşınma etkisinde gözenek miktarı ve takviye hacmi oranının önemli parametreler oldukları tespit edilmiştir.

2010 yılında Recep Çalın tarafından yapılan başka bir çalışmada (Çalın, Effects of reinforcement volume fraction on the abrasive wear behaviour of Al–MgO composites produced by the vacuum infiltration method, 2015), 105 µm partikül büyüklüğüne sahip SiO₂ tozları, kuvars tüplerde serbest olarak, %30, %40, %50 takviye hacim oranları oluşturmak üzere doldurulmuştur. Sıvı Al 7075 alaşımı, vakumda SiO₂ kompakt içine aynı vakum koşulunda, aynı ve a ve aynı sıcaklıkta 3 dakika normal atmosferde infiltre edilmiştir. Vakumlamadan sonra, infiltrasyon yüksekliği ve kompozit yoğunluğu belirlenmiştir. Kompozitlerin mikroyapıları SEM analizi ile incelenmiştir. Termal iletkenliği belirlemek için sonlu elemanlar analizi yöntemi ve deneysel yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerin sonuçları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Al 7075-SiO₂ kompozitinin ısı iletkenliği, takviye hacmi oranını azalması ile artmıştır. Sayısal analiz, deney sonuçlarına yakın sonuçlar sağlamış ve bu nedenle, sayısal analiz kompozitlerin ısı iletkenliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Analitik modellerden biri olan Maxwell, deney sonuçlarına en yakın termal iletkenlik tahminini vermiştir. Sonuç olarak iki farklı yöntemin değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve kompozitin ısı iletkenliğinin azalan takviye hacmi oranıyla arttığı bulunmuştur.

Başka bir çalışmada ise Ramazan Çıtak ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılmıştır (Çıtak, Çalın, ve Zühtü, 2010). Bu çalışmada, Takviye hacim oranının, ergimiş metalin infiltrasyon

davranışı üzerindeki etkisi, vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilen Al-MgO kompozitin termal özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Bu çalışmada, sırasıyla MgO tozu takviye ve Al alaşımı matris olarak kullanılmıştır. 105 µm partikül büyüklüğüne sahip MgO ve Al tozlarının karışımı, kuvars tüplerde serbest olarak %10, 20 ve 30 oranında takviye hacim oranını oluşturmak üzere doldurulmuştur. Sıvı Al, 3 dakika boyunca normal bir atmosferde 730 ± 5 ° C'de 550 mmHg vakum altında MgO tozuna infiltre edilmiştir. Kompozitlerin mikro yapıları SEM analizi ile araştırılmıştır. Bu görüntülerden, etkili termal iletkenliğin belirlendiği bir termal analiz modeli oluşturulmuştur. Al-MgO kompozitlerin etkili ısı iletkenliği, takviye hacim oranı azaldıkça artmaktadır. Bu çalışmada elde edilen deneysel ve özellikle sayısal analiz sonuçları, birbiriyle oldukça uyumlu olan termal iletkenlik değerleri vermiştir.

2011 yılında Serkan Ateş ve diğerlerinin yaptıkları bir çalışmada (Ateş, Uzun, Calin, ve Citak, 2012), basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanılarak, metal matrisli alüminyum kompozitin SiC tozları arasındaki boşluklara doyurulmasıyla üretim şartları araştırılmıştır. Paslanmaz çelik borular içine doldurulmuş SiC tozları, sadece sıvı malzemeyi taşıyan filtreler arasında sıkıştırılır, basınçlı ergimiş matrise batırılır ve 500-900 kPa basınç altında 750 °C sıcaklıkta 3 dakika içerisinde infiltrasyon gerçekleşir. Bu çalışmada örneklerin görüntü analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin yoğunluğu, gözenekliliği ve termal iletkenlikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, infiltrasyon basıncının artmasıyla gözeneklilik miktarı azalmış, fakat termal iletkenlik artmıştır. Sıcaklık arttığında kompozitin ısı iletkenlik değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar, ısı iletkenliğinin bazı sayısal ve teorik yöntemlerle hesaplanmasıyla desteklenmiştir. Sayısal ve teorik modellerde gözenekliliğin etkisinin göz önünde bulundurulmasının bir dezavantaj olduğu gözlenmiştir.

Vakumlu infiltrasyon yöntemini kullanarak üretilen kompozitler başka bir çalışmada Muharrem Pul ve arkadaşları tarafından 2015 yılında (Çalın, Pul, Bican, ve Küçüktürk, 2015) ele alınmıştır. Bu çalışmada, SiO₂ ile güçlendirilmiş Al 7075 matris kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki toz büyüklüğü ve matris sıcaklığı incelenmiştir. Artan toz büyüklüğü ve sıcaklık ile infiltrasyon yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Partikül büyüklüğü ve sıcaklığı için belirlenen tam infiltrasyon parametreleri, sırasıyla $d_{50} = 150$ µm ve 800 ° C dir. Üretilen kompozitlerin gözenekliliğinin %3,2-14.6 aralığında değiştiği ve en düşük gözenekliliğin 105 µm SiO₂ parçacık boyutuna sahip kompozit malzemeden elde

edildiği gözlenmiştir. En yüksek kırılma mukavemeti (263 MPa), 800 °C'lik bir matris sıcaklığında ve 420 µm'lik bir parçacık boyutunda üretilen kompozitten elde edilmiştir. Parçacık büyüklüğünün ve sıcaklığının tam infiltrasyona ulaşmak için etkili parametreler olduğu sonucuna varılmıştır ve bu yöntem, geleneksel döküm yöntemlerine göre yüksek takviye hacmi oranlarına sahip olan kompozitlerin üretilmesi için daha uygun bulunmuştur.

Zühtü Pehlivanlı ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptıkları çalışmada (Pehlivanlı, Çalın, ve Uzun, 2010), G2 / 04 sınıfı gaz beton (AAC) malzemenin ısı iletkenlik değerinin, nem ve sıcaklığa göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Havalı ırılmış gaz beton numunelerinin ısı iletkenlik değeri, 0 ile 45 °C sıcaklıklarında ve %0 - 41,5 nem içeriğinde deneysel olarak ölçülmüştür. Malzemelerin ısı iletkenlik değerleri, Lasercomp Fox 314 cihazı kullanılarak ısı akış ölçer yöntemine göre ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, G2 / 04 sınıfı gaz beton malzemenin ısı iletkenliğinin sıcaklık ve nem içeriği ile karşılaştırmalı olarak arttığı görülmüştür. Bu deneysel sonuçların yardımıyla, G2 / 04 sınıfı AAC malzemenin ısı iletkenliğinin sıcaklık ve nem içeriğine göre değişmesi için regresyon çalışması yapılmış ve $k = 0.0926 + 0.00013 T + 0.00214 nm + 0.00007 T nm$ (W / m K) ilişkisi elde edilmiştir.

M. Guedes tarafından 2011 yılında yapılan başka bir çalışmada (Guedes, Ferreira, Rocha, ve Ferro, 2011), bakır alüminat preformları sıvı alüminyum kullanılarak vakumlu infiltrasyon yöntem ile üretilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, vakum altında, metalı saran içsel alümina filmi incelenmiş ve alüminyum'dan alümina ve bakır üretilerek bakır alüminatı azaltması gerçekleşmiştir. Bu yaklaşım altında, alüminyum infiltrasyonu için kontrollü bir yol belirlenmiş, bu da reaktif ıslanmaya ve ön-biçimlerin infiltrasyonuna neden olmuştur. Al₂O₃ ve CuAl₂O₄'ün bir karışımını içeren seramik preformlar, farklı vakum seviyeleri ve sıcaklıkları altında alüminyum ile infiltre edilmiş ve oluşan reaksiyon ve infiltrasyon davranışı tartışılmıştır. Bakır, stabilite aralıklarını hem CuAl₂O₄ hem de sıvı alüminyum infiltrasyonu için CuAl₂O₂ kabiliyetini belirleyen vakum seviyesine ve oksijen kısmi basıncına bağlı olduğu görülmüştür. Reaktif infiltrasyon, alüminyum ve CuAl₂O₄ arasındaki reaksiyon yoluyla elde edilmiştir; bununla birlikte, alumina filmin sıvı alüminyum fitillenmesini bloke eden bir hızlı oluşumu, başlangıçta infiltrasyona neden olmuştur. 10 ila 7 atm basınç arasında elde edilen metal alaşımının ıslatmayan davranışıyla, seramiğin infiltrasyonu engellenmiştir. Alüminyum ve CuAl₂O₂ arasındaki redoks reaksiyonu yoluyla, geniş bir infiltrasyon işlemi elde edilmiş ve alumina partiküllerinin bir

alüminyum matris arasında düzgün dağılımı ile karakterize edilen bir mikroyapı oluşturulmuştur. Bu çalışma, bakır alüminat bakımından zengin preformlar üzerine sıvı alüminyum infiltrasyonunun Al-matris alümina takviyeli kompozitlerin üretilmesi için uygun bir yol olduğunu kanıtlamaktadır. İlişkili indirgeme tepkimesi, alüminayı, ince parçacıklı kompozit takviyeler olarak ve matris takviyesi olarak katkıda bulunan sıvı alüminyum içinde çözülen bakır meydana getirilmiştir.

2017 yılında Jingbo Zhu ve diğerleri tarafından yapılan başka bir çalışmada (Zhu, Wang, Wang, Zhang, ve Wang, 2017), arayüzey reaksiyonlarının meydana gelip gelmediğini ve SiC ve Al arasında spesifik yönelimsel ilişkilerin var olup olmadığını belirlemek için vakum-basınç infiltrasyonu ile hazırlanan bir SiC3D / Al kompozitinin arayüzey yapısı araştırılmıştır. Elde edilen SiC / Al arayüzleri sürekli ve herhangi bir çökelti ve boşluk içermemiştir. Ek olarak, arayüzdeki iki faz arasındaki uyumsuzluk, uyumsuzluk dislokasyonu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada SiC3D / Al kompozitinin, 10 saat boyunca 873 oK'de tavlama sonrası stabilitesi belirlenmiştir. Al'un kalınlaşması gerçekleşmesine rağmen, ara yüzeyde hiçbir Al4C3 çökelmemiştir. İlk arayüzlerdeki konsantrasyon gradyanları ile karşılaştırıldığında, tavlama sonrasında ara yüzeyde elde edilenler hala dik olup, ara yüzeyler yakınındaki çok dar bir bölgede SiC ve Al arasında eşzamanlı interdifüzyon meydana geldiğini göstermiştir. Teorik hesaplamalar, tavlama işlemi sırasında SiC / Al arayüzünün kimyasal ve yapısal kararlılığını benzer şekilde gözlemlenmiştir.

Lei Xu, Mi Yan ve arkadaşları 2014 yılında (Lei Xu, ve diğerleri, 2014) Cu-W alaşımı, Cu-W alaşımının yapısına farklı oranlardaki bakırın etkisini değerlendirmek için mikrodalga vakumlu infiltrasyon sinterleme fırını kullanılmıştır. Cu-W alaşımının alaşım ve infiltrasyon özelliklerinin mikroyapıları, metalografik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edilmiş, yapı değişikliklerini tanımlamak için XRD kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada gözenek dağılımı da değerlendirilmiştir. Mikrodalga infiltrasyon sinterlemesi kullanılarak %5, %8 ve %20 bakır içeriğine sahip Cu-W alaşımı, karışımı nispeten daha kısa bir sürede 1200 ° C'ye ısıtmak suretiyle hazırlanmıştır. Cu-W alaşımında yeni alaşım fazı Cu0.4W0.6 oluşumu belirlenmiştir. Bakır içeriğindeki bir artışın Cu-W alaşımının gözenekliliğini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur. Mikrodalga infiltrasyon sinterlemesinin kullanılmasıyla, bakır bileşenler tungsten partikülleri üzerinde daha iyi kaplanmıştır. Bakır içeriğindeki artış, bakırın aglomerasyon eğilimini arttırmıştır. Tungsten

partikülleri, bakır bileşeninde dengesiz bir şekilde dağılmış ve alaşım ve infiltrasyon bakır çözeltisi arasındaki arayüz gevşek olmuştur. Aynı zamanda tungsten parçacıkları sıvı bakıra doğru yayılmıştır.

Retiküle seramik köpükler, metal filtrasyon, egzoz gazı ve hava temizleme, katalizör desteği ve diğerleri gibi endüstriyel uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. 2010 yılında U.F. Vogt ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada (Vogt, Gorbar, Eggenschwiler, ve Broenstrup, 2010), basınç dayanıklılığı ve retiküle köpüklerin özgül yüzey alanı iyileştirilmiş, aynı zamanda son köpük yapısında yüksek bir geçirgenlik seviyesi korunmuştur. Özellikle, PU köpüğünün tükenmesi nedeniyle oluşan içi boş desteklerin doldurulması için uygun bir bulamaç kullanılarak vakumlu bir infiltrasyon aşaması ve ardından bir ön-sinterleme döngüsü benimsenmiştir. Ayrıca, basınç mukavemeti, özgül yüzey alanı ve geçirgenlik gibi köpük özelliklerinin kontrol edilmesi amacıyla, ince ve iri taneli alüminanın çeşitli karışımlarının yanı sıra zirkonya ile kombinasyon halinde kullanılmıştır. Sıkıştırma mukavemeti, içi boş dikmeleri süzerek alümina köpükleri için iki faktör ve ZTA köpüklerinin desteklerini dolduruyorken dört faktörle, bileşim %70 mol %Al₂O₃ ve %30 mol ZrO₂ ile geliştirilmiştir. Vakum süzme işleminden kaynaklanan ağırlık artışı, ağırlıkça %10 bulunmuştur.

2.2. Elektro Erozyon ile İşleme Yöntemi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Vishwa R Surya ve arkadaşların yaptığı çalışma (Surya, Kumar, Keshavamurthya, Ugrasen, ve Ravindra, 2016) maksimum Malzeme kaldırma oranı, minimum Boyutsal Hata ve daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için Al 7075 esalı TiB₂ takviyeli kompozitin telli elektro erozyon işleme sırasında işleme performanslarının parametrelerin tahmini ve karşılaştırılmasına odaklanmıştır. Çalışmalar için göz önüne alınan kontrol faktörleri boşalma süresi, akım yoğunluğu, bekleme süresi ve ilerleme hızıdır. Bu çalışmada İşleme parametreleri Taguchi'nin L27 ortogonal dizisine dayanılarak seçilmiştir. Araştırılan parametrelerinin değerlerini öngörmek için yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Tahmin edilen işleme parametrelerinin değerleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen değerlerle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Md. Mofizul Islam ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı bir çalışmada (Islam, Ping Li, Jae Won, ve Jo Ko, 2017) %60 takviye hacim oranına sahip tek yönlü CFRP kompozit üzerinde

apak alma işlemin gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında işparçanın üzerinde normal delme işlemi gerçekleşmiş ve ikinci aşamada ise farklı takımlarla EEİ yöntem ile apak alma işlemi yapılmıştır. apak alma işlemindeki kullanılan takımlar Al 6061, pirinç (CW614N), bakır (C110) ve çeliktir (SM45C) dir. Bu işlemde ilerleme hızı, gerilim değeri ve dielektrik sıvısı sabit tutulmuştur. Takım malzemesi, işleme zamanı ve akım yoğunluğu gibi parametrelerde ise farklı değerler kullanılarak bunların deliklerdeki pürüzlülük değeri ve yüzey tamlığına olan etkileri araştırılmıştır. Varılan sonuçlara bakıldığında sırasıyla Bakır, elik, Pirinç ve Al6061 en yüksek işparça işleme hızına sahip olmuşlardır. Yüzey kalite faktörüne bakıldığında ise sırasıyla Bakır, elik, Pirinç ve Al6061 takımı ile en iyi değerler elde edilmiştir. Genel bakıldığında ise takımların elektrik dirençleri arttıķa daha iyi işleme şartlarına ulaşılmıştır.

2017 yılındakı Avijeet Satpathy ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada (Satpathy, Tripathy, Senapati, ve Brahma, 2017) ise %20 SiC takviye hacim oranına sahip Al alaşımı üzerinde EEİ işlemi gerçekleşmiştir. Bu deneysel çalışmada kompozit malzemesi karıştırmalı döküm yöntem ile üretilmiştir. Al ve SiC tozları 3 ve 4 saat sırasıyla 450oC ve 900oC ısıtılarak bekletildikten sonra ergime sıcaklıklarının altında mekanik olarak karıştırılmıştır. İşleme parametreleri olarak akım, boşalma süresi, işleme zamanı ve gerilim üç farklı değerler seçilip kullanılmıştır. Bu alışmadakı amaç işleme parametrelerin işparça işleme hızı, takım aşınma miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapıya olan etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında ise en yüksek akım değerinde ve en düşük boşalma sresinde en iyi işparça işleme hızı elde edilmiştir. Takım aşınması ise minimum değerde olduğunda malzeme kaldırma oranı en düşük seviyesine dşmştir.

A.Torres ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada (Torres, Luis, ve Puertas, 2017) titanyum diboridin imalatı için bir EEİ prosesinin uygulanabilirliği analiz edilip araştırılmıştır. Bu araştırmayı yapmak için, EEİ işleme parametrelerin, işleme faktörlerinin en önemlilerinden olan işparça işleme hızı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkiler kullanılmıştır. Sonuçlar işparça işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğün üzerinde en etkili faktörünün akım yoğunluğunu, takım aşınma durumunda ise boşalma süresi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu parametrelerin kontrolü, optimum çalışma koşullarını belirlemek için teknolojik tabloların elde edilmesini sağlamaktadır.

Nilesh G. Patil, P.K. Brahmanekar ve D.G. Thakur'un 2016 yılında yaptıkları bir çalışmada (Patil, Brahmanekar, ve Thakur, 2016) A359 matris içerisinde SiC partikül takviyeli kompozitin telli elektro erozyon işleme performansında tel elektrot malzemesinin türünün ve takviye hacim oranının etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada elektrot olarak pirinç tel ve CuZn50 ile kaplanmış bir bakır tel kullanılmıştır. SiC parçacık takviye hacim oranı %10 - %30 arasında değişmektedir. Bu çalışmada kesme hızını etkileyen en önemli parametre takviye hacim oranı olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, boşalma süresi ve kullanılan tel malzemesi diğer önemli parametreler oldukları gözlenmiştir. Ayrıca, kaplamalı bakır tel ile pirinç tel karşılaştırıldığında kesme oranının kaplamalı bakır telde daha fazla olduğu bulunmuştur. Kesme hızındaki iyileşmenin kaplamalı tel için %58'den fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kesme genişliği kaplanmış telde diğerine göre daha az değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kaplanmış tel ile yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

L. Selvarajan ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı başka bir çalışma (Isro, Selvaraj, Sathiyarayanan, ve Jeyapaul, 2016) ise Si₃N₄-TiN seramik kompozit üzerinde bakır cinsinden takım kullanılarak EEİ prosesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Taguchi L25 ortogonal dizi kullanılarak akım, akım boşalma süresi, akım kapanma süresi, dielektrik basınç ve gerilim gibi parametreler araştırılıp seçilmiştir. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma hızı, işparça aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü, koniklik, dairesellik ve silindirlilik gibi işleme parametreleri işleme sırasında gözlenip analizler yapılarak incelenmiştir. İşleme parametrelerinin önemi, gri ilişkisel analiz (GRA) temelli varyans analizi (ANOVA) kullanılarak elde edilmiştir ve sonuçlara göre akım, darbe boşalma süre ve gerilim değerleri en önemli parametreler olarak bulunmuştur.

2016 yılında N.V. Rengasamy ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (Rengasamy, Rajkumar, ve Kumaran, 2016) % (0,2,4,6,8) takviye hacim oranına sahip Al 4032 esaslı metal matris kompozitler oda sıcaklığında karıştırmalı döküm yöntemi ile hazırlanmıştır. İşleme prosesi olarak bu çalışmada EEİ seçilmiştir. Akım boşalma süresi, akım kesilme süresi ve akım değerleri gibi parametreler bu çalışmada araştırılmıştır. İşleme parametrelerinin Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma hızı ve kesme derinlik üzerinde olan etkileri bu çalışmada incelenmiştir. Bu parametrelerin optimize edilmesi için Taguchi L25 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Her işleme parametrenin etkisinin yüzdesini araştırmak için varyans analizi (ANOVA)'dan yardım alınmıştır.

Fredrik Vogeler ve arkadaşlarının 2016 yılında (Vogeler, Lauwers, ve Ferraris, 2016) yaptığı başka bir çalışmada ise kesme boyutlarının telli EEİ performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hibrid plazma boşalım sinterleme yöntem ile üretilen ZrO_2 -TiN taneleri (çap: 250 mm, yükseklik: 16 mm) TEEİ ile işlenmiştir. $0.5 \mu m$ 'nin altında Ra pürüzlülük değerleri elde etmek için farklı bitirme etapları kullanılmıştır ve her bitirme kademesi için yüzey özellikleri ve malzeme uzaklaştırma mekanizmasından ayrıntılı bir analiz yapılması gerçekleştirilmiştir. Yüzey kalitesi ve malzeme kaldırma mekanizmaları, küçük ölçekli boşluklar için literatürdeki bulgularla karşılaştırılmıştır. Ergime ve buharlaştırmanın yanı sıra, kimyasal ayrışma ve yeniden tabaka katlanmaları gibi diğer mekanizmalarda süreç içerisinde gözlemlenebilir. Ayrıca, kesme kesimlerinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi, 4 noktalı bükme düzeneği kullanılarak test edilmiş ve yüzey pürüzlülüğüyle ilişkilendirilmiştir.

Li ve arkadaşlarının bu konu hakkında 2016 yılında yaptıkları bir çalışma (Li, Bai, ve Lİ, 2016) ise Ti-6Al-4V'nin Cu-SiC kompozit elektrot ile işleme özellikleri incelenmiştir. Bu deneysel çalışmada yüzey topografyası, yüzey altı mikro yapısı, enerji dağılımlı spektroskopi ve mikro sertlik analizleri edilmiştir. Yapılan analizlere bakıldığında işlenmiş yüzeyler, düzensiz bileşik yapılar, enkaz damlacıkları, sıkı kraterler ve mikro gözenekleri görülmüştür. Cu-SiC elektrotu tarafından işlenen yüzeylerde Cu elektrotu ile kıyasla ıgında daha az sayıda mikro çatlak oluşmuştur. Sürekli ve düzgün sertleştirilmiş tabaka Cu-SiC elektrot ile elde edilmiştir. Sertleşmiş tabaka, işparçasından daha yüksek sertliğe sahiptir bunun neden ise TiC ve $TiSi_2$ 'nin yeni fazları işparça yüzey üzerinde oluşturulmuştur.

2016 yılında Eckart Uhlmann ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (Uhlmann, Schimmelpfennig, Perfilov, Streckenbach, ve Schweitzer, 2016), Si_3N_4 -TiN seramiklerde mikro delik açma üzere kuru EEİ yöntemde dielektrik olarak (oksijen ve argon) ve geleneksel EEİ dielektriği (de iyonize su) gibi iki farklı gazla karşılaştırmalı bir araştırma sunulmuştur. Kuru-EEİ'nin etkili darbe frekansı daha yüksek ve iş parçası ve takım elektrotu arasındaki konvansiyonel hareketin geleneksel EEİ prosesine göre daha kısa olduğu gözlenmiştir. Akım değeri ve iş parçası ile takım elektrotu arasındaki göreceli hareket farklılıkları dielektrik sıvı özellikleriyle ilgi olduğu tespit edilmiştir. Dielektrik olarak de iyonize olmuş su oksijen ve argon karşı daha yüksek bir viskozite değerine sahiptir. Böylece, 80 bar ile aynı püskürtme basıncında, kuru EEİ'deki partiküllerin daha hızlı çıkarılması için

daha yüksek akış hızı elde etmek mümkün olmuştur. Daha iyi püskürtme koşulu oksijen için etkili darbe frekansının artmasına ve elektrot aşınmasının azalmasına neden olmuştur.

Ryota Toshimitsu ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada (Toshimitsu, Okada, Kitada, ve Okamoto, 2016) ise EEİ ile işlenmiş yüzeyde krom içeren katmanın oluşumu, krom tozu karışmış sıvı kullanılarak denenmiştir. Krom toz karışım sıvısı ile işlenmiş yüzey özellikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında EEİ ile işlenmiş bir yüzey üzerinde krom içeren katman, bir krom tozu karıştırılmış sıvı kullanarak oluşturulmuştur. Krom tozunun karıştırılması yeterli olduğunda, EEİ ile bitirme işlemi yaparak iyi kalitede yüzey elde etmek mümkün olmuştur. Akım değeri ve krom toz konsantrasyonu yüksek olduğunda krom içeren katman daha kalın hale gelmektedir. EEİ ile bitmiş yüzeyin Vickers sertliği ve korozyon direnci, krom tozu karışmış sıvı kullanılarak arttırılabilir.

N. Mathan Kumar ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışmada (Kumar, kumaran, ve Kumaraswamidhas, 2015) AlN (alüminyum nitrit), Si₃N₄ (silisyum nitrür) ve ZrB₂ (zirkonyum borid) parçacıkları %0, %2, %4, %6 ve %8 takviye hacim oranı ile güçlendirilmiş Alüminyum 2618, karıştırmalı döküm yöntemi ile üretimi ve EEİ ile işlenmesi gerçekleştirilmiştir. Takviye hacim oranının yüzdesi artınca malzemenin mekanik özellikleri de artmaktadır. Bu araştırmada varılan sonuçlara göre metal matrisli kompozitlerin işlenmesi için en iyi işleme yöntemi EEİ yöntemi olarak belirlenmiştir. Takım malzemesi olarak bu çalışmada bakır seçilmiştir. Bu çalışmada da diğer çalışmalarda olduğu gibi araştırılan parametreler işparça işleme hızı, takım aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü olmuştur. Bu çalışmada Taguchi'nin deney tasarımı, hibrid kompozitlerin işleme özelliklerini analiz etmek için kullanılmıştır. İşleme sonuçları, Al 2618 kompozitlerin geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olduğunu ve işparça işleme hızı ve Takım Aşınma hızının bu sebepten dolayı azaldıkları tespit edilmiştir. Dolayısıyla, işleme parametrelerinin Malzeme kaldırma oranı ve Takım Aşınma hızı üzerindeki etkilerini belirlemek için ANOVA (varyans analizi) kullanılmıştır.

Vinoth Kumar 2015 yılında arkadaşları ile beraber yaptıkları bir çalışmada (Kumar ve Kumar, 2015) Al esaslı %10 SiC takviye hacim oranına sahip metal matris kompozitin Elektro Erozyon İşleme (EEİ) yöntem ile geleneksel ve geleneksel olmayan kriyojenik soğutmalı takım sistem ile işlenmesini incelenmiştir. İşleme parametreleri uygulanan akım, boşalma süresi ve gerilim değerlerini içermektedir. Araştırılan parametreler, takım aşınma

hızı, işparça işleme hızı, yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı, iş parçası sıcaklığı, mikroyapı, mikro sertlik, SEM ve EDS analizlerini içermektedir. Uygulanan akım, boşalma süresi ve gerilim değeri takım aşınması oranı değeri üzerinde en önemli etkilere sahip oldukları halde, akım değeri ile boşalma süresi yüzey pürüzlülüğün üzerinde en fazla etkiye sahip oldukları gözlenmiştir. Takım aşınma hızı, kriyojenik soğutma sistemi ile %18'e düşürülmüştür. Kriyojenik soğutma sistemi ile beraber yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülmüştür.

2015 yılında S. Dewangan ve arkadaşlarının tarafından yapılan başka bir çalışmada (Dewangan, Gangopadhyay, ve Biswas, 2015) ise AISI P20 takım çeliğinin EEİ'den sonra yüzey bütünlüğü yönlerini iyileştirmeyi amaçlayan optimum EEİ süreci parametrelerinin ayarlanması önerilmektedir. Bu çalışmada Fuzzy-TOPSIS yöntemi çok kriterli yaklaşımdan faydalanan çoklu özelliklerin (beyz tabaka kalınlığı, yüzey çatlak yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü) eşzamanlı olarak optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu analizler ve ölçümlere bakıldığında, işleme parametreleri için $I_p = 1A$, $T_{on} = 10\mu s$ ve $T_w = 0.2\mu s$ optimum değerler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, beş karar vericinin optimum işlem parametrelerini tercih ettikleri hassasiyeti ve dayanıklılığı incelemek için hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, karar alıcıların yüzey çatlak yoğunluğu tercihleri en hassas tepki olarak bulunmuştur.

Xiao-peng LI ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada (Li, Wang, Zhao, hua Wu, ve Liu, 2014) ise mikro EEİ'de yüksek frekanslı akım darbelerin takım aşınmasına olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik bağlantılı matematiksel modeli oluşturulmuş ve bakır matrisli NiTiN silindirik kaplamalı elektrotu, bakır elektrotu ve Cu50W elektrotu işleme sırasında kullanmışlardır. Yüksek frekanslı boşalma akımı durumunda NiTiN takviyeli bakır matrisli kompozit elektrotun aşınma mekanizması incelenmiştir ve akım parametrenin dalgalanma frekansının mikro-EEİ'deki elektrot aşınmasına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında yüksek frekanslı darbeleri akımın matematiksel modeli işleme mekanizmasını iyileştirmiştir. Yüksek frekans darbeleri akım ve elektrot malzemesinin elektrot aşınmasına etkisini analiz etmek için kullanılmıştır. Boşalan akımının yüksek dalgalanma frekansı altında zamanla değişen elektromanyetik alan tarafından üretilen girdap akımı, elektrot yüzeyindeki akım yoğunluğunu değiştirebilir ve mikro-EEİ işlemi sırasında elektrot topoğrafyasının değişiminde önemli bir rol oynamaktadır.

2.3. Toz Katkılı Elektro Erozyon Yöntemi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

F.Q. Hu ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışma (Hu, ve diğerleri, 2013) ise, geleneksel EEİ ve toz-katkılı EEİ’de yüzey özelliklerinin nasıl etkilendiğini araştırmak için %40 takviye hacim oranına sahip SiC parçacıklı Al matris kompozitlerinin işlenebilirliği ele alınmıştır. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve sürtünme ve yıpranma test cihazı (HIT) ile, yüzey mikrotopografisi ve takım aşınma direnci analiz edilmiştir. Deneyler ve araştırmalar toz katkılı EEİ, geleneksel EEİ yöntemine kıyasla, işlenen yüzey özelliklerinin büyük ölçüde geliştirildiğini göstermiştir. Toz katkılı EEİ’de yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %31,5 oranında azalmıştır; korozyon direncinde iyileşme gözlenmiştir ve takım aşınma direnci EEİ’nin iki katına çıkmıştır. Toz katkılı EEİ yöntemi metal matris kompozit işleme alanında daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Chve er Prakash ve arkadaşları tarafından yayınlanan bir makalede (Prakash, Kansal, Pabla, ve Puri, 2017), doğrudan toz katkılı elektro erozyon işleme (TKEEİ) tekniği kullanılarak β -fazlı Ti alaşım bazlı implant üzerinde işlenilmiştir. TKEEİ, birbirine bağlı nano-gözenekliliğin (200-500 nm) yüksek boy-en oranına sahip mikro-pürüzlü bir yüzey üretilmiştir. TKEEİ tarafından üretilen nanogözenekli bir yüzeydeki insan osteoblast benzeri (MG-63) hücrelerinin canlılığı ve mineralizasyonu In-Vitro biyoaktivite analizi ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, EEİ tarafından elde edilen nano gözenekli yüzeyin, gözenekli olmayan numunenin yüzeyine kıyasla daha yüksek tutunma ve osteoblastik benzeri hücrenin (MG-63) büyümesini kolaylaştırdığını doğrulamıştır. Bu çalışmada, kemik implant ara yüz kuvveti ile uyumlu olarak yüzey özelliklerinin büyüklüğündeki değişimlere (nano-gözenekler) erişilmiştir. Kemik implant arayüz kuvvetinin gerilme ve kayma dayanımı açısından biyomekanik davranış, üç boyutlu sonlu eleman simülasyonlarından kaynaklanmıştır. TKEEİ, EEİ ve düzlem yüzey geometrilerinin (gözeneksiz) indüklediği farklı implant yüzey gözeneklerine karşı karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, TKEEİ tarafından üretilen nano-gözenekli yüzeyin, mineralli doku ürünlerinin tam olarak birbirine kenetlenmesinin, EEİ ile işlenmiş gözenekli geometrisi ve düzlem yüzey geometrileri (gözeneksiz) içeren modellere kıyasla daha yüksek kemik / implant ara yüz mukavemeti sergilediğini ortaya çıkarılmıştır.

Berilyum bakır alaşımı yüksek mukavemetli, manyetik olmayan, iyi aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek yorulma mukavemeti ve boşalım çıkarmayan niteliklere sahiptir.

Bu özellikler, geleneksel işleme süreçleriyle işlendiğinde işleme sorunlarını arttırmaktadır. Elektro erozyon işleme yöntemi, bu tür malzemeleri işlemek için pratik olarak uygun bir çözüm olmuştur. Son zamanlarda araştırmacılar, teknolojiye ilerlemeye birlikte toz katkılı elektro erozyon işlemesi ile ilgilenmişlerdir. Vijaykumar S. Jatti ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yaptıkları çalışma (Jatti ve Bagane, 2018), deneysel validasyon ile berilyum bakır alaşımının Toz katkılı Elektro Erozyon İşleme Sonlu Elemanlar modelini geliştirmeye odaklanmıştır. Tek bir boşalma işleme prosesi sırasında iş parçasının yüzeyinde sıcaklık dağılımını elde etmek için ANSYS yazılımı kullanılarak simetrik üç boyutlu model geliştirilmiş ve simüle edilmiştir ve işparça işleme hızı tahmin etmek için sıcaklık profili kullanılmıştır. Çalışmada sayısal sonuçları doğrulamak için deneyler yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında %7,8'lik ortalama yüzde hatası elde edilmiştir. Bu nedenle, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyuma elde edilmiş, yazılım modelinin gerçek zamanlı sonuçları verimli bir şekilde simüle edip tahmin edebildiğini gösterilmiştir.

Titanyum alüminid ara metallerde, eşsiz mekanik özelliklere sahip düşük yoğunluklu ve iyi oksidasyon, korozyon ve tutuşma direncine sahip bir malzemedir. Behzad Jabbaripour ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Jabbaripour, Sadeghi, Shabgard, ve Faraji, 2013) iki dizi işleme testi tasarlanmıştır. Öncelikle yüzey pürüzlülüğü ve topoğrafyanın çıkış karakteristiklerini, işparçası işleme hızı (İİH) incelemek için, alüminyum, krom, silisyum karbür, grafit ve demir gibi farklı tozlar ile Y-TiAl'un toz katkılı elektro erozyon işlemesi (TKEEİ) gerçekleştirilir. İşlenmiş numunelerin elektrokimyasal korozyon direnci ve ayrıca işlenmiş yüzeyler EDS ve XRD analizleri ile incelenmiştir. İkincisi, seçimden sonra, en uygun toz türü olan toz, akım, toz büyüklüğü ve toz konsantrasyonu, EEİ ve TKEEİ yöntemlerin işleme özellikleri arasındaki genel karşılaştırma yapılmıştır. Birinci işleme parametrelerinin ilk setinde, toz katkılı EEİ yönteminde kullanılan alüminyum tozu, TiAl numunesinin yüzey pürüzlülüğünü, EEİ işlemi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %32 iyileşmiştir, ikinci parametre olan İİH, EEİ ile karşılaştırıldığında %54'lük bir artış tespit edilmiştir. Elektrokimyasal korozyon sonuçları, grafit ve krom tozları ile işlenen numunelerin korozyon direncinin, sırasıyla tozsuz işlenen numuneden yaklaşık üç ve iki kat fazla olduğunu gösterilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada Vinay Kumar ve arkadaşları (Kumar V. , Kumar, Kumar, ve Singh, 2018) östenitlenmiş nikel-krom alaşımı, yüksek basınç ve sıcaklık ortamındaki oksidasyon ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı ve yüksek sıcaklıkta mukavemetini

koruyabilmesinden iş parçası olarak kullanmışlardır. Bu çalışmada pekleşme nedeniyle işlenmesindeki zorluk, takım ve iş parçasının doğrudan temas etmediği elektro erozyon işleme (EEİ) yönteminin seçilmiştir. Verimli işleme parametresi elde etmek için alüminyum oksit (Al_2O_3) mikro tozu ile karıştırılarak dielektrik kullanılmıştır. Giriş işlem parametreleri gerilim farkı, boşalma zamanı, toz konsantrasyonu ve akım olarak seçilmiştir. İşleme parametreleri olarak yüzey pürüzlülüğü (YP), işparça işleme hızı (İİH) ve yüzey bütünlüğü araştırılmıştır. Yüzey morfolojisini analiz etmek için SEM görüntüsü kullanılmıştır. Uygulama bazında östenitlenmiş nikel-krom alaşımı uzay mekiği, roket motoru ve motor yanma odası vb. itme makineleri olarak kullanılmaktadır. İİH ve YP'nin en yüksek akımın (I_p), doğrudan etkilendiği gözlemlenmiştir. Boşalma süresi ve gerilim farkı (GV) dielektrik yüzeydeki tozun kullanılmasıyla, geleneksel EEİ işlemine göre daha iyi pürüzlülük elde edilmiştir.

2008 yılında yapılan bir çalışma ise sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak toz katkılı elektro erozyon işleme (TKEEİ) için bir eksenel simetrik iki boyutlu model geliştirilmiştir. H.K. Kansal ve arkadaşlarının tarafından yapılan bu çalışmada (Kansal, Singh, ve Kumar, 2008) sunulan model, ısıya duyarlı malzeme özellikleri, ısı kaynağının şekli ve büyüklüğü (Gauss ısı dağılımı), takım, ısı parçası ve dielektrik sıvısı arasındaki ısıнын yüzde dağılımı, boşalma süresi / kapama zamanı ve faz değişimi gibi birçok önemli özelliği kullanılmıştır. Entalpi analizi TKEEİ prosesinde ısı davranış ve işparça işleme mekanizmasını tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Geliştirilen model ilk olarak iş parçası malzemesindeki sıcaklık dağılımını ANSYS yazılımı kullanarak hesaplanmış ve daha sonra işparça işleme hızı (İİH) sıcaklık profillerinden tahmin edilmiştir. Çeşitli işleme parametrelerinin, çalışma parçasının yarıçapı ve derinliği boyunca sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi rapor edilmiştir. Son olarak, model, laboratuvarında geliştirilen yeni tasarlanmış deney düzeneğinden elde edilen deneysel teori İİH ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

2017 yılında yapılan başka bir çalışmada S.Tripathy ve D.K.Tripathy (Tripathy, 2017) H-11 kalıp çeliğinin elektro erozyon işlemesi (EEİ) ve toz katkılı elektro erozyon işlemesi (TKEEİ) sırasında proses değişkenlerinin mikro sertlik üzerinde olan etkiler araştırılmıştır. Taguchi'nin L27 ortogonal dizisi, deneyi “toz konsantrasyonu (C_p), akımı (I_p), boşalma süresi (Ton), görev döngüsü (DC) ve boşluk voltajı (V)” ile krom tozu katılmış dielektrik sıvısı kullanarak deneyler işlenmiştir. Optimal ayarın oluşturulması için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Mikro sertliği tahmin etmek için ampirik bir model geliştirilmiştir.

Maksimum mikro sertlik için en uygun parametre seti 6 gm/L Cp, 9 A Ip, 150 μ s Ton, %80 DC ve 50 V Vg olarak tanımlanmıştır. Doğrulayıcı test, tahmin edilenle %1,95 arasında göreceli bir hata tesbit edilmiştir. Mikro sertliğin deneysel değerleri. Takımdan işlenmiş yüzeye, iletken toz ve dielektrik sıvıdan malzeme geçişi “Taramalı Elektron Mikroskobu” (SEM) ve “Enerji Dağılımlı Spektroskopi” (EDS) kullanılarak analiz edilmiştir.

Ahmed Al-Khazraji ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada (Khazraji, Amin, ve Ali, 2016), toz katkılı elektro erozyon işleme (TKEEİ) yöntem parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı (WLT) bakır ve grafit elektrotları, üretilen toplam ısı akısı ve yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelenmiştir. İki çalışma grubu için deneysel çalışma matrislerini planlamak ve tasarlamak için yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılmıştır: ilk EEİ grubu için, kerosen dielektrik tek başına kullanılırken, ikincisi ise dielektrik sıvıya karışan SiC mikro tozlarının eklenmesiyle işlenme gerçekleşmiştir. EEİ ve TKEEİ modellerinden sonra oluşan toplam ısı akısı ve yorgunluk, ANSYS yazılımı kullanılarak FEM tarafından incelenmiştir. Grafit elektrotlar, bakır elektrotlardan %82,4 daha yüksek bir toplam ısı akısı vermiştir; SiC tozu ve grafit elektrotları kullanılırken, %91,5 oranında bakır elektrotlardan daha yüksek bir toplam ısı akısı vermiştir. 5 μ m ve 5.57 μ m arasındaki en düşük WLT değerlerine, sırasıyla bakır ve grafit elektrotları ve SiC tozu kullanılarak düşük akımda yüksek akım ve düşük akımda ulaşılır. Bu, tek başına aynı elektrotlar ve kerosen dielektrik kullanımı ile karşılaştırıldığında, WLT’de sırasıyla %134 ve %110 oranında bir iyileşme olduğu anlamına gelmektedir. TKEEİ ve SiC tozu ile grafit elektrotlar, bakır elektrotların kullanımına kıyasla %7.30, bakır ve grafit elektrotlar ile tek başına kerosen dielektrik kullanılarak %14,61 ve %18,61 oranında deney yorgunluğu güvenlik faktörünü geliştirmiştir.

Hua ve arkadaşları tarafından kompozit malzeme işleminde 2013 yılında başka bir çalışma (Hu, ve diğerleri, Surface Properties of SiCp/Al Composite by Powder-Mixed EDM, 2013) daha yapılmıştır. Bu çalışma, yüzey özelliklerinin EEİ ve TKEEİ ‘de nasıl etkilendiğini araştırmak için SiC parçacık takviyeli Al matris kompozitlerin (SiCp / Al) bir tür orta hacimli fraksiyonunu (%40) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve sürtünme ve aşınma test cihazı (HIT) ile yüzey mikro topografyası, elementler ve aşınma direnci analiz edilmiştir. Deneyler ve araştırmalar, EEİ ile karşılaştırıldığında TKEEİ kullanılarak işlenen yüzey özelliklerinin büyük ölçüde geliştirildiğini gösterilmiştir. TKEEİ yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık %31,5 azala tesbit edilmiştir; Korozyon direnci iyileşmiş ve aşınma direnci EEİ’nin iki katına çıkmıştır.

Suvan Dev Choudhury ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışma (Choudhury, Saharia, ve Mondal, 2018), toz katkılı Elektro Erozyon İşleme (TKEEİ) ile ilgili bir çalışma sunmaktadır. Tozlu Karbon Nano Tüp (CNT) ve Alüminyum olmak üzere iki toz, bir dielektrik, yani kerosen içinde karıştırılmıştır. Deneyler, elektrot olarak pirinç EN19 alaşımlı çelik üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada (Al) ve (CNT) tozlarının akım (I_p), boşluk gerilimi (V_g) ve konsantrasyonları giriş parametreleri olarak alınmıştır. İşparça İşleme hızı ($\dot{I}H$), Takım Aşınma hızı (TAH) ve Yüzey Pürüzlülüğü (YP) işleme parametresi olarak değerlendirilmiştir. Deneylerin Tasarımı, söz konusu yanıtları temsil eden doğrusal olmayan regresyon denklemlerini (DOE) oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, modellerin istatistiksel yeterliliği ANOVA yardımıyla test edilmektedir. Daha sonra, deneysel test senaryoları, elde edilen doğrusal olmayan Regresyon modellerinin tahmin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamak için kullanılmıştır.

.Tripathy ve.D Tripathy tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada (Tripathy, 2017), toz konsantrasyonu (C_p), uygulanan akımı (I_p), boşalma süresi (Ton), görev döngüsü (DC) ve $\dot{I}H$, Yüzey Pürüzlülüğü (YP) ve boşluk gerilimi (V_g) gibi işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. H-11 kalıp çeliğinin TKEEİ sırasında aynı ve a Katman Kalınlığı (RLT) ve mikro sertlik (HVN) gibi değerler analiz edilmiştir. Taguchi'nin L27 ortogonal dizisi, deney takımı, takım elektrotu olarak bakır kullanılarak dielektrik akışkanına katılan silisyum karbür (SiC) tozu ile gerçekleştirilmiştir. Maksimum $\dot{I}H$, minimum YP, RLT ve maksimum HVN için aynı ve a işlem parametrelerinin optimal ayarını belirlemek için Gri İlişkisel Analiz kullanılarak çok amaçlı optimizasyon kullanılmıştır. Her bir işlem parametresinin etkisi incelenmiş ve Taguchi tekniği kullanılarak optimal parametrik ayar oluşturulmuştur. Sonuçlar doğrulayıcı testler yapılarak doğrulanmıştır. Mikroyapı analizi, kalıp çeliğindeki yüzey modifikasyonunu araştırmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilen işlenmiş yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir. GRA, Gri İlişkisel Sınıfta 0.1055 bir gelişme sergilenmiştir. Yanıt eğrilerinin sapma eğilimi, "toz konsantrasyonu için üçüncü seviye, I_p 'in birinci seviyesi, Ton'un ikinci seviyesi, DC'nin üçüncü seviyesi ve V_g 'nin ikinci seviyesi" nin, TKEEİ kullanılarak işlendiğinde maksimum GRG sağladığını gösterilmiştir.

Karbon nano tüpler (CNTs), yüksek elektriksel ve termal iletkenlik ve çok yüksek çekme mukavemeti gibi benzersiz özellikleri nedeniyle farklı araştırma alanlarında kullanılmıştır. Mohammadreza Shabgard ve Behnam Khosrozadeh yaptıkları çalışma (Shabgard ve

Khosrozadeh, 2017), bakır elektrotlar kullanılarak Ti 6Al – 4V alaşımlı işleme verimliliğini arttırmak için EEİ prosesinde dielektrik ile karıştırılmıştır. Bu çalışmada, CNT karışık dielektrik malzemenin işparça işleme hızı (İİH), takım aşınma hızı (TAH) ve iş parçasının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. İş parçalarının yüzey kalitesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiş ve dielektrikte CNT partikülleri varlığında yüzey’de mikro çatlaklarının azaldığı görülmüştür. CNT’lerin dielektrik içine eklenmesinin, İİH ve TAH’nı azaltan işleme stabilitesinde önemli avantajlar sağladığı gösterilmiştir. Araştırma bulguları, bu parçacıkların ilave edilmesinin, boşalım enerjisinin azaltılması ve düzgün dağılımı ile yüzey pürüzlülüğünü azalttığını açıkça göstermiştir.

Günümüzde tozla karıştırılmış elektro erozyon işlemede (TKEEİ), yüksek yüzey kalitesi elde etmek ve işparça işleme hızı (İİH) iyileştirmek için dielektriğe bir toz parçacık süspansiyonu eklemek çözüm olarak gösterilmektedir. Shih-Fu Ou ve Cong-Yu Wang tarafından yapılan çalışmada (Ou ve Wang, 2017), dielektrik olarak biyoaktif hidroksi-patit (HA) tantalum alaşımlarına dayanan makine yapımı implant materyalleri üzerinde durulmuştur. Toz partiküllerinin ve iş parçası bileşiminin işleme performansına etkisi araştırılmıştır. 5 g/L konsantrasyonlu bir süspansiyon dielektrikinin titanyum işleminde kullanılması, yeniden katılaşmış tabakasının 10 µm yakın kalınlığı ve Ra 2.4 µm yüzey pürüzlülük değerine sahip olmasına kıyasla, daha ince yeniden katılaşmış tabakası (~9 µm) ile daha pürüzsüz bir yüzeye (Ra 2.1 µm) neden olmuştur. Buna ek olarak, HA toz süspansiyonlu dielektrikte işlenen titanyum İİH suya göre çok daha düşük olmuştur. Bununla birlikte, HA konsantrasyonunun arttırılması İİH, takım aşınma oranı (TAO), yüzey pürüzlülüğü ve yeniden katılaşmış tabaka kalınlığında kademeli bir artışa yol açmıştır. İİH, TAO ve yüzey pürüzlülüğü, TKEEİ yöntem ile titanyum ve titanyum-tantalum alaşımlarının ergime sıcaklığı ve termal iletkenliğine göre ters bir ilişki sergilememiştir. Dahası, kalsiyum ve fosfor, yeniden kaplama tabakasına dahil edilmiş ve uygulanan akımın arttığında miktarları azalmıştır.

Toz katkılı Elektro erozyon işlemesi, tozların dielektrik ile karıştırılarak, iş parçasının yüzey kalitesi ve işparça işleme hızı (İİH) gibi tepkileri arttırdığı özel bir EEİ türüdür. Goutam Mondal ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada (Mondal, Surekha, ve Choudhury, 2018), 10 mm çapında silindirik pirinç elektrot kullanılarak EN-19 alaşımlı çeliğin işlenmesi için toz katkılı elektro erozyon işlemesi (TKEEİ) üzerinde deneysel

çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, proses parametrelerinin (akım (I_p), gerilim farkı (V_g) ve boşalım zaman (T_{on})) işparça işleme hızı ($\dot{I}H$), yüzey pürüzlülüğü (YP) gibi çeşitli tepkilere etkisini araştırmaktır. Dielektrik olarak, alüminyum, grafit, titanyum karbür ve çok katmanlı karbon nanotüp (CNT) gibi çeşitli tozlarla karıştırıldığında, takım aşınma hızı (TAH) ve radyal taşma (ROC) incelenmiştir. Tozların işleme süreci üzerindeki etkisini incelemek için işlenmiş yüzey üzerinde detaylı analiz yapılmıştır. CNT tozunun daha yüksek $\dot{I}H$ ve daha iyi yüzey kalitesi ile sonuçlanacağı, buna karşın alüminyum tozunun daha az TAH ve ROC sağladığı görülmüştür.

2016 yılında Chethan Roy ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir çalışmada (Chethan, Syed, ve Piue, 2016), toz katkılı elektro erozyon işlemede (TKEEİ) işlem parametrelerinin optimize edilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Yüzey metodoloji analizi deneyleri planlamak ve analiz etmek için kullanılmıştır. Uygulanan akımı (I), boşalma zamanı (T_{on}) ve Kerosen dielektrik (C) içindeki Al tozunun konsantrasyonu, elde edilen işparça işleme hızı ($\dot{I}H$), takım aşınma hızı (TAH) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Proses parametreleri MINITAB yazılımının tahmin edebilirlik fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak yüksek $\dot{I}H$, düşük TAH ve düşük R_a için optimize edilmiştir. Sık kısa devre nedeniyle, dielektrik sıvıya Al tozu eklenmesi $\dot{I}H$ 'i azaltırken, TAH düşük konsantrasyonlu sıvı-toz için 2 A düşük akım için azaltmıştır. Al tozunun ilavesi ayrıca yüzey pürüzlülüğünü 3,31 μm değerine arttırmıştır.

3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozitler (MMK), Tüm kompozitler gibi tek tek fazlardan herhangi biri ile elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere uygun şekilde dağıtılmış en az iki kimyasal ve fiziksel olarak farklı fazdan oluşmaktadır. Genel olarak, metal bir matris içinde dağıtılmış, örneğin bir lifli veya parçacık fazı olmak üzere iki faz vardır. Örnekler, güç iletim hatlarında kullanılan sürekli Al_2O_3 fiber takviyeli Al matris kompozitleri; Süper iletken mıknatıslar için bir bakır matrisinde Nb-Ti filamanları; kesme aleti ve delme uçları olarak kullanılan tungsten karbür (WC) / kobalt (Co) partikül kompozitleri ve havacılık, otomotiv ve termal yönetim uygulamalarında kullanılan SiC parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerdir.

3.1. Metal Matris Kompozitlerin Tipleri

Tüm metal matris kompozitler (MMK) matris olarak bir metal veya metalik alaşıma sahiptirler. Takviye metal veya seramik malzemeden olabilir. Bazı olağve ışı durumlarda, kompozit bir fiber takviyeli polimer matrisli kompozit tarafından takviye edilmiş bir metal alaşım matris oluşabilir. (Örneğin bir cam elyaf takviyeli epoksi veya aramid elyaf takviyeli epoksi).

Genel olarak, üç çeşit MMK vardır:

- (i) Parçacık takviyeli MMK'ler
- (ii) Kısa lif veya iğnecik takviyeli MMK'ler
- (iii) Sürekli fiber veya sac takviyeli MMK'ler

Sürekli fiber takviyeli kompozitler tüm tiplere göre en anizotropik yapıya sahiptir.

Süreksiz olarak güçlendirilmiş MMK'ler terimi, kısa lifler, iğnecik veya parçacıklar şeklinde takviyeler olan metal matris kompozitlerini göstermek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçacık veya süreksiz olarak güçlendirilmiş MMK'ler aşağıdaki nedenlerden dolayı özel bir öneme sahiptirler:

- Parçacık takviyeli kompozitler, sürekli fiber takviyeli kompozitlere göre ucuzdurlar. Maliyet, özellikle büyük hacimlerin gerekli olduğu uygulamalarda (örneğin, otomotiv uygulamaları) önemli bir parametredir.

- Döküm veya toz metalurjisi gibi geleneksel metalurjik işleme teknikleri, ardından haddeleme, dövme ve ekstrüzyon ile geleneksel ikincil işlem kullanılabilir.
- Güçlendirilmemiş metalden daha yüksek kullanım sıcaklıkları.
- Gelişmiş modül ve dayanım özellikleri
- Artan termal stabilitesi.
- Daha iyi aşınma direnci.
- Elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla nispeten izotropik özellikler.

3.2 Metal Matris Kompozitlerin Özellikleri

Metal matrisli kompozitlerin en önemli özelliklerinden biri, sertlik ve aşınma direncidir. Eşit derecede değerli olabilecek başka özellikler de vardır. Seramik takviyeleri eklenerek, genellikle kompozitin lineer termal genleşme katsayısı azaltılabilir. Bazı uygulamalarda elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri önemli olabilir. Metalik matris, küçük süper iletken filamentleri bir arada tutmanın yanı sıra, bazı durumlarda yüksek bir termal iletkenlik ortamı sağlar. Diğer önemli özellikler arasında aşınma direnci (örneğin kesme takımlarında kullanılan WC / Co kompozitlerinde veya fren sistemlerinde kullanılan SiC/Al rotorları) sayılabilir. Bu nedenle, genellikle metal matrisli kompozitler bağlamında güçlendirme ya da parçacık takviye kullanılsa da pek çok uygulamada mukavemet artırımının en önemli özellik olmayabileceğine işaret etmek gerekmektedir.

4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Metal matrisli kompozitler, genellikle sıvı ve katı hal süreçlerinde üretilmektedirler. Gaz hal süreçleride bu malzeme tiplerini üretmek için kullanılsa'da yaygın olarak kullanılan ve araştırılan yöntemler olarak sıvı ve katı hal prosesleri öne çıkmaktadır.

4.1. Sıvı Hal Prosesi

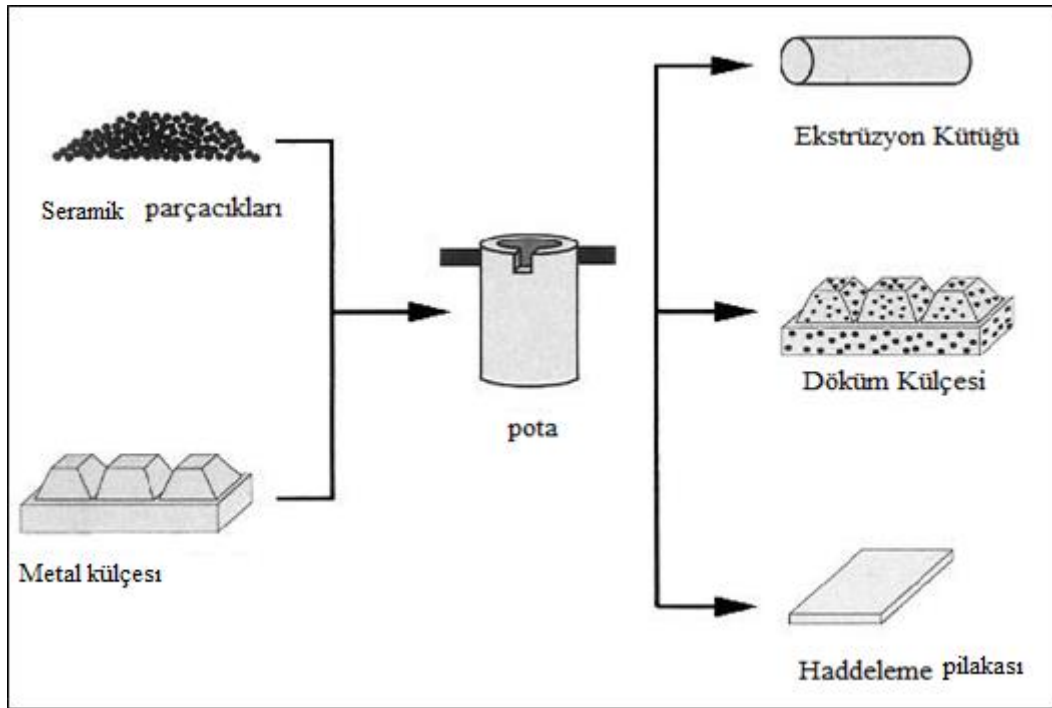
Metal matrisli kompozitler, bir sıvı metal matrisinin takviye ile birleştirerek üretilebilir. Sıvı hal prosesi ile üretim yöntemlerin birkaç avantajları vardır. Bunlar, geometrik düzgünlüğü (ekstrüzyon ya da difüzyon bağlanması gibi katı-hal süreçlerine kıyasla), daha hızlı işlem oranına ve Al ve Mg gibi en hafif metallerin eritilmesiyle ilişkili nispeten düşük sıcaklıkları içermesidir. En yaygın sıvı hal proses teknikleri dört ana kategoriye ayrılabilir:

- Döküm veya sıvı metal infiltrasyonu: Bu, bir lifli veya parçacıklı takviyenin sıvı metal tarafından infiltrasyonunu içerir. Kısa liflerin veya partiküllerin sıvı bir karışım halinde doğrudan verilmesi durumunda, sıvı metal ve seramik partiküllerinden veya kısa liflerden oluşan, genellikle parçacıkların homojen bir dağılımını elde etmek için karıştırılır.
- Sıkıştırılmalı döküm veya basınçlı infiltrasyon: Bu yöntem, lifli veya parçacıklı bir takviyenin basınç destekli sıvı infiltrasyonunu kapsamaktadır. Bu işlem özellikle karmaşık şekilli bileşenler, seçici veya lokal takviye için ve üretim hızının kritik olduğu durumlarda uygundur.
- Püskürtme çökmesi: Bu işlemde sıvı metal atomize edilir. Püskürtülürken, bir partikül enjektörü, püskürtme partiküllerinde granüle edilmiş bir kompozit partikül karışımı elde etmek için seramik partikülleri içerir. Kompozit parçacıklar daha sonra sıcak presleme, ekstrüzyon, dövme, vb. gibi başka uygun teknik kullanılarak birleştirilir.
- İn-situ işlemler: Bu durumda, takviye fazı, sentez sırasında reaksiyon yoluyla veya bir ötektik alaşımın kontrollü katılaştırılmasıyla yerinde oluşturulur.

4.1.1. Döküm

Alışılmış döküm

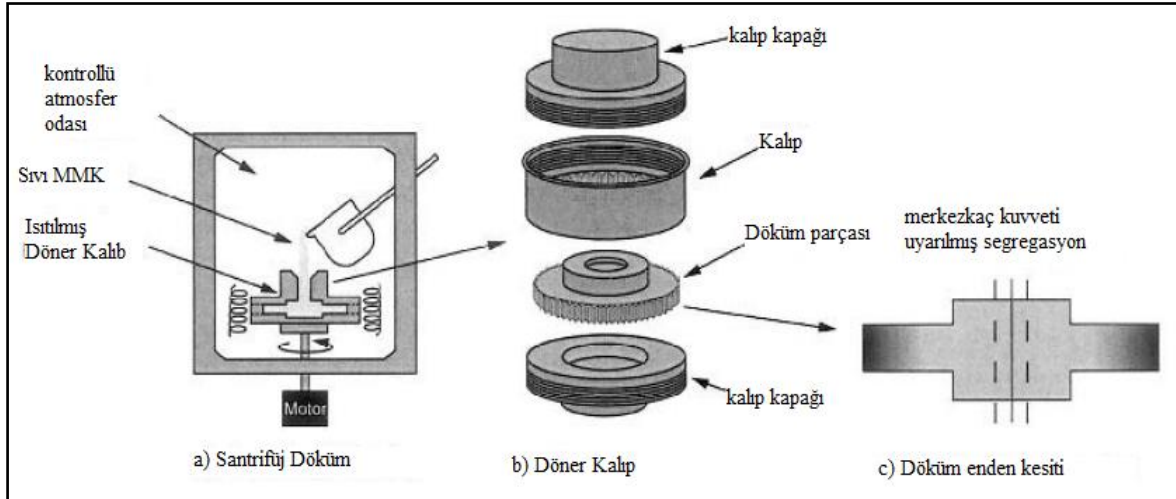
MMK'lerin dökümü, tipik olarak, metalik alaşımları dökmek için kullanılan geleneksel ekipmanlarla gerçekleştirilebilir. Genel olarak, döküm yöntemi basınçsız lifli takviyeli kompozitlerin dökülmesindeki zorluk nedeniyle, parçacıklı takviye kompozit üretiminde kullanılır. Parçacıklar ve matris karışımı külçe haline getirilir ve ekstrüzyon veya haddeleme gibi ikincil bir mekanik işlem kompozit üzerine uygulanır (Şekil 4. 1).



Şekil 4.1. Parçacık takviyeli MMK'lerin üretimi için geleneksel döküm yolu.

Savurmalı döküm

Seramik takviyeli MMK'lerin dezavantajlarından biri, güçlendirilmemiş alaşımdan daha zor işlenmeleridir. Savurmalı dökümde, kalıpların en uygun şekilde yerleştirilmesi, döküm sırasında hemen bir merkezkaç kuvvetinin üretilmesi ile sağlanabilir. Fren rotorlarında, örneğin, rotor yüzeyinde aşınma direnci gereklidir, ancak merkez alanında bu direnç gerekmiyor. Böylece, merkez alanında olduğu gibi, takviyenin çok önemli olmadığı alanlarda, takviye olmadan işleme daha kolay olacaktır (Şekil 4. 2).



Şekil 4.2. a) Savurmalı döküm işleminin şeması, (b) döner kalıp ve (c) dökümün enine kesiti

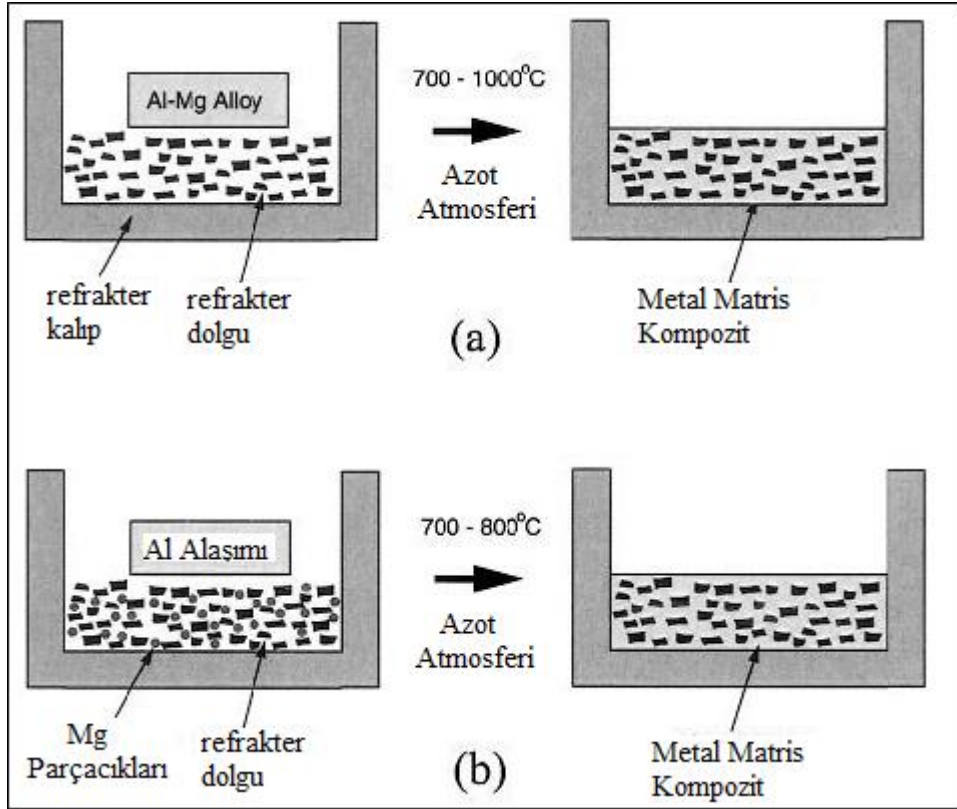
4.1.2. İnfiltrasyon

Metal matrisli kompozit (MMK) üretmek için bir dizi imalat tekniği geliştirilmiştir. Yüksek takviye seviyeleri gerektiğinde, sıvı metalin gözenekli seramik ön formlara girmesi tercih edilir, bunun nedeni ise yüksek ve arttırılmış aşınma direnci yüksek olan parçalarda üretilebilir. Sıvı metalin içeri itme kuvveti, ıslanabilirlik açısından metal / seramik çift arasındaki boşluk tarafından belirlenir.

İnfiltrasyon işleminde başlangıç noktası, takviye fazından yapılan bir ön formdur. Eriyik daha sonra tüm açık gözenekleri doldurmak için bu preforma infiltre olur. Eriyiğin hazırlanan preformu ıslattığı sistemlerde, akış yalnızca kılcallık kuvvetleri tarafından gerçekleştirilebilir; aksi takdirde, sürüklenme ve kılcallık nedeniyle kuvvetlerin üstesinden gelmek için mekanik kuvvet uygulanmalıdır. Bu işlemin mikroyapının çok iyi kontrol edilmesini sağlayan çok yönlü, net şekilli bir imalat yöntemi olduğu görülmektedir.

Sıvı metal infiltrasyon

Bu işlemde, parçacık veya lifli bir dolgu maddesi, metal veya metalik alaşımı ile infiltre edilir (Şekil 4. 3). Bu işlemde alaşımlı matrisler de oluşturulabilir. Örneğin, saf Al, Mg parçacıkları ile karıştırıldığında (seramik takviye partiküllerine ek olarak) bir Al-Mg alaşımı matrisi oluşur.



Şekil 4.3. MMK'lerin basınçsız infiltrasyonu: (a) Parçacık preformunun alaşımlı matris infiltrasyonu ve (b) metalik alaşımlı partikül ve seramik partikül preformunun saf matris ile infiltrasyonu

Basınçlı infiltrasyon

Sıkıştırılmalı döküm veya basınçlı infiltrasyonu, sıvı metal matrisin kısa bir lif veya partiküllü preformuna infiltre edilmesini içerir. Bu yöntemin geleneksel dökümlere göre başlıca avantajları aşağıda verilmiştir:

- Daha kısa işlem süresi (özellikle yüksek hacimlerde malzemelerin üretimi için), bu yöntemde çok önemli bir avantaj olarak sayılmaktadır. Özellikle vakumlu infiltrasyon yönteminde bu süre çok daha düşük olmaktadır (Çalın, 2010).
- Nispeten karmaşık şekiller üretme kabiliyeti, bu yöntemin diğer önemli avantajlarındandır. Bu yöntemde kullanılan mekanizma, döküm yöntemine yakın bir mekanizma olması özellikle basınçlı dökümde kullanılan mekanizmaya benzer bir yol izlemesi istenilen kalıplarda bu işlemi gerçekleştirme kabiliyeti verir. Çok karmaşık olmama şartıyla kalıplar kullanarak basınçlı veya vakumlu infiltrasyon yöntemini kullanarak MMK'ler üretilebilmektedir.

- Uygulanan basınca bağı minimum kalıntı gözenekliliği, büzülme boşlukları, takviye ve matris arasındaki ara yüzey reaksiyonların en aza indirgenmesi bu yöntemin diğer avantajlarından biridir (daha kısa işleme süreleri nedeniyle).
- Bu yöntemin diğer sıvı hal yöntemlerle kıyasla başka bir avantajı yüksek takviyede MMK üretim kapasitesidir. Yapılan çalışmalarda (Çıtak, Çalın, ve Zühtü, 2010; Saha, Morris, Chawla, ve Pickard, 2002) bu oranlar T-H %40 takviye hacim oranlara başarıyla ulaştığı görülmüştür.

İnfiltrasyon gerçekleşmeden önce, takviye preformu hazırlanır. İstenilen sıvı süzülmesini sağlamak için, erimiş metal nispeten düşük bir viskoziteye ve iyi ıslatılabilirlik özelliğe sahip olmalıdır.

Basınçlı infiltrasyon ayrıca nispeten yüksek takviye hacmi oranları ($> \%40$) olan kompozitlerin elde edilmesi için de kullanılabilir (Saha, Morris, Chawla, ve Pickard, 2002). Geleneksel dökümünde, takviye yüksek hacimli fraksiyonlarda homojen bir partikül dağıtımı elde etmek zordur. Bu teknik ayrıca sürekli fiber takviyeli MMK'leri imal etmek için kullanılmıştır.

İnfiltrasyonu sırasında oluşan mikroyapı değişimi

İnfiltrasyon sırasında kompozitin mikro yapısı, preform içindeki lokal katılaşma ve soğutma işlemlerine bağlıdır. Sıvı metal, daha düşük bir sıcaklıkta olan preform ile temas ettiğinde katılaşır. İnfiltrasyon bölgesinde, metal ilk önce katılaşır, preformun ortasında nispeten sabit bir sıcaklık elde edilir. Ancak infiltrasyon geçidine yakın yarı katı metal, sürekli olarak sıvı metal ile temas halinde olacaktır. Bir ikili alaşım matrisi kompoziti için infiltrasyon yönü, sıcaklık dağılımı ve sıvı metal bileşimi önemli parametrelerdendir.

Ayrıca tane büyüklüğü ve dağılımı, yerel sıcaklık dağılımı ve soğutma oranından etkilenecektir. Çoğu Al matrisli kompozitlerde, örneğin, tane boyutu genellikle takviye boyutundan çok daha büyüktür.

Bazı durumlarda, özellikle elyaf takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda, takviye, sıvı metalden ısı taşınımını engeller ve bu da takviye edilmemiş alaşımdan daha büyük ölçüde dendritik büyüme sağlar.

Matrisin mikro yapısı sadece sıcaklık ve kompozisyon gradyanlarının bir fonksiyonu değil, aynı zamanda sıvının hızı ve interfiber boşluklarının bir fonksiyonudur.

4.1.3. Püskürtme çökeltisi

Püskürtme çökeltisi, metalik alaşımları toz halinde imal etmek için kullanılmaktadır. Metal veya alaşım ergitilir ve sıvı akışı su veya bir inert gaz ile atomize edilir. Sıvı maddenin katılaşması, ince bir katı toz ile sonuçlanır. Bu teknik, takviye partiküllerin enjekte edilmesi veya partiküllerin matris alaşımı ile birlikte çökertilmesiyle modifiye edilmiştir. Bu tekniğin avantajı, partikül ve matris arasındaki herhangi bir reaksiyonu en aza indiren yüksek hızlı üretim oranı ve çok hızlı katılaşma oranıdır. Bu işlemin önemli dezavantajlarından biri üretilmiş parçanın tam olarak yoğun olmamasıdır, bu nedenle kompozitin tamamen yoğunlaştırılması ve homojenleştirilmesi için ikincil işlem gereklidir. Bu işlem oldukça esnek, çünkü metal ve takviye püskürtücüleri in situ laminatlar veya hatta fonksiyonel olarak derecelenmiş malzemeler elde etmek için uyarlanabilir. Ancak, ekipmanın yüksek maliyeti nedeniyle oldukça pahalı bir yöntemdir.

4.1.4. İn situ yöntemi

In situ işlemi iki ana kategoriye ayrılır: Reaktif olan ve reaktif olmayan süreçler. Reaktif süreçlerde, iki bileşen, takviye fazını oluşturmak için ekzotermik olarak reaksiyona girmeye bırakılır. Tipik olarak, matris alaşımında oldukça yüksek hacimde bir seramik parçacık fraksiyonu oluşur ve bu ana alaşım, istenen takviye hacmi fraksiyonunun bir kompozitini elde etmek için matris alaşımı ile seyreltilir.

İn situ reaksiyon işlemlerinin avantajı, genel olarak, tepkimenin genel olarak partikülün ıslanması ile ilişkili problemleri ortadan kaldırmasıdır, bu nedenle nispeten temiz ve güçlü bir arayüz oluşur. Bununla birlikte, bu yöntemin dezavantajları reaksiyon işleminin yararlı olduğu kompozit sistemlerin sayısının sınırlı olması, üretilen parçacıkların nispeten ince boyutlu dağılımı ve ergimiş metalin viskozitesini önemli ölçüde artırabilmesidir.

Reaktif olmayan in situ prosesler, fiber ve matris oluşturmak için, ötektik veya monotektik alaşımlar gibi iki fazlı sistemlerden faydalanır. Öndökümlü ve homojenleştirilmiş malzeme bir grafit pota içinde eritilir ve bir vakum veya inert gaz atmosferinde bir kuartz tüpünde

doldurulur. Isıtma, genellikle endüksiyon ile gerçekleştirilir ve termal gradyan pota soğutmasıyla elde edilir. Özellikle titanyum gibi reaktif metaller kullanıldığında elektron demet ile yağmur ısıtması da kullanılabilir. Bu yöntemde, katılaşma oranı kontrol edilerek, mikroyapının inceliğini, takviyenin büyüklüğünü ve aralığını (sabit hacim fraksiyonunda) kontrol edilebilir.

4.2. Katı hal prosesi

Sıvı faz teknikleriyle ilişkili temel dezavantaj, takviye dağıtımının kontrol edilmesinde ve tekdüzey bir matris mikro yapısının elde edilmesinde güçlütür. Ayrıca, matris ve takviye arasındaki istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının, sıvı işlemede yer alan yüksek sıcaklıklarda meydana gelmesi muhtemeldir. Bu reaksiyonlar, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir. En yaygın katı faz işlemleri toz metalurji tekniklerine dayanmaktadır (Ghosh, 1993). Bunlar tipik olarak karıştırma kolaylığı ve yoğunlaşmanın etkinliği nedeniyle süresiz takviye içerir. Seramik ve metal tozları karıştırılır, izostatik olarak soğuk sıkıştırılır ve tam basınca kadar sıcak preslenir. Tam yoğunluk elde etmek için, daha sonra tipik olarak ekstrüzyon veya dövme gibi ikinci bir işleme uygulanır. Sinterleme-presleme gibi yeni düşük maliyetli yaklaşımlar, ümit verici sonuçlarla sıcak basma aşamasını ortadan kaldırmayı amaçlamıştır (Chawla, Williams, ve Saha, 2002).

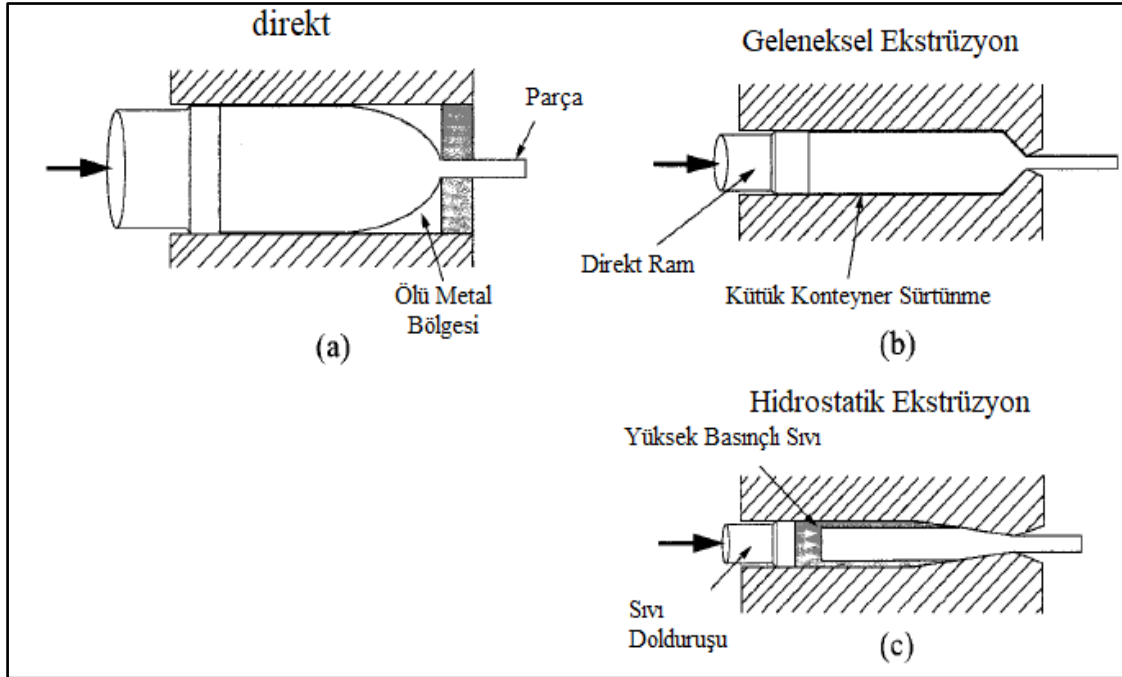
4.2.1. Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurji yönteminde matris ve takviye tozları homojen bir dağılım oluşturmak için karıştırılır. Karıştırma aşamasını, yaklaşık %80 yoğun olan ve kolayca işlenebilen bir gövde adı verilen soğuk presleme takip eder. Metalik toz parçacıklarının seramik parçacıklara veya diğer metalik partiküllerine bağlanması ile ilgili problemlerden biri, metal partikül yüzeyinde değişmez bir şekilde mevcut olan oksitdir (Ve erson ve Foley, 2001). Asal bir atmosferde gazdan arındırma ve sıcak presleme, parçacık yüzeyinde bulunan metal hidritlerin uzaklaştırılmasına katkıda bulunur, bu da oksitli yüzeyi daha kırılğan yapar ve böylece daha kolay bir şekilde kırılır. Malzeme tamamen yoğun bir kompozit üretmek ve ekstrüde etmek için tek eksenli veya izostatik olarak sıcak preslenir. Sert parçacıklar veya lifler deforme olmaz ve matrisin deforme olmasına neden olur.

Takviye parçacık büyüklüğünün matris parçacık büyüklüğüne oranı, matriste partikülün homojen dağılımını sağlamada çok önemlidir. Parçacık dağılımındaki homojenlik derecesi bir küme parametresi ile ölçülebilir. Ceramic parçacık kümelenmesini metal matris kompozitlerinde ölçmek için çeşitli teknikler kullanılmıştır (Spowart, Maruyama, ve Miracle, 2001; Yang, Boselli, ve Sinclair, 2001).

4.2.2. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işlemi, MMK'lerin ikincil deformasyon işleminin bir aracı olarak yaygın biçimde kullanılmıştır. Basınç ve sıcaklığın kombinasyonu metal partikülleri ile ceramic partikülleri arasındaki kayma ile sonuçlanır. Bu nedenle, metal cinsindeki oksit yüzeyin kırılmasına katkıda bulunan ve özellikle partikül ile matris arasındaki bağın artması nedeniyle avantajlıdır. Bununla birlikte, bu işlemle ilişkili büyük gerilimlerden dolayı, ekstrüzyon, takviye kırılmasının en aza indirilmesi için esas olarak süreksiz takviye ile kompozitlerin birleştirilmesi için kullanılmıştır. Kesintisiz takviyeli malzemelerde bile, kısa liflerin veya parçacıkların kırılması sıklıkla gerçekleşir, bu da kompozitin özelliklerine zarar vermektedir. Üç tip ekstrüzyon Şekil 4. 4'de doğrudan, konvansiyonel ve hidrostatik olarak gösterilmiştir. Doğrudan ekstrüzyonda, ekstrüde malzeme küçük bir menfez ile düz bir plakaya karşı deforme olur. MMK'lerde, bu etki özellikle parçacıkların varlığından dolayı şiddetlenir ve metal / takviye ara yüzeyindeki büyük kesme gerilmeleri malzeme süreksizliği ile sonuçlanır. Son olarak, ekstrüzyonun bir yüksek basınçlı sıvı içinde gerçekleştirilmesiyle kalıp fonksiyonunun sorunları en aza indirilebilir. Bu, malzeme ile kalıp arasındaki temas alanı minimize edildiğinden, hidrostatik stres durumuna ve kütükteki sürtünmenin en düşük olmasına neden olur.



Şekil 4.4. Üç tip ekstrüzyon işlemi: (a) direkt, (b) konvansiyonel ve (c) hidrostatik. İkincisi, kalıp sürtünmesini en aza indirir.

Geleneksel toz metalurjisi işleminin ve ardından ekstrüzyonun bir dezavantajı, işlemin yüksek maliyetidir. Yüksek maliyet esas olarak bu aşınmaya dayanıklı kompozitlerin işlenmesindeki zorluk ve bir bileşen üretmek için üretilen malzeme atığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ekstrüzyon prosesi, özellikle havacılık sektöründe çok zorlu uygulamalar için kullanılırken, düşük maliyet ve yüksek hacmin performans kadar önemli olduğu uygulamalar için elverişli değildir.

4.2.3. Difüzyon Yapışması

Difüzyon yapışması, benzer veya farklı olmayan metallerin birleştirilmesi için yaygın bir katı hal proses tekniğidir. Atomların birbiri ile temas halinde olan temiz metal yüzeylerden yüksek bir sıcaklıkta difüzyonu, bağlanmalara yol açmaktadır. Bu tekniğin en önemli avantajları, çok çeşitli matris metalleri üretmek ve fiber hacim fraksiyonunu kontrol etme yeteneğidir. Dezavantajlar arasında uzun üretim süreleri, yüksek işlem sıcaklıkları ve basınçları (işlemi pahalı hale getirir) ve üretilebilecek şekillerin karmaşıklığıdır.

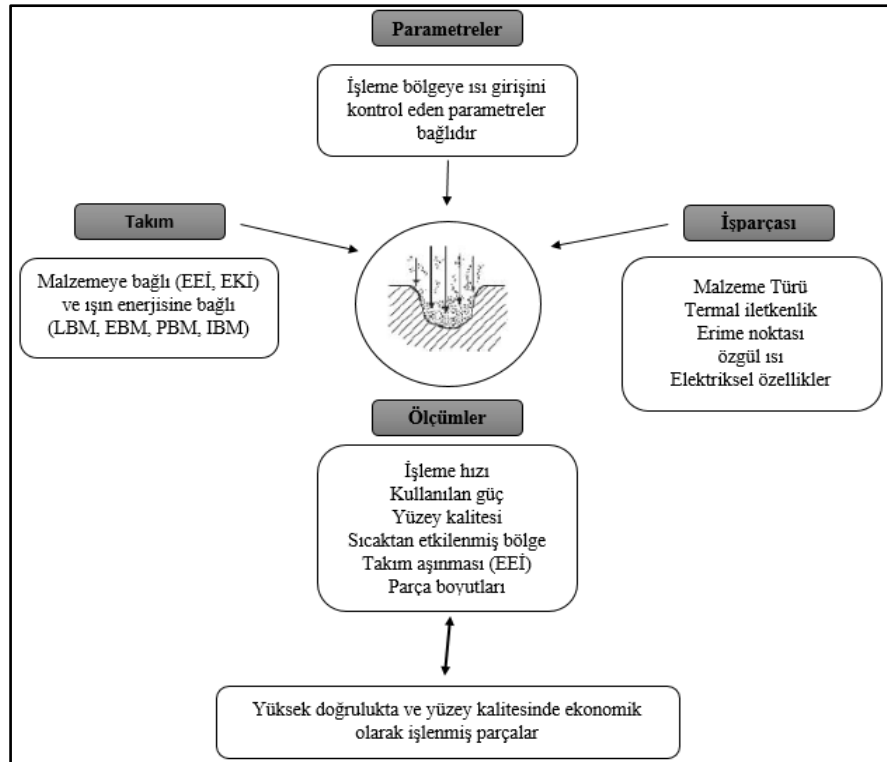
5. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

EEİ'nin tarihi, Lazarenko direnç-kapasitör devresini (RC) icat ettiğinde, II Dünya savaş tarihlerine dayanır. 1940 yılından bu yana, EEİ kalıp dalma darbe jeneratörler, gezegen ve yörünge hareket teknikleri, bilgisayar sayısal kontrol (CNC) ve adaptif kontrol sistemleri kullanılarak geliştirilmiştir. 1970'lerde tel EEİ'nin evrimi temel olarak güçlü jeneratörler, yeni tel takım elektrotları, gelişmiş makine zekâsı ve daha iyi dielektrik yıkamadan kaynaklanmıştır. Son zamanlarda, işleme hızı 20 kat artmış olması, işleme maliyetini en az %30 azalmasına ve yüzey kalitesini 15 kat arttırılmasına neden olmuştur (Helmi ve Youssef, 2008).

5.1. Elektro Erozyon İşlemenin Avantajları

- İnce delikler ve ince özelliklere sahip boşlukların üretilmesi.
- Çapaksız olan zor geometriler için kullanılması.
- İşleme malzemesinin sertliğinden etkilenmemesi.

Şekil 5.1'de. Elektro erozyon ile işlemenin ana faktörleri gösterimi verilmiştir.

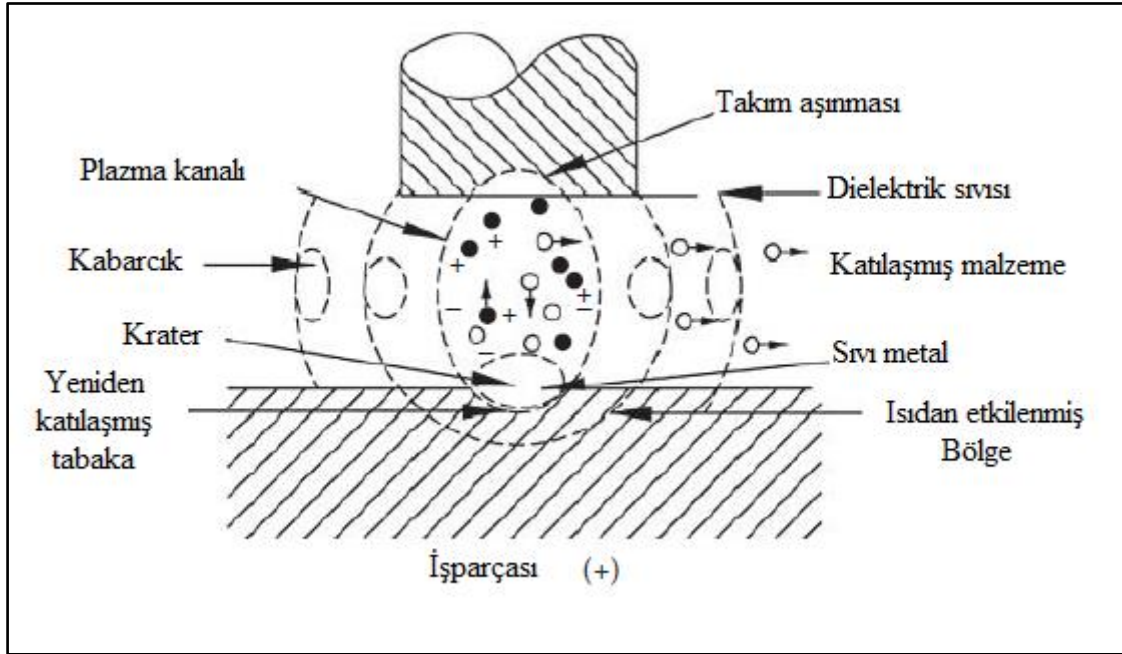


Şekil 5.1. Elektro erozyon ile işlemenin ana faktörleri

5.2. İşleme Mekanizması

EEİ’de, malzemenin işlenmesi, Şekil 5.2’de gösterildiği gibi, bir dielektrik sıvı ile ayrılan iki elektrot arasında meydana gelen elektriksel boşalımların elektro erozyon etkisine dayanmaktadır. Malzeme işlenmesi, iki elektrotun ergiyen ve buharlaşan yüksek yoğunluklu boşalımlar tarafından üretilen ve aşırı yüksek sıcaklığın üretilmesinin bir sonucu olarak gerçekleşir. İki elektrot arasında, 20 – 120 V arası bir aralıkta gerilim farkı ve 5 kHz’lık bir frekans uygulanır, bunlar tipik olarak 0.01- 0.5 mm’lik küçük bir aralık ile ayrılır (Jain, 2004).

Akım boşalmalarının uygulanması, dielektriğin 10 μm ’lik bir kanalda elektriksel bozulmasına neden olur. İşleme, uygulanan akımın ve boşlukta mevcut olan serbest elektronların katottan yayılan diğer elektrota (anoduna) doğru olan ivmesinden kaynaklanır. Bu elektronlar, dielektriğin nötr atomlarıyla çarpışır, böylece pozitif iyonlar ve daha sonra sırasıyla katot ve anoda doğru hızlanan elektronlar oluştururlar (Helmi ve Youssef, 2008; Jain, 2004).



Şekil 5.2. Elektro erozyon işlemede boşalımın şematik gösterimi

Elektronlar ve pozitif iyonlar anot ve katot yüzeylerine ulaştıklarında, kinetik enerjilerini ısı vasıtasıyla bırakırlar. Yaklaşık 8,000 °C – 12,000 °C ve 1017 W / m²’ye varan ısı akışı elde edilir. Tipik olarak 0.1 ile 2000 μs arasında çok kısa süren bir boşalım ile, elektrotların

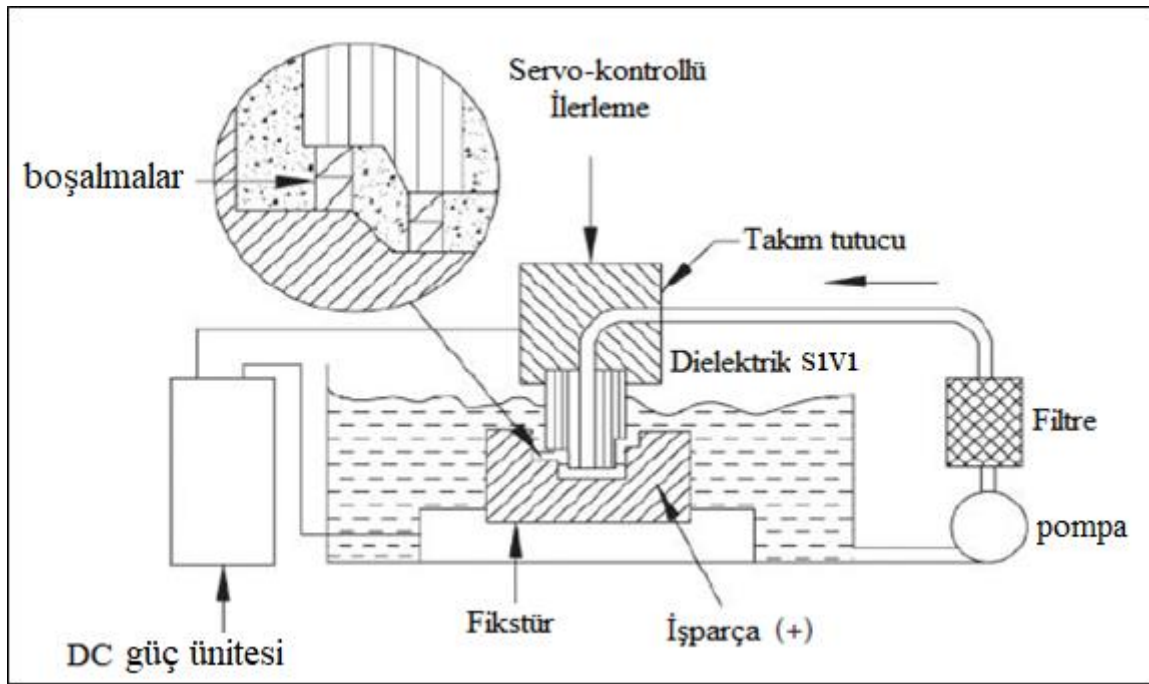
sıcaklığı, normal kaynama noktalarından daha fazla lokal olarak yükseltilebilir (Helmi ve Youssef, 2008; Hassan, 2014). Dielektriğin buharlaşmasından dolayı, plazma kanalı üzerindeki basınç hızla 200 atmosfere kadar yüksek değerlere çıkar. Böyle büyük basınçlar, aşırı ısıtılmış malzemenin buharlaşmasını önler. Boşalmanın sonunda, basınç aniden düşer ve aşırı ısıtılmış malzeme buharlaşır. Şekil 5.2’de gösterildiği gibi malzeme elektrotlardan kaldırılır. Dielektrik sıvı püskürtülür, kalıntıları giderilir ve iş parçasının yüzeyini temizler. Ayrılmayan ergimiş malzeme, yeniden tabaka oluşturmak üzere katılaşır. Kaldırılan metal, elektrottan an gelen parçacıklarla birlikte dielektrik sıvısı içinde dağılmış küçük küreler halinde katılaşır. Anot ve katottan çıkartılan materyal arasındaki ilişki, elektronların ve pozitif iyonların toplam akım akışına olan ilgili katkısına bağlıdır (Hassan, 2014).

İş parçasına doğru sağlanan yüksek akım darbelerinin frekansı, ileriye doğru hareket eden ve kontrol edilen takım hareketi ile birlikte, elektrotların tüm uzunluğu boyunca boşalım oluşmasını sağlar. Bu gibi yüksek frekanslı boşalımlarda, tek tek boşalımların kombine etkileri, önemli ölçüde işparçası işleme hızı verir. Takım elektrotunun pozisyonu, aktif boşalmalar yoluyla işleme verimliliğini arttırmak için iki elektrot arasında 200–500 µm sabit aralık genişliğini koruyan servo mekanizma tarafından kontrol edilir (Helmi ve Youssef, 2008; Jain, 2004; Hassan, 2014).

Bununla birlikte, akım darbesinin düşük süresi ve uzun şarj süreleri nedeniyle yüksek frekanslar kullanma zorluğu gibi birçok sınırlama mevcuttur. Modern EEİ makinelerinde tranzistörlü vurum devreleri kullanılmaktadır. Aynı enerji için işparça işleme hızı, elektrot (takım) aşınması ve yüzey kalitesi gibi EEİ performans ölçümleri, akım darbelerinin şekline bağlıdır. Elektrotlar aralığındaki duruma bağlı olarak, dört farklı elektrik darbesi ayırt edilir. İşparça işleme hızı ve takım aşınması hızı üzerindeki etkileri oldukça farklıdır. Her iki elektrot arasındaki mesafe çok büyük olduğunda meydana gelen açık boşluk gerilimleri açık bir şekilde herhangi bir işparça işleme veya elektrot takım aşınmasına katkıda bulunmaz. Takım ve iş parçası arasında ani bir temas meydana geldiğinde, malzeme kaldırma işlemine katkıda bulunmayan bir mikro kısa devre oluşur. Bu iki aşırı durum arasındaki elektrot mesafesinin aralığı fiili boşalmalar, yani boşalımlar ve yaylar için pratik çalışma boşluğunu oluşturur.

5.3. Elektro Erozyon ile İşleme Tezgâhı

EEİ tezgahının ana bileşenlerini Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Takım besleme servo kontrol ünitesi, işleme boşluğunda aktif boşalımların (boşalımlar) oluşmasını sağlayan sabit bir işleme boşluğunu korur. Güç kaynağı, belirli bir voltaj ve akımda, açık ve kapalı zamve a vurumların oluşumunu sağlar. Dielektrik sirkülasyon ünitesi, dielektriği tezgâhın dielektrik tankından filtrelendikten sonra elektrotlar arasında bulunan boşluğuna akıtır.



Şekil 5.3. Elektro erozyon ile işleme tezgâhının ana bileşenleri

5.3.1. Elektro Erozyon ile İşleme Elektrotları

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller ve iyi elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler genellikle EEİ için takım malzemesi olarak seçilir. Grafit, en yaygın elektrot malzemelerdendir. Bakır, iyi bir EEİ takımı olarak aşınma özelliğine ve daha iyi iletkenliğe sahiptir ve genellikle 0.5 μm Ra değerinde daha iyi yüzeyler için kullanılır (Helmi ve Youssef, 2008; McGeough J. , 2002). Bakır tungsten ve gümüş tungsten, özellikle tungsten karbürlerde kötü dielektrik sirkülasyon koşulları altında derin kraterler yapmak için kullanılır. Ayrıca daha yüksek işleme hızları yanı sıra düşük elektrot aşınmasına da sebep olur. Yanal aşınması daha yüksek olmasına rağmen grafitten daha iyi bir elektriksel iletkenliğe sahiptir. Pirinç, kararlı boşalma koşulları sağlar ve normalde, yüksek elektrot aşınmasının kabul edilebilir olduğu küçük deliklerin delinmesi gibi özel uygulamalar için

kullanılır. Elektrot polaritesi hem iş parçasına hem de elektrot malzemelerine bağlıdır. Takım aşınmasının belirlenmesinde ergime noktası en önemli faktördür. Çizelge 5. 1, bazı EEİ elektrotlarının fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 5.1. Kullanılan elektrotların fiziksel özellikleri

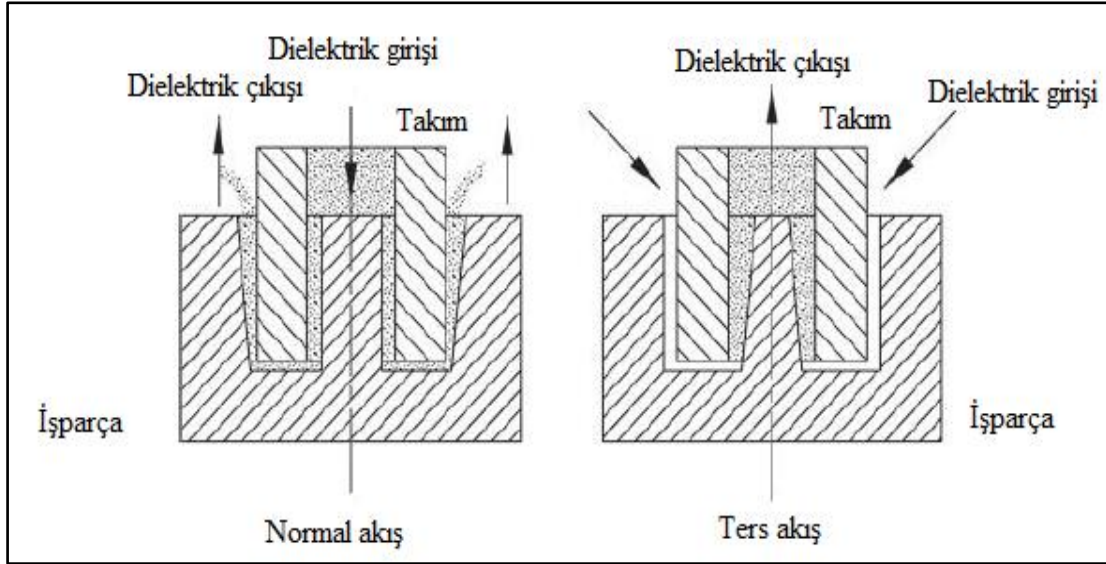
Özellikler	Bakır	Grafit	Tungsten	Demir
Ergime noktası, ° C	1083	-	3395	1535
Kaynama noktası, ° C	2580	>4000	5930	2800
Oda sıcaklığında 1 cm ³ buharlaştırmak için gerekli ısı, cal / cm ³	12740	20000	22680	16900
Termal iletkenlik, Ag = 100	94.3	30	29.6	16.2
Elektriksel iletkenlik, Ag = 100	96.5	0.1	48.1	16.2
Termal genleşme, her ° C × 10 ⁶	16.0	4.5	4.6	15
Gerilme dayanımı, MPa	241	34	4137	276
Elastisite modülü, MPa × 10 ³	124	5.9	352	186

5.3.2. Dielektrik Akışkanlar

Dielektrik akışkanın ana fonksiyonları aşınmış partikülleri işleme boşluğundan temizlemek, elektrot ve iş parçası arasında yalıtım sağlamak ve boşalım etkisi ile ısıtılan işleme alanını soğutmaktır.

EEİ’de dielektrik akışkanların temel gereksinimleri yeterli viskozite, yüksek tutuşma sıcaklığı, iyi oksidasyon kararlılığı, minimum koku, düşük maliyet ve iyi elektriksel boşalma verimliliğidir. Çoğu EEİ operasyonu için, gaz kabarcıklarını ve koku gidericilerini önleyen ve bazı katkı maddeleri bulundurabilen kerosen yağı (gaz yağı) dielektrik olarak kullanılır (Hassan, 2014; McGeough J. , 2002). Diğer dielektrik akışkanlar arasında sulu etilen glikol çözeltileri, emülsiyonlarda su ve saflaştırılmış su bulunur. Dielektriğin filtrelenebilirliği, kararlı işlemenin sürdürülmesinde ve daha iyi boyutsal tolerans ve iyi yüzey kalitesinin elde

edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. EEİ uygulamalarının çoğunda, dielektrik akışkan, basınç altında, takım içinde bir veya daha fazla geçiş yoluyla sokulur ve takım ile iş parçası arasındaki boşluktan geçmeye zorlanır. Yıkama delikleri genellikle kesiklerin en derin olduğu alanlara yerleştirilir. Normal akış bazen istenmeyen bir durumdur çünkü Şekil 5.4’de gösterildiği gibi iş parçasında sivri bir açıklık oluşturur. Ters akış, normal akış modu durumunda üretilen koninin azaltıldığı derin boşluk kalıplarının işlenmesinde faydalıdır (Pecas ve Henriques, 2002; Yeo, Kurnia, ve Tan, 2008). Boşluk, filtrelenmiş bir dielektrik içine daldırılır ve kaynağa uygulanan basınç yerine, bir vakum kullanılır. İş parçası ve takım arasında akan temiz akış ve a, yan boşalım oluşmaz ve bu nedenle, koniklik oluşmaz. Dielektrik beslemenin diğer yöntemleri, daldırılmış jet ve süpürme nozulu yıkama modlarını içerir.

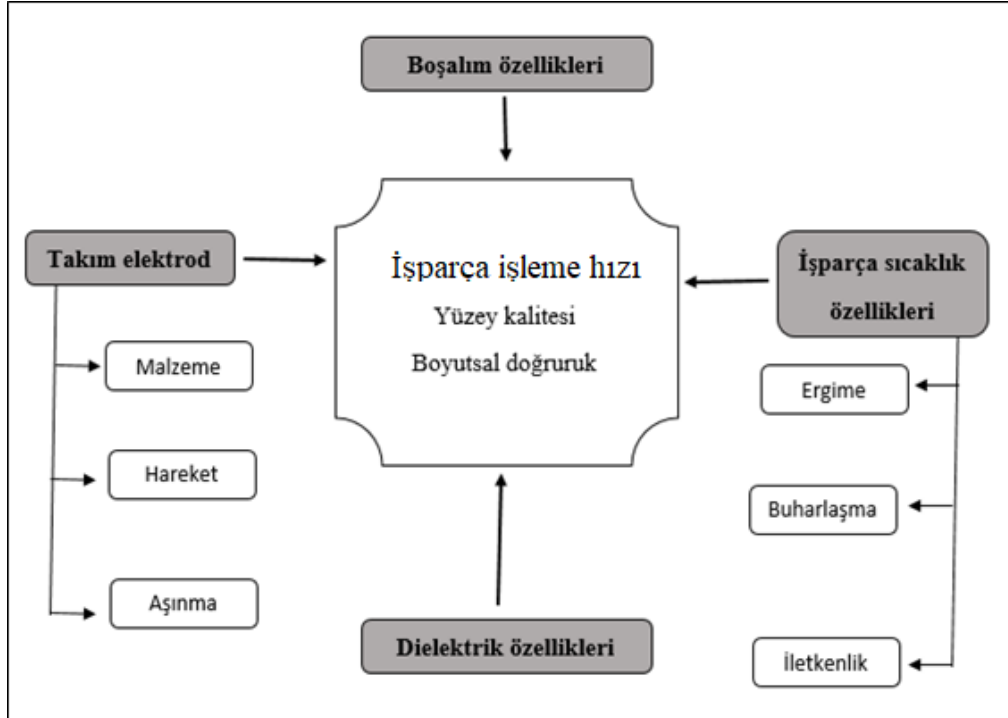


Şekil 5.4. Kullanılan farklı dielektrik yıkama modları

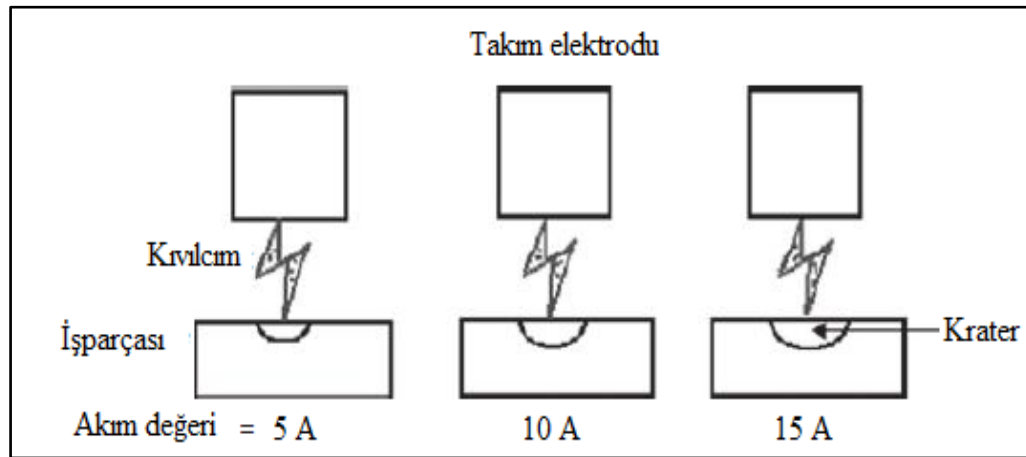
5.4. Malzeme İşleme Hızları

EEİ’de, malzeme hem iş parçasından hem de takım elektrotundan kaldırılır. Şekil 5.5’ten görülebileceği gibi, işparça işleme hızı sadece iş parçası malzemesinden değil, aynı zamanda takım elektrotunun malzemesine, darbe koşulları, elektrot polaritesi ve işleme ortamı gibi işleme değişkenlerine bağlıdır. Bu bağlamda, düşük ergime noktalı bir malzeme, yüksek malzeme kaldırma oranına ve dolayısıyla daha kaba bir işlenmiş yüzeye sahiptir. Tipik işparça işleme hızı 0,1 ila 103 mm³/dk arasında değişir (Helmi ve Youssef, 2008; Hassan, 2014; McGeough J. , 2002). Şekil 5.6 ve 5.7, boşalma büyüklüğünün (akım) ve boşalım

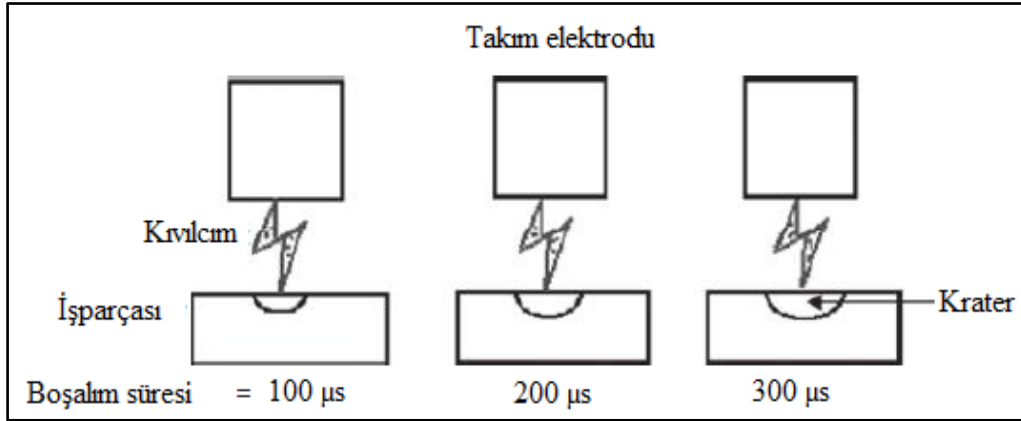
süresinin krater büyüklüğü üzerindeki etkisini ve dolayısıyla işparça işleme hızını açıklamaktadır.



Şekil 5.5. EEİ performansını etkileyen parametreler



Şekil 5.6. Boşalma darbenin (akım) elektro erozyon işleminde yarattığı kraterler



Şekil 5.7. Boşalma süresinin elektro erozyon işlemede krater boyutu üzerindeki etkisi

5.5. Yüzey Tamlığı

Boşalım ile işlenmiş yüzey, mikro saniye süren boşalım deşarjlarının hareketiyle oluşan çok sayıda örtüşen krater oluşur. Bu kraterler, Şekil 5.6 ve 5. 7’de gösterildiği gibi malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine ve işleme ortamının bileşimine ve boşalma enerjisine ve süresine bağlıdır (McGeough J. , 2002). Saniyede binlerce boşalımın ayrılmaz etkisi, belirtilen hassasiyet ve yüzey kalitesi ile ilgili iş parçası profilinin oluşmasına yol açar.

5.6. Isıdan Etkilenmiş Bölge

8,000 °C – 12,000 °C sıcaklığına ulaşan boşalımlar, iş parçasının yüzey tabakasında metalürjik değişiklikler meydana getirir. Ek olarak, 1–25 µm’lik ince bir yeniden katılaşmış tabaka oluşur (Helmi ve Youssef, 2008; Hassan, 2014). İş parçasının bir miktar ısıdan etkilenmiş tabaka, işlenmiş yüzeyin hemen altındaki bir bölgede olabilir. Ek olarak, boşalım tarafından eritilen iş parçası malzemesinin tamamı dielektrik içine atılmaz. Kalan erimiş malzeme, hızlı bir şekilde işlenecek parçanın kütlesine yapışır ve bu da son derece sert bir yüzeye neden olur. Isıdan etkilenmiş tabakanın derinliği, yüksek malzeme işleme hızları için hassas işlemede 50 µm’den yaklaşık 200 µm’e kadar değişir (Jain, 2004; Kozak ve Dabrowski, 2013).

5.7. Uygulamalar

5.7.1. Delme

EEİ delme işlemi, dielektrik işleminin makinenin enkazını boşaltmak için tüpün iç deliğinden aşağı doğru aktığı boru şeklindeki bir takım elektrotunu kullanır. Katı çubuklar kullanıldığında, dielektrik, emme veya enjeksiyon yöntemleri ile işleme bölgesine beslenir. EEİ tarafından düzensiz, konik, eğri ve eğimli delikler üretilebilir. Sert alaşımlardan yapılan türbin kanatlarında soğutma kanalları tipik EEİ delme uygulamalarıdır.

5.7.2. Testereyle kesme

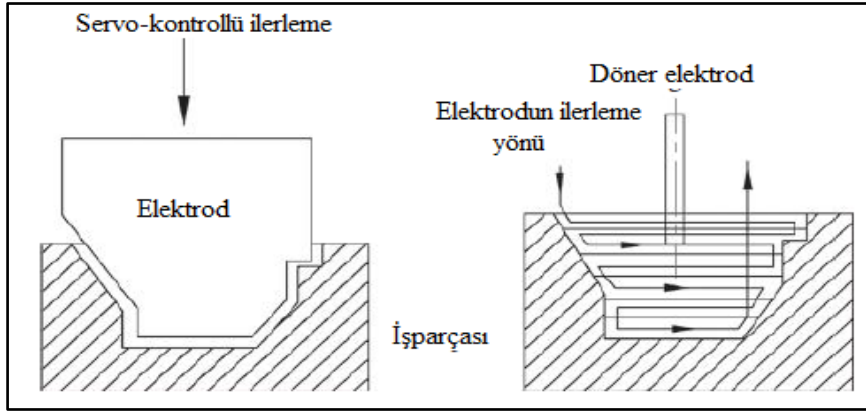
Elektro erozyon testere, özel bir çelik bant veya disk takımı kullanır. İşlem, elektriksel olarak iletken malzemeyi, geleneksel aşındırıcı testere yöntemlerinin iki katı oranında keser. 6.3–10 µm yüzey pürüzlülüğü ve 25–130 µm’lik bir yeniden katılaşma tabakası mümkündür.

5.7.3. Küre işlemleri

Dönme EEİ, dışbükey ve içbükey küreler için ± 1 µm toleransda bir hassasiyet ve 0,1 µm’den daha az bir yüzey pürüzlülüğü için basit boru elektrotları kullanır. Süreç seramik yapımında küresel şekillerin işlenmesinde kullanılır.

5.7.4. Freze

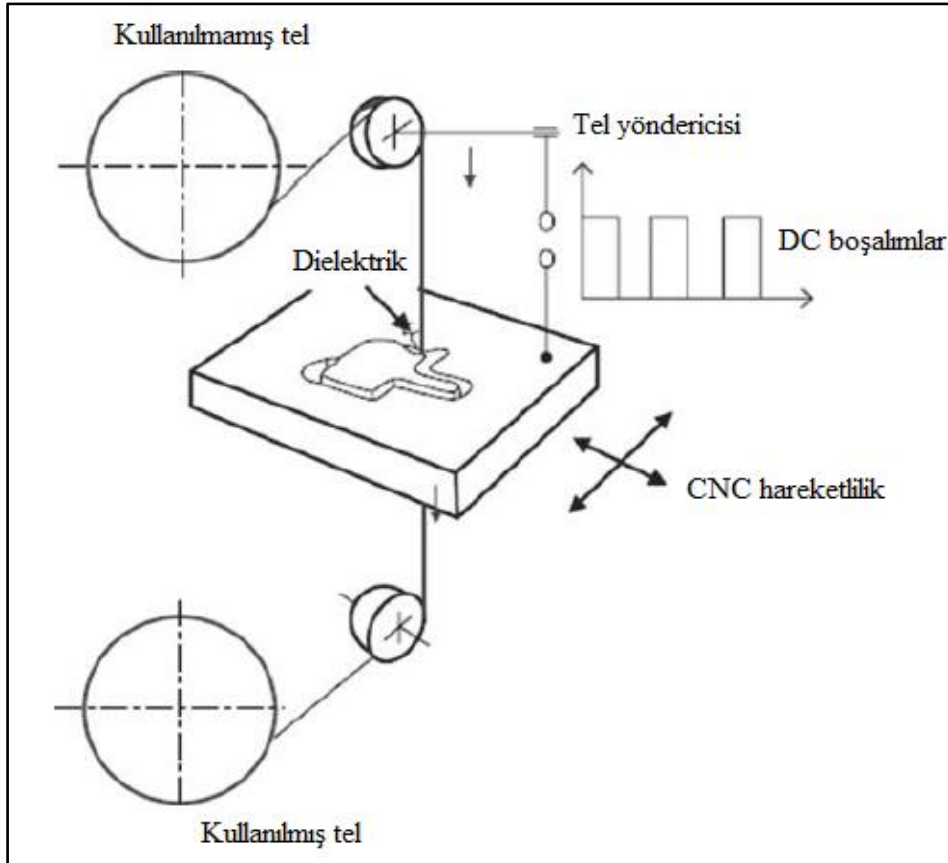
Elektro erozyon frezeleme, elektrotun istenen derinliğe kadar ardışık sayısal kontrollü (NC) taramaları ile karmaşık boşluklar üretmek için stve art silindirik elektrotlar kullanır. Kullanılan elektrot Şekil 5.8’de gösterildiği gibi yüksek hızlarda döndürülür ve iş parçasındaki geleneksel son frezeleme işlemi gibi belirtilen yolları takip eder. Bu işlem, normal olarak kalıp batırma uygulamalarında kullanılan EEİ elektrotunu yapmak için kullanılır ve zaman tasarrufu yapar.



Şekil 5.8. Elektro erozyon işleme, kalıp dalması ve frezeleme kalıbı

5.7.5. Telle kesme

Tel EEİ, sürekli hareket eden iletken bir tel elektrotu kullanır. Hareketli tel elektrot ve iş parçası arasındaki boşalım erozyonunun bir sonucu olarak malzeme kaldırma gerçekleşir. Çoğu durumda, çalışma tezgahının yatay hareketi, Şekil 5.9’da gösterildiği gibi kesimin yolunu belirleyen CNC tarafından kontrol edilir.



Şekil 5.9. Tel elektro erozyon işleme şeması

5.7.6. Taşlama

Elektro erozyon taşlama (EET), iletken malzemeleri akan bir dielektrik akışkan ile ayrılan bir döner takım ve iş parçası arasındaki hızlı boşalım boşalım ile giderir. Boşalım aralığı normal olarak iş parçasının hareketini kontrol eden servomekanizma tarafından tutulur. DC güç kaynağı 30 ila 100 amp, 2 ila 500 kHz ve 30 ila 400 V arasında değişen kapasiteye sahiptir. İletken tekerlek, genellikle grafit, bir dielektrik filtreli hidrokarbon yağı banyosunda döner. Tekerlek yoğunluğu, akım yoğunluğuna, iş parçası malzemesine, tekerlek malzemesine, dielektrik ve köşe detaylarının keskinliğine bağlı olarak değişir.

5.7.7. Tekstüre etme

Elektro erozyon tekstüre işlemi (EETİ), kısa süreli yüksek yoğunluklu elektrik boşalmalarının, merdane (iş parçası) ile bir takım elektrotu arasındaki boşluk boyunca geçirilmesiyle elde edilir ve sıvı dielektrik (örneğin: parafin) tarafından temizlenir. Her bir boşalım enerjisinin yerel bir ergime ve rulo malzemenin buharlaşmasında boşalmasıyla küçük bir krater oluşturur. Boşalma akımı, süre ve duraklama süreleri, elektrot polaritesi ve malzemesi, dielektrik tipi ve rulo dönme hızı gibi uygun proses değişkenleri seçilerek, yüksek doğruluk ve tutarlılığa sahip bir yüzey pürüzlülüğü üretilebilir.

6. TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İŞLEME YÖNTEMİ

6.1. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Yöntemin Tarihi

Geleneksel olmayan tüm işleme yöntemleri arasında, elektro erozyon işleme (EEİ), pres aletleri ve çeşitli kalıpların üretimi için en popüler işleme yöntemlerinden biridir. Bu işlem, sertliği, şekli ve dayanıklılığına bakılmaksızın, elektriksel olarak iletken olan herhangi bir malzemenin işlenmesini sağlar. Son derece hassas bölümler ve zayıf malzemeler bile, parça ile iş parçası arasında doğrudan temas olmadığından, bozulma korkusu olmadan işlenebilir.

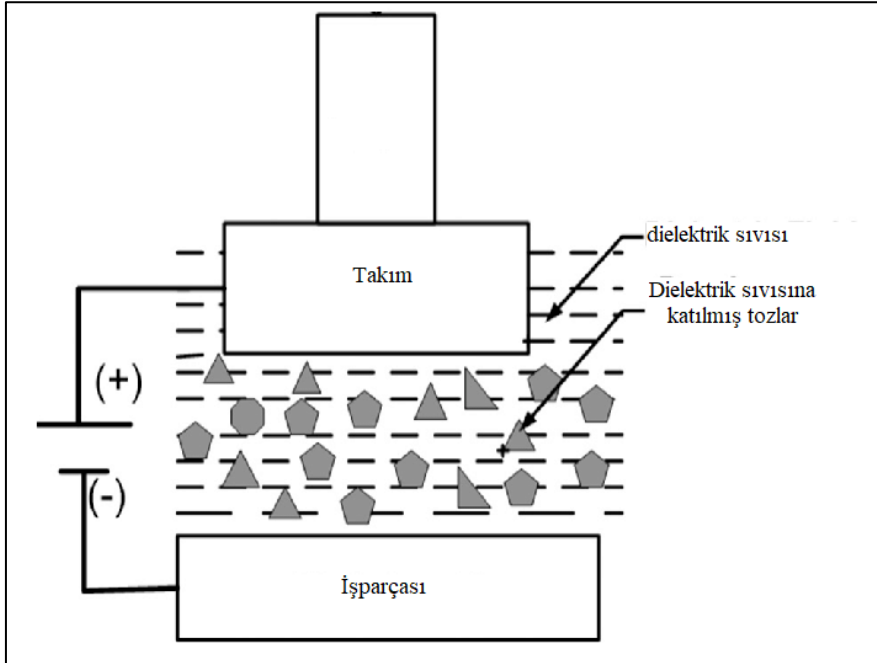
1940'lı yıllarda EEİ'nin icat edilmesinden bu yana, EEİ işleminin işleme performansını ve stabilitesini geliştirmek için pek çok çaba gösterilmiştir. Proses stabilitesi, doğal bir materyal çıkarma işlemini kontrol edilebilir bir işleme prosesine dönüştürmek için temel faktördür. Genel olarak yüksek işparça işleme hızı düşük yüzey pürüzlülüğü ile yüksek işleme hassasiyeti talepleri kalıp ve takım imalat endüstrilerinde ortaya çıkmaktadır. Bu gerekliliği yerine getirmek için, proses kabiliyetleri yönünde nispeten yeni bir ilerleme, EEİ'nin dielektrik sıvısına toz eklenmesidir. Bu yeni hibrit malzeme kaldırma işlemine toz katkı EEİ (TKEEİ) denir. Sonuçlar, TKEEİ'nin nispeten yüksek işleme hızında ayna benzeri yüzeylere yakın yüzey elde etmek için yüzey kalitesini belirgin bir şekilde iyileştirdiğini göstermektedir (Zhao, Meng, ve Wang, 2002; Tzeng ve Lee, 2001). Ayrıca, TKEEİ yöntem ile işlenen yüzey korozyon ve aşınmaya karşı yüksek direnç sahiptir (Uno ve Okada, 1997; Uno, Okada, Hayashi, ve Tabuchi, 1998). Bu işlemde, toz halindeki uygun bir malzeme EEİ'nin dielektrik akışkanına karıştırılır. Eklenen toz, dielektrik akışkanın parçalanma özelliklerini geliştirir, yani dielektrik akışkanın yalıtım mukavemeti azalır ve sonuç olarak, elektrot ve iş parçası arasındaki boşalım aralığı arasındaki mesafe artar (Zhao, Meng, ve Wang, 2002; Tzeng ve Lee, 2001). Büyütülmüş boşalımboşalım aralığı, işlenmiş bölgenin yıkanmasını sağlar. Sonuç olarak, işlem daha kararlı hale gelir, böylece işparçası işleme hızı ve yüzey kalitesi iyileştirilir.

TKEEİ, daha önce işlenmiş bileşenlerde (geleneksel yöntemler kullanılarak) yüksek işleme oranlarında göreceli olarak aynaya benzer yüzey elde etmek için devrim niteliğinde bir teknik olarak ilk 70'li yılların sonlarında icat edilmiştir (Erden ve Bilgin, 1980; Jeswani, 1981).

6.2. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Teknolojisi

Bu bölümde, TKEEİ'nin temel işleme mekanizmasını detaylı bir şekilde anlatılmıştır. TKEEİ, geleneksel EEİ yöntemin'den farklı bir işleme mekanizmasına sahiptir (Zhao, Meng, ve Wang, 2002). Bu işlemde, toz halindeki uygun bir malzeme ya aynı tankta ya da ayrı bir tankta dielektrik akışkan içine karıştırılır. Toz karıştırılmış dielektritin daha iyi dolaştırılması için bir karıştırma sistemi kullanılır. Genelde tozun dielektrik akışkve a tekrar kullanılması için, modifiye bir sirkülasyon sistemi Şekil 6. 1'de gösterildiği gibi kullanılır.

Deney düzeneği, işleme tankı adı verilen şeffaf banyo benzeri bir konteynırdan oluşur. EEİ çalışma tankına yerleştirilir ve işleme bu tank içinde gerçekleştirilir. İş parçasını tutmak için bir iş parçası fikstür tertibatı yerleştirilir. İşleme tankı dielektrik sıvı (gaz yağı) ile doldurulur. Partikül çökmesini önlemek için bir karıştırma sistemi kullanılır. Toz katkılı dielektrik akışkanın işleme boşluğuna doğru dolaşımını sağlamak için küçük bir dielektrik sirkülasyon pompası kurulur. Pompa ve karıştırıcı tertibatı, işlemenin gerçekleştirildiği aynı tank içine yerleştirilir. Toz katkılı dielektrik emme noktası ve nozul çıkışı arasındaki mesafe, işleme aralığındaki tozun tamamen askıya alınmasını sağlamak için mümkün olduğunca kısa tutulur.



Şekil 6.1. TKEEİ deney düzeneğinin şeması

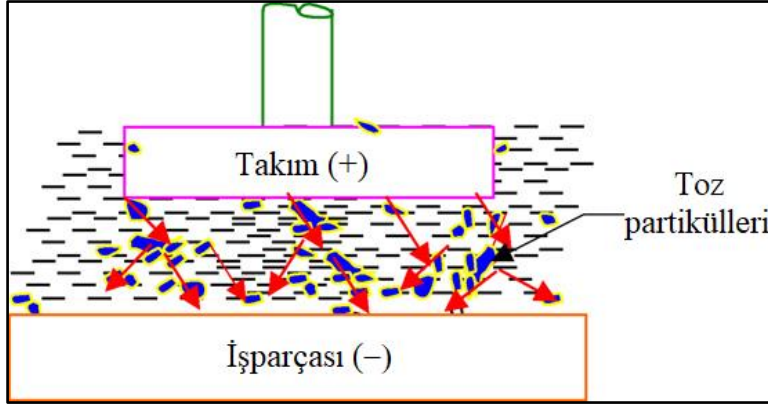
Dielektrik sıvıya eklenebilen alüminyum, krom, grafit, silikon, bakır veya silisyum karbür gibi birçok toz mevcuttur. Bu metallerin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Çeşitli katkı maddelerinin termofiziksel özellikleri.

Toz	Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Isıl iletkenlik (W.cm ⁻¹ .°C ⁻¹)	Elektriksel direnç (μΩ.cm)	Ergime sıcaklığı (°C)	Özgül ısı (cal.g ⁻¹ .°C ⁻¹)
Al	2.70	2.38	2.45	660	0.215
Cr	7.16	0.67	2.60	1875	0.11
Cu	8.96	4.16	1.59	1083	0.092
SiC	3.21	1.0-5.0	1 × 10 ⁹	2987	0.18

Boşalım aralığı toz parçacıkları ile doldurulur. Elektrot ve iş parçası arasında 25–50 μm (Furutania, Saneto, Takezawa, Mohri, ve Niyake, 2001) boşluk ile birbirine bakan 80–320V voltaj uygulave ışında, 105–107 V / m aralığında bir elektrik alanı oluşturulur. Toz parçacıkları enerji alır ve bu enerji katlanarak artar (Şekil 6. 2).

Bu yüklü parçacıklar elektrik alanı tarafından hızla ırılır ve iletkenler olarak hareket eder. İletken parçacıklar boşlukta bir bozulmayı teşvik eder ve takım ile iş parçası arasındaki boşalım aralığını artırır. Boşalım alanı altında, parçacıklar birbirine yaklaşır ve kendilerini elektrotlar arasında zincir benzeri yapılar şeklinde düzenlerler. Farklı toz parçacıkları arasındaki kilitlenme, akımın akışı yönünde gerçekleşir. Zincir oluşumu, elektrotlar arasındaki işleme boşluğunun köprülenmesinde yardımcı olur. Köprüleme etkisi nedeniyle, dielektrik sıvının yalıtım gücü azalır. Kolaylıkla kısa devre gerçekleşir, bu da boşlukta erken bir patlamaya neden olur. Sonuç olarak, elektrot alanının altında bir "dizi boşalma" başlar. Bir boşalmanın içinde daha hızlı boşalım oluşması iş parçası yüzeyinden daha hızlı aşınmaya neden olur ve dolayısıyla malzeme işleme hızı artar. Aynı zamanda, eklenen toz plazma kanalını değiştirir. Plazma kanalı genişler (Zhao, Meng, ve Wang, 2002). Boşalım toz parçacıkları arasında homojen olarak dağılır, dolayısıyla boşalmanın elektrik yoğunluğu azalır. Toz partikülleri arasındaki boşalmanın homojen dağılımından dolayı, iş parçası yüzeyinde sığ kraterler üretilir. Bu yüzey kalitesinde iyileşme sağlar.



Şekil 6.2. Toz katkılı EEİ prensibi

6.3. Toz Katkılı Elektro Erozyon İşleme Uygulamaları

Literatürde bildirilen toz katkılı elektro erozyonun çeşitli uygulamaları bu bölümde tartışılmıştır.

6.3.1. Mikro elektro erozyon işleme

Hafif, ince, sıkıştırılmış ve içerikli mekanik elemanların kullanımı son zamanlarda küresel bir trend haline gelmiştir. Mikro motorlar, mikro pompalar, mikro robotlar ve diğer mikro mekanik ekipmanlar gibi ürünlerin sayısı pazarın gereklerini yerine getirmek için geliştirilmiştir. Bu mikroeletmanların geleneksel yöntemlerle üretilmesi çeşitli komplikasyonlara bağlı olarak kısıtlıdır. Chow ve ark (Chow, Hwa, Huang, ve Hung, 2000) tarafından TKEEİ kullanılarak titanyum alaşımı (Ti-6Al – 4V) mikro boyutta işlenmiştir. Birden çok mikro-yapısı (mikro-ısı saçılım yüzgeci) farklı işlem boşaltma koşulları altında üretilmiştir. Çok ince aşındırıcı tanecikler biriktirerek, yığılma ve imalat gibi ultra yüksek bir vakumda kullanılan ekipman üzerinde yağlama tabakasının biriktirildiği bildirilmiştir (Pecas ve Henriques, 2002; Furutania, Saneto, Takezawa, Mohri, ve Niyake, 2001; Pecas ve Henriques, 2003; Rozenek, Kozak, ve Dabrowski, 2001). Mikroelektrot mekanik sistemlerinde TKEEİ tekniğinin uygulamaları oldukça ümit vericidir.

6.3.2. Seramik takviyeli kompozit malzemelerinin işlenmesi

Çeşitli tozları dielektrik sıvıya karıştırarak yalıtıcı Si₃N₄ seramiklerinin işleme özellikleri, Tani ve arkadaşları tarafından (Tani, Fukazawa, Mohri, ve Okada, 2001) incelenmiştir. Toz kaplama dielektrik sıvısı kullanılarak yüzey kalitesi yeterince geliştirilmediğinden İİH'nın

önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir. Yüzey kalitesini iyileştirmek için, toz süspansiyonlu dielektrik akışkan sınırlı darbe süresi altında kullanılmıştır. Sonuç olarak, İİH öğütme ile karşılaştırılmıştır ve yüzey kalitesi 4 μm 'ye kadar düzelmiştir. Rozenek ve ark. (Rozenek, Kozak, ve Dabrowski, 2001), kerosen dielektrik ve farklı aşındırıcı tozlarla deiyonize edilmiş su karışımını sert malzeme üzerinde farklı konsantrasyonlarda kullanarak işleme özelliklerini karşılaştırmışlardır. Dielektrikte toz ilavesinin hem İİH hem de TAH'nın arttırmasına sebep olduğu bildirilmiştir.

Hassas yüzey işleme

Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi için EEİ'nin dielektrik akışkanına katılan tozlar da kullanılabilir. Metalik tozların (grafit ve silisyum) EEİ'nin dielektrik akışkanına katılmasından sonra yüzey kalitesinin ayna yüzeye yakın olduğu bildirilmiştir (Wong, Lim, Rahuman, ve Tee, 1998). Toz ve iş parçası özelliklerinin etkisini anlamak için farklı tozlar kerosen yağına karıştırılmıştır. Alüminyum tozu, SKH-54 malzemesinde ayna kaplaması yaptıklarını bildirilmişken, SKH-54 malzemesinde parlak bir yüzey elde edilemediğini bildirilmiştir. Silikon ve karbon tozları çok hassas koşullarda iyi yüzey elde etmede etkili gibi görünmektedir. Ayrıca, toz ve iş parçası malzemelerinin doğru kombinasyonunun olması çok önemli olmuştur.

7. MALZEME VE METOD

7.1. Malzeme

Bu tezde malzeme olarak Al 2014 matrisli TiB₂ takviyeli metal matris kompoziti deneysel çalışmalarda kullanılması için seçilmiştir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan ana matris Al metalin 2000 serisi alışımdan olup içinde ana alaşım elementi olarak bakır bulunmaktadır. Al 2014 alaşımı, havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan alüminyum esaslı bir alaşımdır. Belirli sertliklerde ve en güçlü alüminyum alaşımları arasında kolayca işlenebilir, ayrıca yüksek sertliğe sahiptir. Ancak, çatlamaya maruz kaldığı için kaynak yapılması zordur. Çizelge 7. 1’de ana matrisin kimyasal bileşeni verilmiştir.

Çizelge 7.1. Al 2014 alaşımın kimyasal bileşeni

Element	wt%
Cu	3,9 – 5
Si	0,5 – 1,2
Mn	0,4 – 1,2
Mg	0,2 – 0,8
Fe	Max 0,70
Zn	Max 0,25
Ti	Max 0,15
Cr	Max 0,10
Al	90 – 95

Metal matris kompozitlerde takviye elemanı malzemenin temel özelliklerini iyileştirmek amacıyla çok önemli bir rolü vardır. Burada takviye elemanı olarak titanyum diborür (TiB₂) kullanılmıştır. TiB₂ mükemmel ısı iletkenliği, oksidasyon kararlılığı ve mekanik erozyona karşı dayanıklılığı olan son derece sert bir seramiktir. TiB₂ seramikler için önemli bir baz malzeme olan titanyum karbür ile çok benzerdir ve özelliklerinin birçoğu (örneğin sertlik, termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve oksidasyon direnci) TiC’inkinden daha üstündür.

TiB₂ seramiğin bazı özellikleri aşağıdaki gibidir (James, Shackelford, ve Alexve er, 2001).

- Çok yüksek sertliğe (oda sıcaklığında 3400 (kg/mm²) Vickers, tamamen sertleştirilmiş yapısal çelikten üç kat daha fazla) sahip olup yüksek sıcaklığa kadar muhafaza edilir.
- Yüksek ergime sıcaklığı
- Yüksek ısı iletkenliği
- Diğer seramiklere göre yüksek elektriksel iletkenliği

Kimyasal stabilite açısından TiB₂, tungsten karbür veya silikon nitrite göre daha stabildir. TiB₂ darbeye dayanıklı zırh, kesici aletler, potalar, nötron emiciler ve aşınmaya dirençli kaplamalar gibi alanlarla kullanımı sınırlı görünmektedir. TiB₂ ‘ün, alüminyumun buharlaştırma teknikleri ile kaplanması yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Schmidt, Böhling, Burkhardt, ve Grin, 2007; Basu, Raju, ve Suri, 2013).

Bu çalışmada TiB₂ takviye elemanı ve Al 2014 ana matris olarak kullanılmıştır. TiB₂ partiküllerinin boyutları ortalama 10 µm ve Al 2014 tozlarının ortalama boyutları 290 µm olarak ölçülmüştür. Kullanılan tozların boyutlarının ölçümü için MASTERSIZE cihazı kullanılmıştır. Takviye elemanının ve ana matrisin bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri Çizelge 7. 2’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.2. Al 2014 ve TiB₂ fiziksel ve elektriksel özellikleri

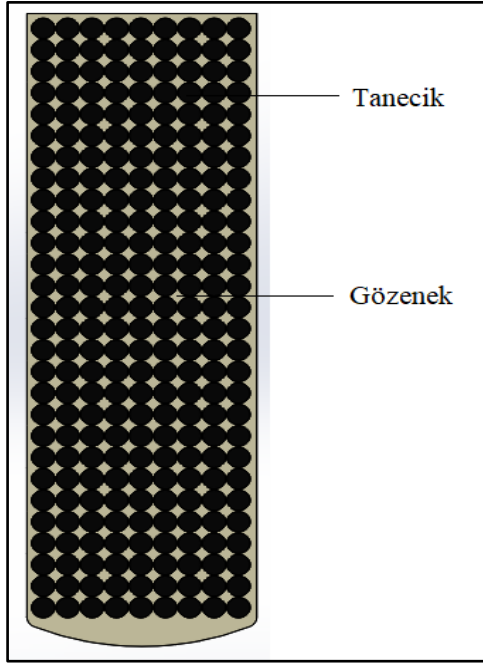
Malzeme tipi	Al 2014	TiB ₂
Yoğunluk	3 g/cm ³	4,5 – 4,62 g/cm ³
Isıl iletkenlik	150 W/m-k	0,026 cal.cm ⁻¹ .sec ⁻¹ .K ⁻¹ (oda sıcaklığında)
Elektriksel iletkenlik	2,8 – 6,4 Ω-m	68 x 10 ⁶ Ω-cm

7.2. İnfiltrasyon

7.2.1. Takviye hacim oranına göre hesaplamaların yapılması

Kompozit malzemeler genellikle takviye elemanının ana matrise katılmasıyla üretilir. Takviye elemanının ana matrise ağırlıkla ilavesinde takviye-ağırlık oranı ve hacimce ilavesinde takviye-hacim oranı ifadesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada takviye seramiklerinin ana matris içine hacimce ilave edilmesinden dolayı takviye-hacim oranları hesaplanmıştır.

Kompozit malzemelerde sertlik, çekme dayanımı, ısıya karşı direnç ve elektriksel iletkenlik gibi mekaniksel ve fiziksel özellikler takviye-hacim oranına bağlıdır. Şekil 7.1’de görüldüğü gibi cam boru içinde bulunan hacim miktarı, takviye tozları ve gözeneklerin hacimleri toplamıdır. Bu miktar Eşitlik 7. 1’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Takviye tozlarının serbest halde gözeneklerle beraber oluşturduğu hacim

$$V_{toplam} = v_{takviye} + v_{gözenek} \quad (7.1)$$

Takviye-hacim oranlarının hesaplaması ise sırayla Eşitlik 7. 2 ve 7. 3’de verilmiştir.

$$v_{takviye} = \frac{m}{d} \quad (7.2)$$

$$\text{T-H oran} = \frac{v_{takviye}}{v_{kompozit}} \quad (7.3)$$

Eşitlik 7. 2’de m takviye ağırlığı, d ise takviyenin özgül ağırlığı olarak verilmiştir. Eşitlik 7. 3’de gösterildiği üzere T-H oranı, takviye hacminin kompozit hacmine bölünmesiyle hesaplanır.

Bu çalışmada kullanılan T-H oranları %2, %4 ve %8 olarak seçilmiştir. Çizelge 7. 3’de ana matris ve takviye malzemesi için hesaplanan ağırlıklar verilmiştir.

Çizelge 7.3. Her bir cam borusu için hesaplanan ağırlıklar

T-H oranı	Al toz ağırlığı (g)	TiB ₂ toz ağırlığı (g)	Toplam ağırlık (g)
%2	6.5519	0.1335	6.6854
%4	6.5473	0.2784	6.8257
%8	6.4573	0.5614	7.0187

7.2.2. Tozların kurutulması

İnfiltrasyon yönteminde en önemli parametrelerden biri ıslatabilirliktir. Toz halinde bulunan malzemelerde tozun ıslatabilirlik özelliğini etkileyen bazı faktörler mevcuttur. Bunlardan bazıları toz boyutu, toz şekli ve malzemenin kimyasal özelliğidir. Diğer taraftan ortamda bulunan bazı faktörler tozların ıslatabilirliğini etkilemektedir. Bu faktörlerden biri atmosferin nem oranı veya infiltrasyon işleminin yapıldığı ortamda bulunan nemdir. Ortamda bulunan nem, tozların nemlenmesine neden olmakta ve bu da tozların ıslatabilirlik özelliğini kötü yönde etkilemektedir. Bu olayı önlemek için bu çalışmada tozlar bir ön hazırlık olarak kademeli şekilde kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

Tozlar ilk etapda bir seramik kap içine konulup sinterleme fırınına yerleştirilmiştir. Burada tozları kurutmak için atmosfer korumalı sinterleme fırını kullanılmıştır. Literatür araştırmalar sonucu olarak belirlenen kurutma işlem kademeleri Çizelge 7. 4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4. Tozların kurutulması için yapılan işlemler

İşlem sırası	Yapılan işlem	İşlem sıcaklığı (°C)	İşlem süresi (dk)
1	Isıtma	24 – 180	30
2	Bekletme	180 – 180	120
3	Soğutma	180 – 24	60

Görüldüğü üzere birinci işlemde tozlar fırın içine yerleştirildikten sonra fırın sıcaklığı 30 dakika içerisinde 180 oC’ye kadar ısıtılır. İkinci işlem olarak tozlar aynı sıcaklıkta 2 saat bekletilir. Son işlem olarak 1 saat içinde sıcaklık yeniden normal atmosfer sıcaklığına

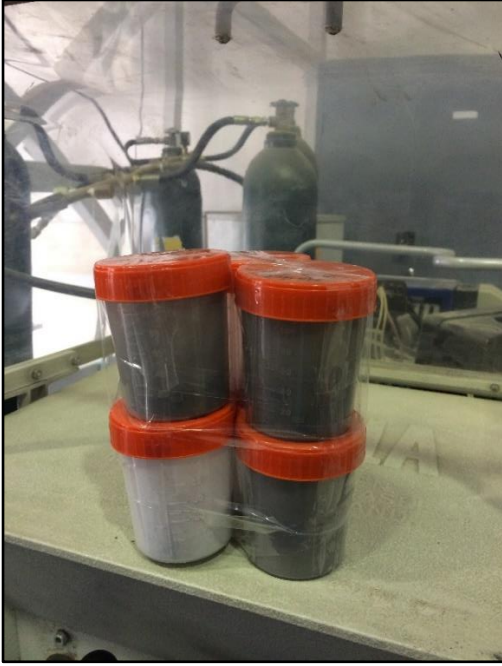
indirilir. Tüm bu işlemler koruyucu N₂ (azot) gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi bittikten sonra tozların nemlenmesini önlemek için tozlar nem koruyucu kaplar içinde tutulur. Kurutma işlemi için Resim 7. 1’de görüldüğü gibi sinterleme fırını kullanılmıştır.



Resim 7.1. Tozların kurutulması için kullanılan fırın

7.2.3. Tozların karıştırılması

Tozların homojen şekilde karıştırılması genellikle zor olan bir işlemdir. Literatür araştırmalarına bakıldığında bu işlem için önerilen çözümlerde ana matris ve takviye elemanının toz boyutları arasında fark olmalıdır. Aynı zamanda her üç ekseninde de tozların karıştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Resim 7. 2’de görüldüğü gibi tozlar kurutulduktan sonra belirlenen oranlarda ayrı ayrı kaplar içine yerleştirilmiştir.



Resim 7.2. Kurutulan tozların nem önleyici kaplarda yerleştirilmiş hali

Kaplar 30 dakika süre içerisinde Resim 7. 3’de görüldüğü gibi üç-boyutlu karıştırıcı cihaz ile karıştırılmıştır. Karıştırma için belirlenen bu sürenin daha fazla olması halinde, tozlarda pullaşmaya sebep olabilmektedir. Aynı zamanda bu sürenin daha düşük olması tozların karışımında yeterli homojenlik elde edilmesini engellemektedir.



Resim 7.3. Tozların karıştırılması için kullanılan cihaz

7.2.4. Cam tüplerin hazırlanması

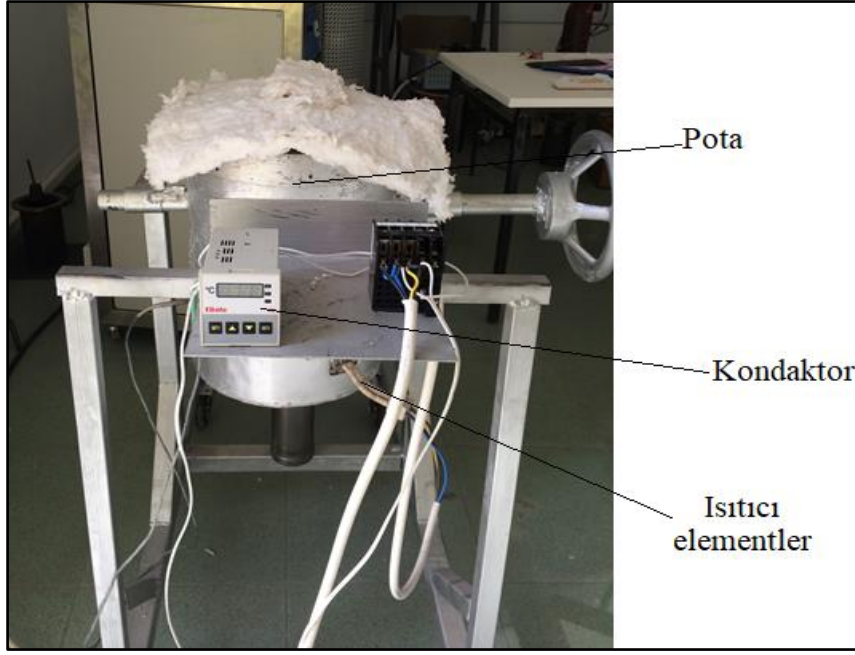
Bu çalışmada kullanılan cam tüpleri quartz camlardan olup 1000 oC sıcaklığa dayanıklıdır. Cam tüplerin dış çapı 10 mm ve iç çapı 8 mm olup 300 mm uzunlukta dışardan her iki tarafı açık olacak şekilde temin edilmiştir. İlk başta resim 7. 4’de görüldüğü gibi camların alt kısmına çelik filtreler yerleştirilmiştir. Doldurulan tozun filtreden dökülmesini önlemek için Al folyo filtre üzerine yerleştirilmiştir. Alt filtre yerleştirildikten sonra hazırlanan toz karışımları tüpün içerisine doldurulmuştur. Toz karışımları tüpün içine doldurulduktan sonra yeniden bir çelik filtre yerleştirilerek üstüne ağırlık olarak 15 mm yüksekliğinde silisyum tozu dökülmüştür. Bu ağırlığın kullanım sebebi ise tozların vakum hattına çekilmesini önlemektir. Son filtre silisyum tozun üstüne koyulduktan sonra tüpler ergitme potasının içine daldırılmak için hazır hale getirilmiştir (Resim 7. 4).



Resim 7.4. Toz karışımların cam tüplerin içine doldurulmuş hali

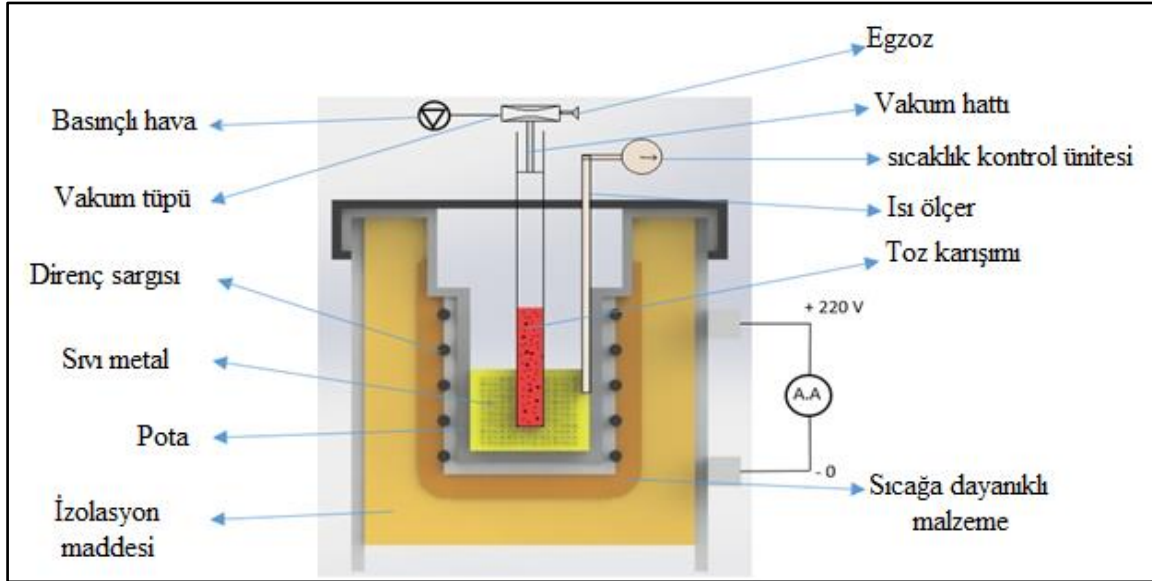
7.2.5. Ana matrisin ergitilmesi

Ana matrisin ergitilmesi için ergitme ocağı (Resim 7. 5) kullanılmıştır.



Resim 7.5. İnfiltrasyon işlemi için kullanılan ergitme ocağı

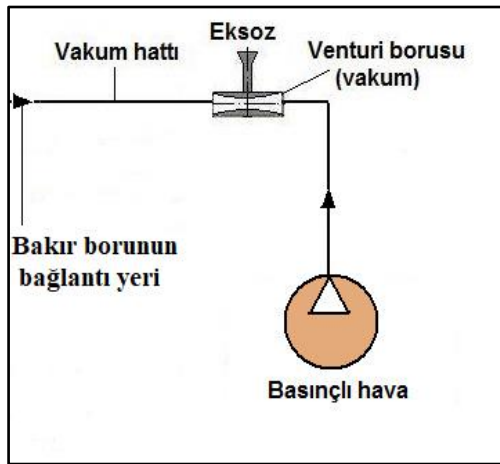
Ana matris malzemesi külçeler halinde temin edildikten sonra potanın içine yerleştirilmiştir. Ergitme ocağının sisteminde farklı bölgeler bulunmaktadır. Ocak sıcaklığının sabit bir değerde tutulması için ısıtma sistemi elektriksel elementlerle gerçekleşmiştir. Ayrıca bir kondaktor vasıtasıyla bu sıcaklık sabit tutulmuştur. Şekil 7.2 infiltrasyon sistemin bir şematik görünümüdür.



Şekil 7.2. İnfiltrasyon sistemin şematik görüntüsü

7.2.6. Vakumlama işlemi

Vakum üretim işlemi için Ventury prensibi ile çalışan kompresör kullanılmıştır. Sağlanan vakum değerini sürekli kontrol etmek için manometre göstergesi kullanılmıştır. Ayrıca oluşabilecek herhangi bir olumsuz etki için vakum hattı ile cam tüp arasında 6 mm çapına sahip bir bakır boru kullanılmıştır. Bakır boru hattını cam tüp ile bağlamak için teflon conta kullanılmıştır. Bu çalışmada sağlanan vakum değeri 550 mmHg olarak seçilmiştir. Şekil 7.3’de bu sistem görülmektedir.

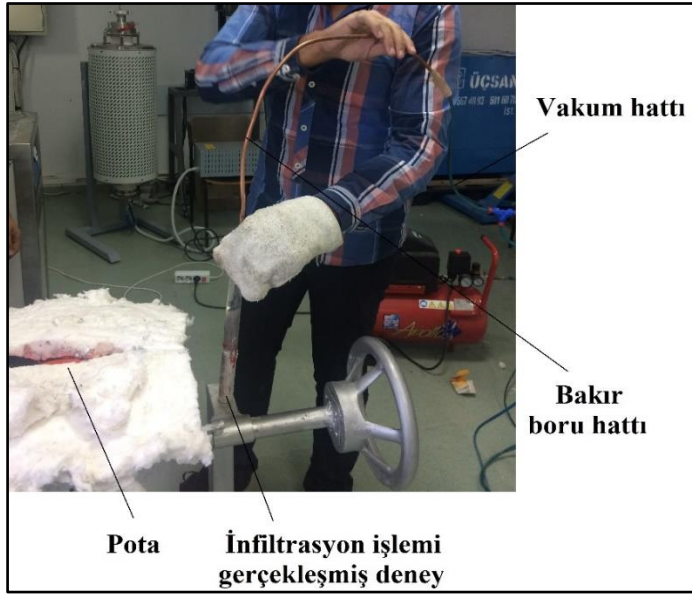


Şekil 7.3. Vakum sistemi

7.2.7. İnfiltrasyon işlemi

İnfiltrasyon gerçekleşmeden önce infiltrasyon şartları sağlanmıştır. Cam borunun vakum hattına vakumun sızdırmasını önlemek için (vakum değeri infiltrasyon süreci boyunca sürekli kontrol edilmiştir.) teflon conta ile bağlanmıştır. İstenilen vakum değerine ulaşıldığında cam tüpü daha önceden ergimiş hale getirilen metal sıvısı içine daldırılmıştır.

Daha önce literatür araştırılmasıyla belirlenen süre içinde infiltrasyon gerçekleşmiştir. Daha sonra cam boru pota içinden çıkartılıp 5 s bekletilmiştir (Resim 7. 6) ve vakum hattından koparılıp normal oda sıcaklığında silis kum içerisine gömülerek soğutulmuştur (Resim 7. 7).



Resim 7.6. Deneyin infiltrasyon işlemi gerçekleştirildikten hemen sonra bekletilme şekli



Resim 7.7. İnfiltrate edilmiş deneylerin soğutma işlemi

Cam tüpleri normal oda sıcaklığına düştükten sonra dikkatle kırılarak numuneler içinden çıkartılmıştır. Resim 7. 8’de yapılan çubukların tüplerden çıkarılan son halleri gösterilmiştir. Gerçekleşen işlemler oda sıcaklığında ve normal atmosfer şartları altında yapılmıştır.



Resim 7.8. İnfiltre edilmiş deneylerin cam borulardan arındıktan sonraki hali

7.2.8. İnfiltrasyon işlem parametreleri

İnfiltrasyon tane boyutu

Bu çalışmada ana matris için kullanılan Al 2014 tozu 290 μm ortalama ϕ apta olup pota içinde ergimiş sıvı ile aynı kimyasal bileşene sahiptir. Takviye elemanı olarak ortalama 10 μm ϕ apına sahip TiB₂ kullanılmıştır.

İnfiltrasyon sıcaklığı

Literatür araştırmalar sonucunda infiltrasyon sıcaklığı, kullanılan ana matrisin sıvı halindeki viskozitesi ve ergime sıcaklığının önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Bu çalışmada Al 2014 ana matris olarak kullanılmıştır. Bu malzemenin ergime sıcaklığı 660 oC olduğundan infiltrasyon süresi boyunca sıcaklık 750 oC olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta sıvı metalin viskozite değerinin daha düşük olması infiltrasyon işleminin istenilen boyda olmasını sağlamıştır. Kondaktör vasıtasıyla sağlanan sıcaklık sürekli olarak kontrol edilmiştir.

İnfiltrasyon süresi

İnfiltrasyon süresi, genellikle üretilen parça boyutuna ve kullanılan tozların ıslatılabilirlik özelliğine bağlı olarak seçilmektedir. R. ÇALIN ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda (Pul, Küçüktürk, Çalin, ve Şeker, 2011; Çalın, 2015; Çıtak, Çalın, & Zühtü, 2010) kullanılan süreler ve malzemelere bakıldığında bu çalışmada infiltrasyon süresi için

optimum parametre 3 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfında yapılan deneyler istenilen infiltrasyon sıcaklığına ulaşmıştır. Belirlenen sürenin üstündeki yapılan deneylerde sıvı matrisin daha fazla vakum hattına doğru geldiğinden dolayı süre 3 dakika olarak sabit tutulmuştur.

Vakum değeri

Çoğu çalışmalarda vakum değerinin belirlenmesi için farklı infiltrasyon mesafeleri denenmiştir. Bu çalışmada ise literatür araştırılması yapılmış ve vakum değeri 550 mmHg olarak belirlenmiştir. Bu değer altında yapılan deneylerde beklenen infiltrasyon mesafesi oluşmamıştır. Diğer taraftan bu değerinin üstünde yapılan deneylerde ise cam tüp içerisinde bulunan tozlar yeterince ıslatılmamış ve sıvı metal istenilen infiltrasyon mesafesine ulaşmamıştır. Tüm deneyler boyunca vakum değeri manometre kullanarak kontrol altında tutulmuştur.

7.3. Parçaların Hazırlanması

Üretilen parçalar Resim 6.8’de görüldüğü gibi cam tüplerinden arındırılarak tek parça haline getirilmiştir. Her silindirik çubuk 8 mm çapında ve 70 mm yüksekliğinde infiltre edilmiştir. Her kompozit malzemeden (T-H %2, T-H %4 ve T-H %8) 3 adet çubuk numune elde edilmiştir.

Çubukları çap yönünde 6 mm mesafelerde kesmek için TEEİ hassas kesim tezgâhı kullanılmıştır. Numuneler 3 farklı akım uygulanarak kesilmiştir. Kullanılan akım değerleri 4 A, 8 A ve 12 A olup diğer işleme parametreleri sabit tutulmuştur. Diğer işleme parametreleri Çizelge 7. 5’de verilmiştir. Bu işlem için MITSUBISHI markalı tezgâh kullanılmıştır.

Çizelge 7.5. TEEİ yönteminde kullanılan kesme parametreleri

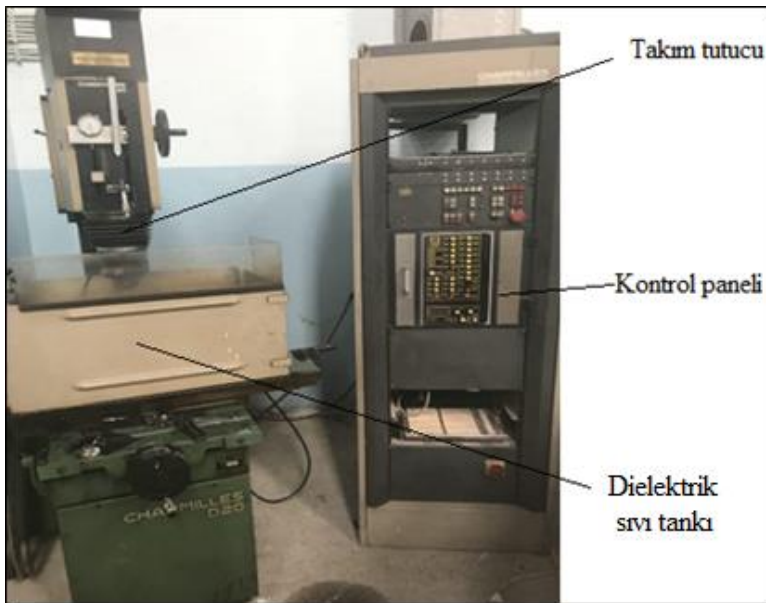
Parametre	Birim	Değer
Boşalım süresi	μs	8
Bekleme süresi	μs	1
Voltaj	V	70 – 90
Dielektrik sıvı	Saf su	
Elektrot malzemesi	Pirinç	

7.4. Elektro Erozyon ile İşleme Deneyleri

Bu çalışmanın amacı ilk mertebede literatür araştırılmasından çıkan sonuçlara göre geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan seramik katkılı kompozit malzemelerin EEİ yöntemi ile işlenebilirliğini incelenmesidir. Diğer amaç ise işlenebilirlik sağlandıktan sonra parametrelerin değiştirilmesi ile işlenebilirliğin iyileştirilmesidir. Bu nedenle amaçlara ulaşılması için yapılan çalışmada iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk aşamada EEİ yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde iş parçası ile takım arasında dielektrik bir sıvı akışı olduğundan, aralarında hiçbir fiziksel temas yoktur. İkinci aşamada kullanılan yöntemde iş parçasının işlenebilirliğini arttırmak için, kullanılan yalıtkan dielektrik sıvıya bir metal tozu katılmıştır. Toz katkısının işleme parametreleri üzerindeki etkisi, 10 g/L'de katkı tozu olarak grafit tozu ilave edilerek incelenmiştir. Deney sonuçları her iki yöntemden de elde edilmiştir. Sonuçlar kullanılan parametrelerin İİH, TAH ve YP'ye etkileri incelenmiştir.

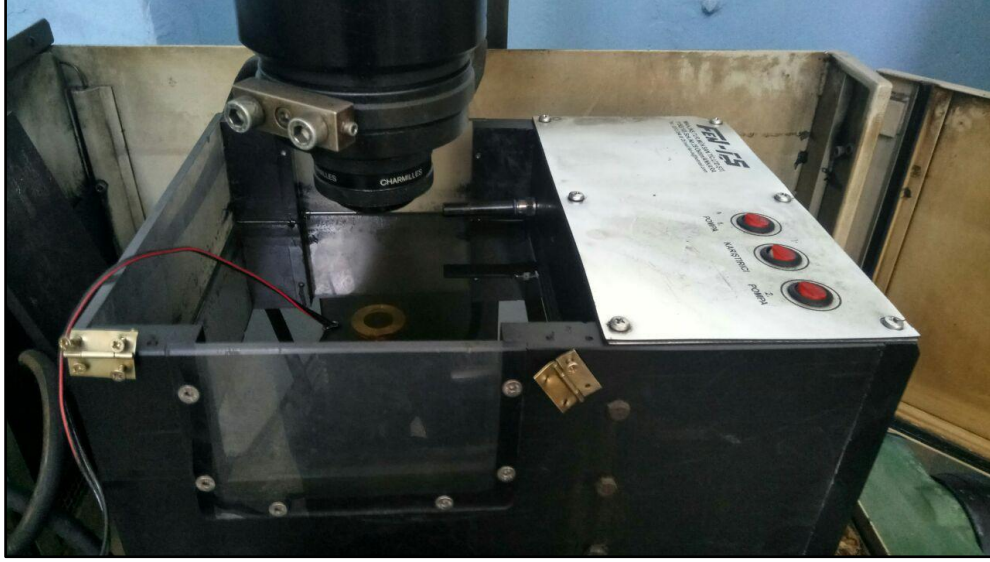
7.4.1. EEİ'de kullanılan tezgâh

Bu çalışmada kullanılan tezgâh endüstriyel elektro erozyon işleme tezgahıdır. Bu tezgâhta uygulanabilen akım değerleri 2A, 4A, 8A, 16A ve 32A olup, sıvı olarak da gaz yağı kullanılmaktadır. Bu çalışmada ilk aşamada daha önce belirtildiği gibi cihazın kendisine ait tank kullanılmıştır (Resim 7. 9).



Resim 7.9. EEİ yönteminde kullanılan tezgâh düzeneyi

Daha sonraki işlemlerde tozun katılarak TKEEİ'in yapılması için özel bir tank tezgâha yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir (Resim 7. 10).



Resim 7.10. TKEEİ yönteminde kullanılan dielektrik tankı

7.4.2. Kullanılan elektrot

Çalışmada kullanılan elektrot malzemesi ve geometrisi büyük önem taşımaktadır. Bakır, grafit, alüminyum, pirinç ve bunun gibi benzer malzemelerin EEİ'de sıkça kullanılmalarının bir sebebi, elektriksel iletkenlik özelliklerinin iyi olmasıdır. Diğer taraftan iş parçasının geometrisine bağlı olarak takım geometrisinin belirlenmesi önemlidir. Bu çalışmada ise takım malzemesi olarak hem elektriksel iletkenlik açısından hem de malzemenin çözünürlülüğün az olması açısından bakır tercih edilmiştir. Ayrıca iş parçalarının 8 mm çapında bir parça olmalarından dolayı 10 mm çapında bakır takım seçilmiştir. Hazırlanmış takımların resimleri Resim 7. 11'de verilmiştir.



Resim 7.11. EEİ'de kullanılan takımlar

7.4.3. Kullanılan toz

İlk deneylerde yapılan incelemeler sonucu, işparçalarında seramiklerin topaklanmasından dolayı takımın rastladığı bu bölgelerde işleme prosesinde zorlanma hissedilmiştir. Bu sorunun nedeni ise seramik malzemenin yalıtkan olmasıdır. Çözüm olarak bu sorunu bertaraf etmek amacıyla dielektrik sıvının içine toz katılması uygun bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda grafit, bakır veya alüminyum gibi birçok toz, dielektrik sıvının içine belirli oranlarda katılmıştır. Yüksek elektriksel iletkenlik özelliğinden dolayı bu çalışmada grafit tozu seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan grafit tozunun malzeme özellikleri (James, Shackelford, ve Alexve er, 2001) Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Grafit tozun malzeme özellikleri

Ortalama toz boyutu	50 nm
Yoğunluğu	2.09 – 2.23 g/cm ³
Konsantrasyon	10 g/L
Elektriksel direnç	11~13 $\mu\Omega$ -m

7.5. Elektro Erozyon İşleme Parametreleri

7.5.1. Uygulanan akım

Deneyisel çalışmalarda farklı akım değerleri kullanılmıştır. Akım değerinin literatürde yer alan çalışmalarda ve işleme alanına aktarılan enerjiyi belirlemesinden ötürü esas parametre olmasından dolayı bu konuda birçok literatür incelenmiştir. Bu araştırmalar sonucu

kullanılan akım değerinin düşük olması uygun bulunmuştur. Diğer taraftan bu çalışmada kullanılan malzemenin sanayi ve başka sektörlere genellikle aşınmaya karşı dirence sahip sistemlerde kullanılması göz önüne alındığında, daha iyi bir yüzey elde edilmesi istenilen bir sonuçtur. Detaylı araştırmalar ve tezgâh kapasitesini de dikkate alındığındaki değerleri 2A, 4A ve 8A olarak belirlenmiştir.

7.5.2. Kullanılan dielektrik sıvısı

Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmanın esas amacı işlenebilirliği iyileştirmektir. Bu doğrultuda ilk aşamada dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Daha sonra grafit tozu gaz yağı içine katılarak bu sıvı karışım içerisinde işleme gerçekleşmiştir.

7.6. Tez Süresi Boyunca Yapılan Ölçümler

Deneylerin hazırlanmasından sonra bazı ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler hem işleme süreci ile ilgili hemde malzeme özelliği ile ilgidir. Ölçümler aşağıda sırasıyla verilmiştir:

- Hassas terazi ile işparçalarının aşınma testi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümü
- Hassas terazi ile işparçalarının işlemeden önce ve sonra ağırlıkların ölçümü
- Hassas terazi ile elektrotların (takım) işlemeden önce ve sonra ağırlıkların ölçümü
- İşleme derinliği ölçümleri
- İşleme sürelerinin tutulması

Deneyler yapıldıktan sonra İİH ve TAH hesaplanmıştır.

7.7. İşparaların resimlerin alınması

Çalışma sürecinde işparalarından işleme öncesi ve sonrası digital kamera ile işlenen yüzey hakkında genel bilgi toplamak için fotoğraflar alınmıştır. Ayrıca her deney için kullanılan takımdan aynı şekilde işleme sonrası yüzey fotoğrafları alınmıştır. İşparaları işlendikten sonra yüzeylerinin daha detaylı bir şekilde incelenmesi için işleme öncesi mikroyapı optik mikroskop ile kontrol edilip işleme sonrası SEM görüntüleri alınmıştır.

7.8. İşleme Parametreleri

Bu çalışmada işleme parametreleri olarak T-H oranı, işleme akımı ve dielektrik sıvı seçilmiştir. Tüm deney boyunca bazı parametreler sabit tutulmuştur. Bu çalışmadaki amaç kullanılan parametrelerde optimum değerler elde edebilmektir. Bunun için tüm deneylerde aynı atmosfer şartları ve aynı ortam sıcaklığı sağlanarak aynı işleme performansı hedeflenmiştir. Ortak parametreler ve değişken parametreler sırasıyla Çizelge 7. 7 ve Çizelge 7. 8’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Tüm deneylerde kullanılan ortak parametreler

Dielektrik püskürtme yönü	Elektrot içerisinde – işparçası ve elektrot yanından
Toz konsantrasyonu (g/L)	10
Polarite	İşparça (-), takım (+)
Takım(elektrot) malzemesi	Silindirik bakır
Takım geometrisi	Silindirik: çap = 10 mm, uzunluk = 22 mm
Boşalım süresi (μs)	8
Bekleme süresi (μs)	10
Boşluk gerilimi (V)	80 – 90
İşleme derinliği (mm)	4

Çizelge 7.8. Deneylerde kullanılan değişken parametreler

Parametreler	Birim	Değer
T-H oranı	T-H%	2, 4, 8
İşleme akımı	A	2, 4, 8
Toz katkısı derişimi	g/L	0, 10

7.9. Aşınma Deneylerinin Yapılması

Bu Çalışmada üretilen 3 farklı T-H oranına sahip kompozitlerde takviye olarak seramik parçacıkların kullanılması, bu tür malzemelerde bazı özelliklerin iyileşmesini sağlamıştır. Bu özelliklerden biri kompozit malzemenin aşınma direncidir. Seramik takviyeli kompozit

malzemelerde genelde aşınma direnci özelliğinde artış görülmektedir. Bu çalışmada ise farklı T-H oranlarına sahip işparçalarına abrasif aşınma testi yapılmıştır.

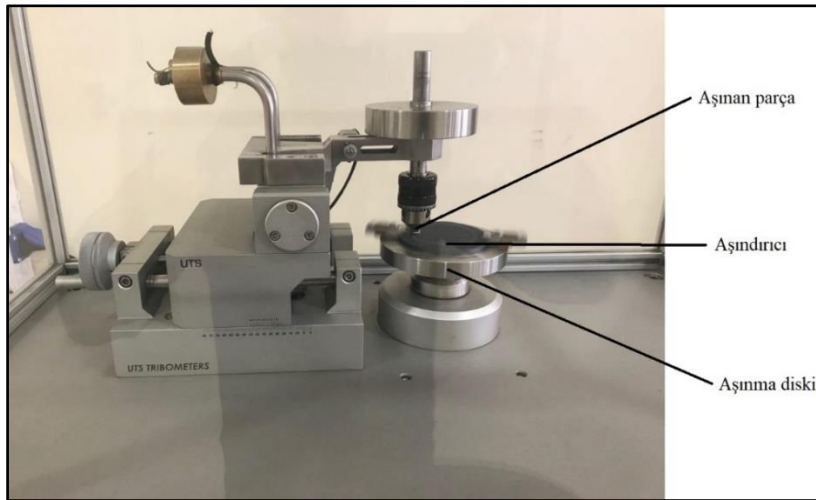
Çizilme ya da yırtılma aşınması olarak da adlandırılan abrasif aşınma, birbiri ile eş çalışan malzeme çiftinde hızlı ve büyük orve a hasar oluşturabilecek, oldukça önemli bir aşınma türüdür. Bu aşınma türü, iki cismin sürtünmesi sırasında, daha sert olan cismin pürüzlülüğü ve taneleri sebebiyle diğer cismin yüzeyini çizerek, bu temas sırasında kaymasına sebep olur.

Abrasif aşınma deneyi aşındırıcı kâğıt yerleştirilmiş disk üzerinde pim kullanılarak ASTM G99 stve ardına uygun olarak oda sıcaklığında kuru ve yağsız koşullar altında yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan parametreler sabit bir şekilde tutularak aşınma değerleri incelenmiştir. Çizelge 7. 9’da kullanılan parametreler verilmiştir.

Çizelge 7.9. Aşınma testi için kullanılan parametreler

Parametreler					
Aşınma mesafesi (m)	Uygulanan yük (N)	Meş boyutu	Dönme hızı (rpm)	Malzeme T-H oranı	Kayma hızı (m/s)
100	10	320	300	%2, %4 ve %8	0.52

Aşınma deney öncesi ve sonrası numuneler 10-4 g hassasiyetinde elektronik terazi ile tartılarak aşınma miktarları ağırlık kaybı (mg) yardımı ile hesaplanmıştır. Abrasiv aşınma deneyi için kullanılan cihaz resim 7. 12’de görülmektedir.

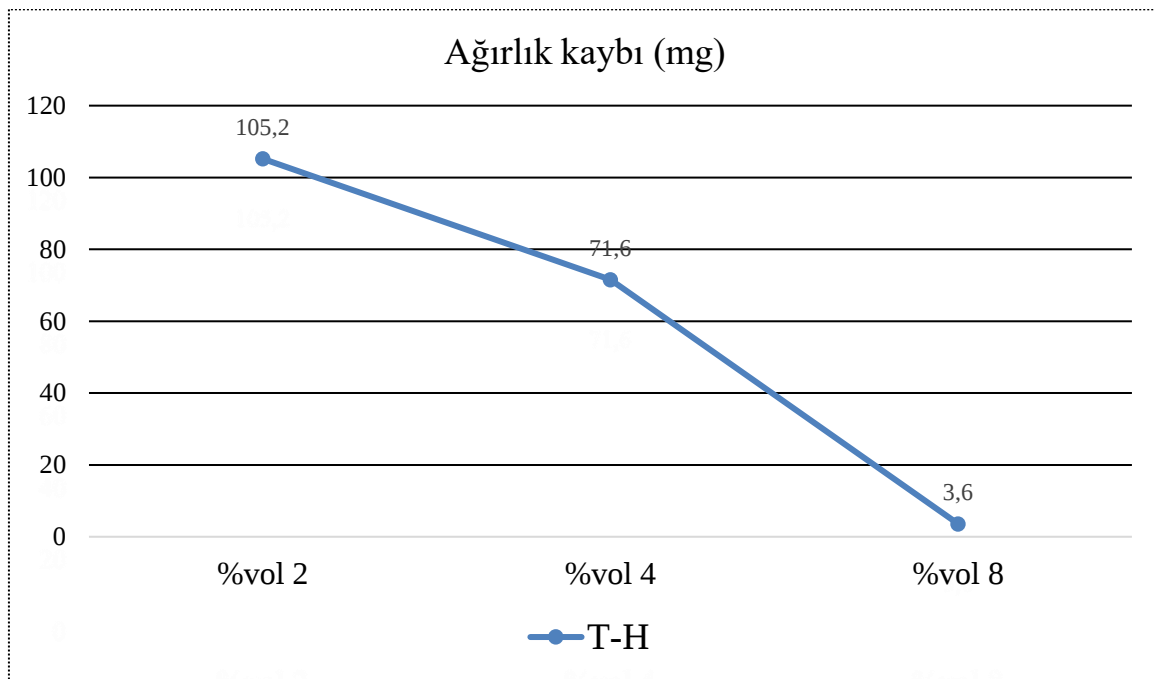


Resim 7.12. Abrasiv aşınma deneyi için kullanılan cihaz

8. DENEY SONUÇLARI

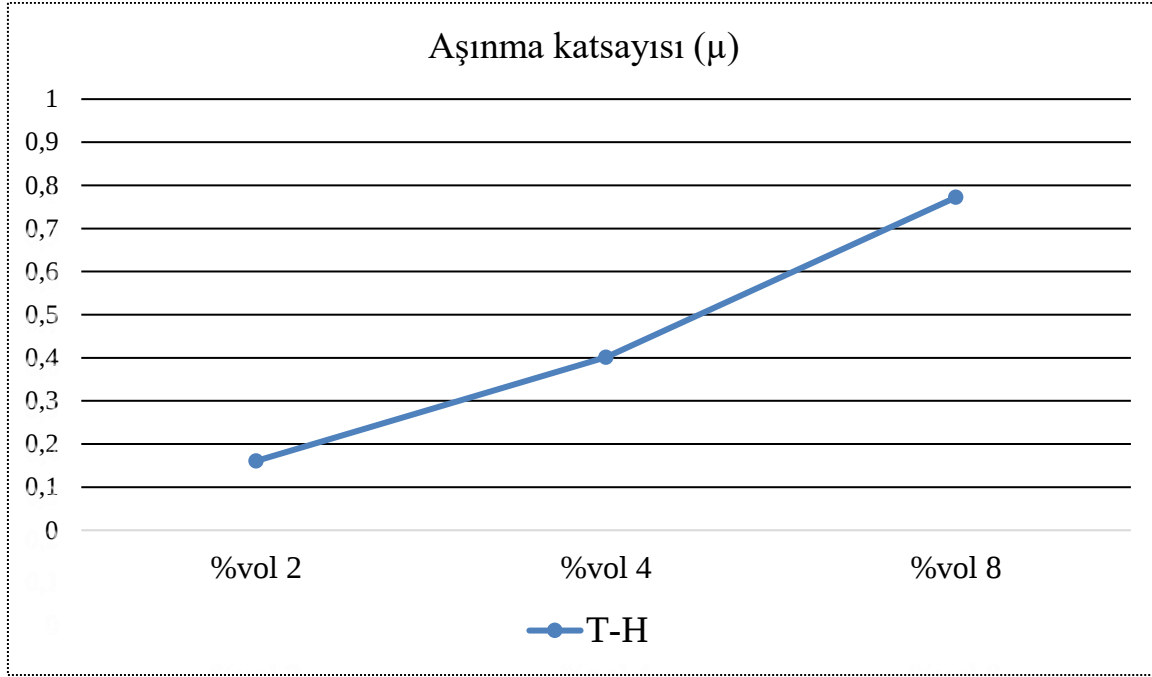
8.1. Aşınma Deney Sonuçları

Deneilerin üzerinde abrasiv aşınma testi yapılmış olup matrise ilave edilen takviye elemanının malzeme aşınma davranışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Daha önce çizelge 7. 9’da belirtilen parametrelerde testler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 8.1’de aşınma deneylerin sonuçları verilmiştir.



Şekil 8.1. Aşınma sonucu takviye hacim oranının ağırlık kaybına olan etkisi

Şekil 8.1’de anlaşıldığı üzere T-H oranının artması malzemede oluşan ağırlık kaybı azalmıştır. En düşük ağırlık kaybına sahip olan deney T-H %8 takviye oranındaki deney olmuştur. Ayrıca Şekil 8.2’de test süreci boyunca aşınma katsayısı ölçülmüş ve ortalama aşınma katsayısı verilmiştir. Daha detaylı incelemek için aşınma katsayısının aşınan mesafeye göre değişimi ek. 2’de verilmiştir.



Şekil 8.2. Aşınma katsayısının takviye hacim oranıyla olan ilişkisi

Çizelge 8. 1’de ise rakamsal olarak ağırlık ölçümleri ve aşınma katsayıları verilmiştir.

Çizelge 8.1. Aşınma deney sonuçları

Deney sırası	Takviye hacim oranı (T-H%)	Ağırlık ölçümleri (g)		Ağırlık kaybı (g)	Aşınma katsayısı (μ)
		Önce	Sonra		
1	2	3.8939	3.7887	0.1052	0.160791358
2	4	3.0172	2.9456	0.0716	0.401000132
3	8	3.5231	3.5195	0.0036	0.772249636

Bu tez çalışmasında 27 EEİ yöntemi, 27 TKEEİ yöntemiyle toplam 54 işleme deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada daha önce belirtildiği gibi amaçlanan hedef üretilen kompozitin EEİ yöntemi ile işlenebilirliğin incelenmesidir. Ayrıca deneylerden daha tutarlı sonuçlar elde etmek için her bir parametre serisi 3 tekrar yapılarak ortalama değerler sunulmuştur. Sonuç olarak 2 farklı yöntem ile ilk aşamada 27 deney normal EEİ ile işlenmiş, daha sonra diğer 27 deney TKEEİ yöntemi ile işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanarak değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde kullanılan parametreler sırasıyla Çizelge 8. 2’de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Kullanılan işleme parametreleri ve yapılan deneylerin sırası

Deney sayısı	Parametreler		
	T-H (T-H%)	İşleme akımı (A)	İşleme yöntemi
1	2	2	EEİ
2	2	4	EEİ
3	2	8	EEİ
4	4	2	EEİ
5	4	4	EEİ
6	4	8	EEİ
7	8	2	EEİ
8	8	4	EEİ
9	8	8	EEİ
10	2	2	TKEEİ
11	2	4	TKEEİ
12	2	8	TKEEİ
13	4	2	TKEEİ
14	4	4	TKEEİ
15	4	8	TKEEİ
16	8	2	TKEEİ
17	8	4	TKEEİ
18	8	8	TKEEİ

Çalışmada tüm işlemler dalma EEİ prensibi ile yapılmıştır. Tüm deneylerde 10 mm çapında bakır takım kullanılmıştır. İşparçalarının çapı 8 mm olduğundan yüzeyler tamamen düz bir şekilde işlenmiştir. Yüzeyin tamamen işlenmesi parçaların fotoğraflanması ve daha detaylı bir şekilde incelenip yorumlanmasını sağlamıştır.

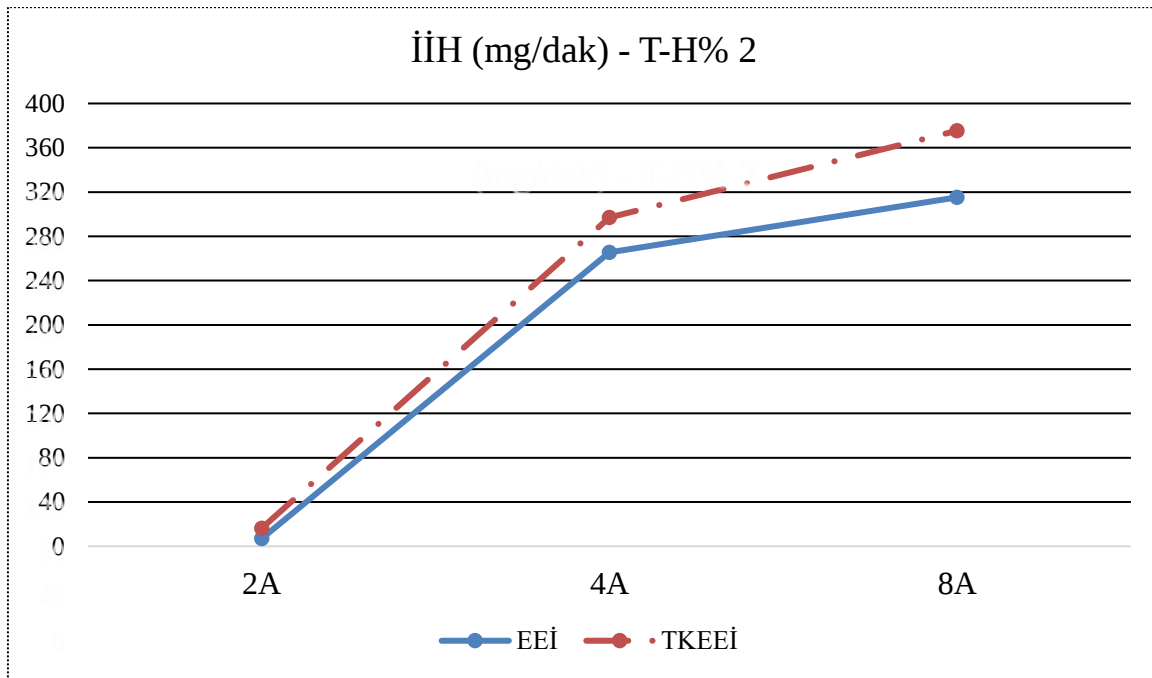
Çalışma boyunca deneylerin çoğunda TAH'da önemli bir etkiye rastlanmamıştır. Ama bu aşınma oranında uygulanan akımdan ve işleme farklılığından dolayı oluşan değişikliklerin incelenmesi amacıyla ağırlık kayıplarındaki değerler kaydedilmiştir.

Yapılan farklı çalışmalarda (Shen, Luo, Zeng, ve Xu, 2002), EEİ ile işlenebilen malzemelerin elektriksel iletkenliklerinin aralığı 100 – 300 Ω -cm olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple yapılan deneylerde bulunan takviye seramiklerinin işleme sırasında oluşturduğu

etkiler incelenmiştir. Ayrıca normal EEİ yöntemindeki seramik takviyesinden ötürü oluşan işleme kararsızlıkları, TKEEİ yöntemi kullanılarak daha iyi bir şekilde ve düzenli olarak işlendiği görülmüştür.

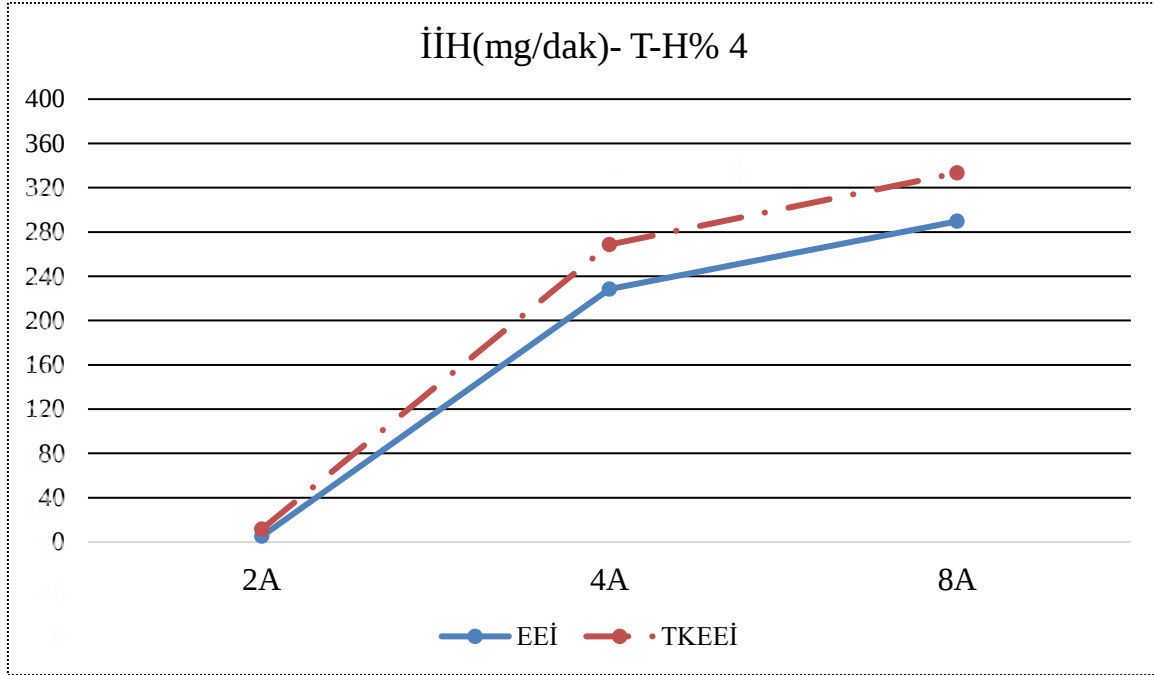
8.2. Elde edilen sonuçların İİH'na olan etkilerinin incelenmesi

İlk deneysel çalışmada T-H %2 takviyeye sahip olan işparçaları işlenmiştir. Bu işparçaları üzerinde yapılan deneylerin İİH değerleri hesaplanmış ve grafikler halinde gösterilmiştir (Şekil 8.3). Sonuçlara bakıldığında açık bir şekilde TKEEİ yöntemi ile işlenen malzemelerde İİH değerlerinde iyileşme görülmüştür. %2 T-H oranına sahip işparçalarında 2A, 4A ve 8A işleme akımının kullanıldığında sırasıyla %135, %12 ve %19 iyileşme görülmüştür. T-H oranı %2 olan işparçalarında TKEEİ işleminde İİH'ndaki iyileşme EEİ ye göre %135 ile 2A işleme akımının kullanıldığı işparçalarında gerçekleşmiştir.



Şekil 8.3. T-H %2 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması

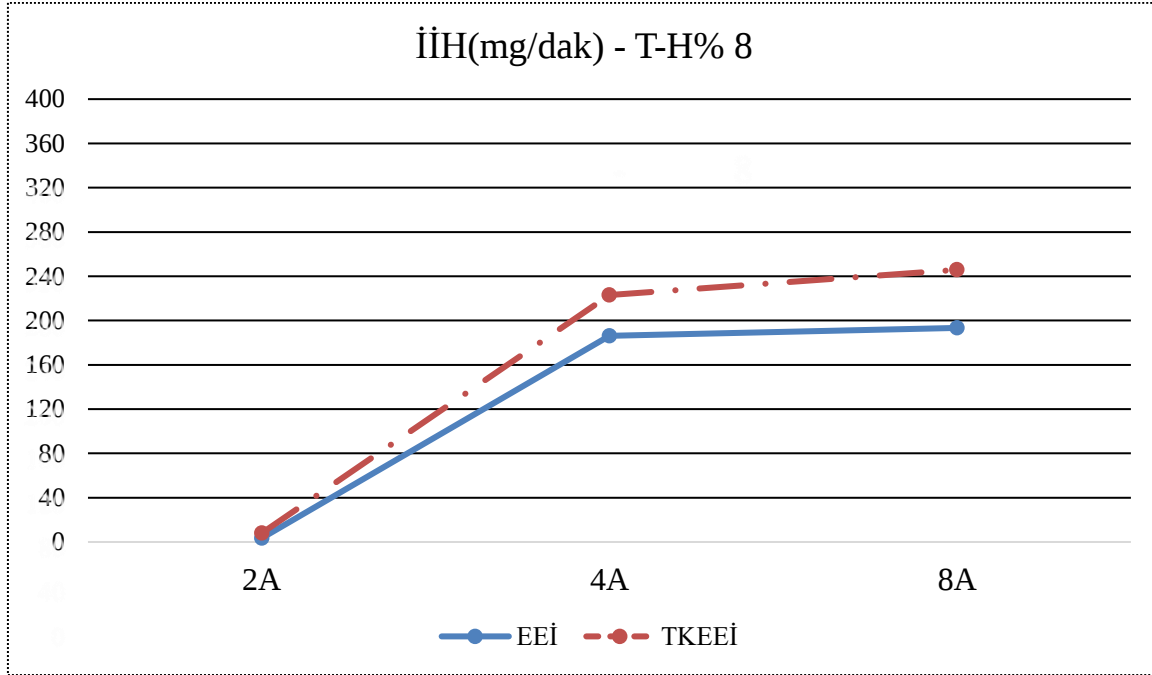
Deneylerden T-H %4 takviyeye sahip işparçalarının sonuçları incelendiğinde T-H %2 takviyeye sahip işparçalarına kıyasla daha düşük İİH elde edilmiştir. TKEEİ yönteminin farkı ise bu takviye oranında da açık bir şekilde anlaşılmaktadır (Şekil 8.4).



Şekil 8.4. T-H %4 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması

İİH değerlerine bakıldığında 2A uygulanması EEİ ve TKEEİ yöntemi arasında pek bir fark oluşturmamıştır. Bunun sebebi ise işleme bölgesine aktarılan enerjinin düşük olması ve katılan tozun boşalımların oluşumunda büyük etkisinin olmadığı düşünülmüştür. T-H %2 takviye oranına sahip işparçalarında en yüksek İİH 2A uygulamasında tespit edilmiştir. %4 T-H oranına sahip işparçalarında işleme performansında iyileşme oranı 2A, 4A ve 8A akım için sırasıyla %126, %18 ve %15 olarak hesaplanmıştır.

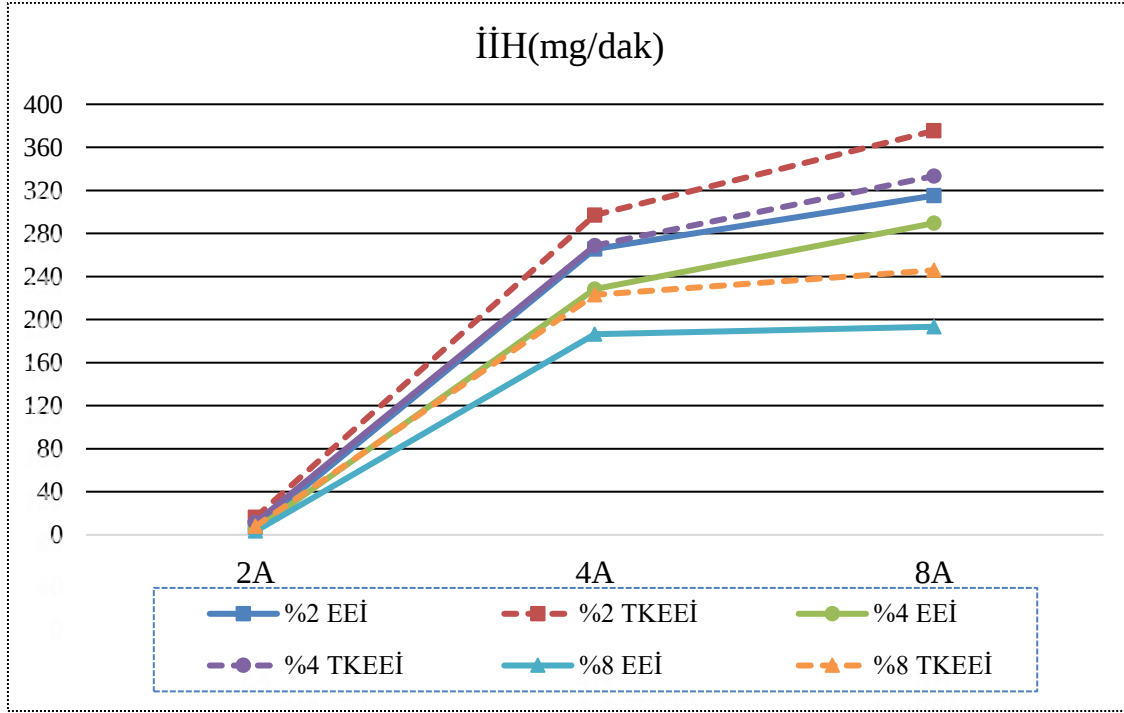
Şekil 8.5’de ise T-H %8 takviyeye sahip işparçalarının İİH hesaplama sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada en düşük İİH değerleri %8 T-H oranında elde edilmiştir (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. T-H %8 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması

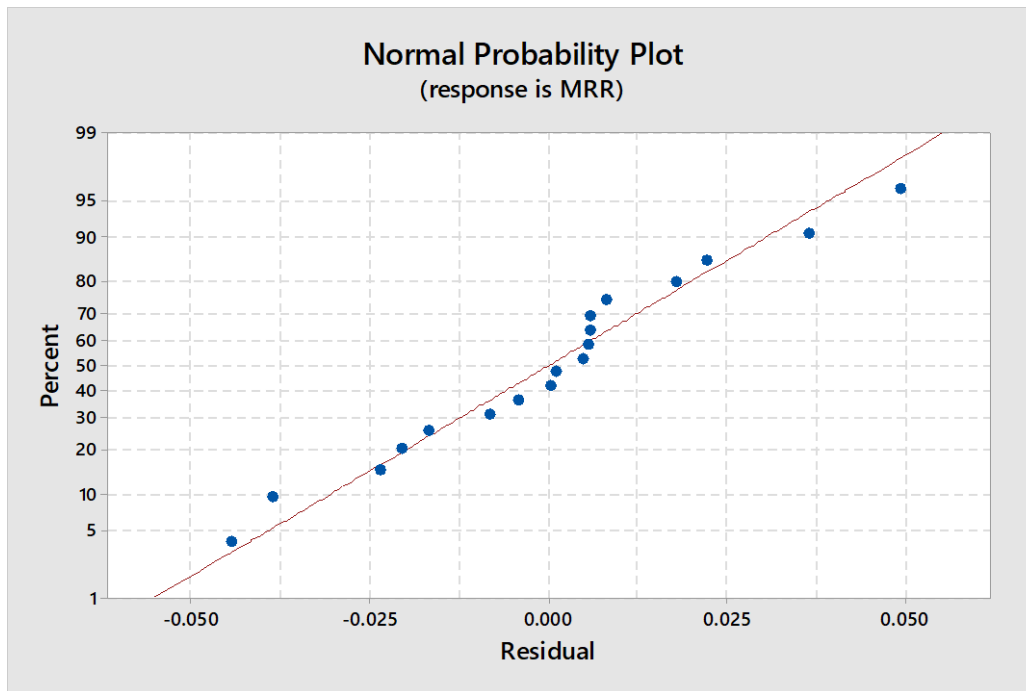
Şekil 8.5'deki grafiğe bakıldığında en yüksek İİH, TKEEİ yönteminde ve 8A uygulave ığında elde edilmiştir. Sonuçlara göre 2A uygulaması, T-H %2 ve T-H %4 takviye oranına sahip her iki işparçaları arasında çok büyük bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. %8 T-H oranına sahip işparçalarında 2A, 4A ve 8A işleme akımının kullanıldığında sırasıyla %131, %19 ve %27 iyileşme görülmüştür.

Yapılan tüm deneylerin İİH sonuçları Şekil 8.6'da verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında en yüksek işparça işleme hızı T-H %2 takviyeye sahip 8A akım değerinde TKEEİ yönteminde işlenmiş işparçasına ait olduğu görülmüştür. Diğer taraftan en düşük İİH T-H %8 takviye oranında olan 2A akım değerinde EEİ yöntem ile işlenmiş işparçasında elde edilmiştir.



Şekil 8.6. Tüm işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu İİH karşılaştırılması

Burada İİH değerlerini daha hassas bir şekilde incelemek amacıyla elde edilen sonuçlar üzerine ANOVA analizi yapılmıştır. Şekil 8.7’de İİH’in normal dağılım eğrisi verilmiştir. Eğriden anlaşıldığı gibi sonuçlar lineer doğrultu düzleminde olmuştur.



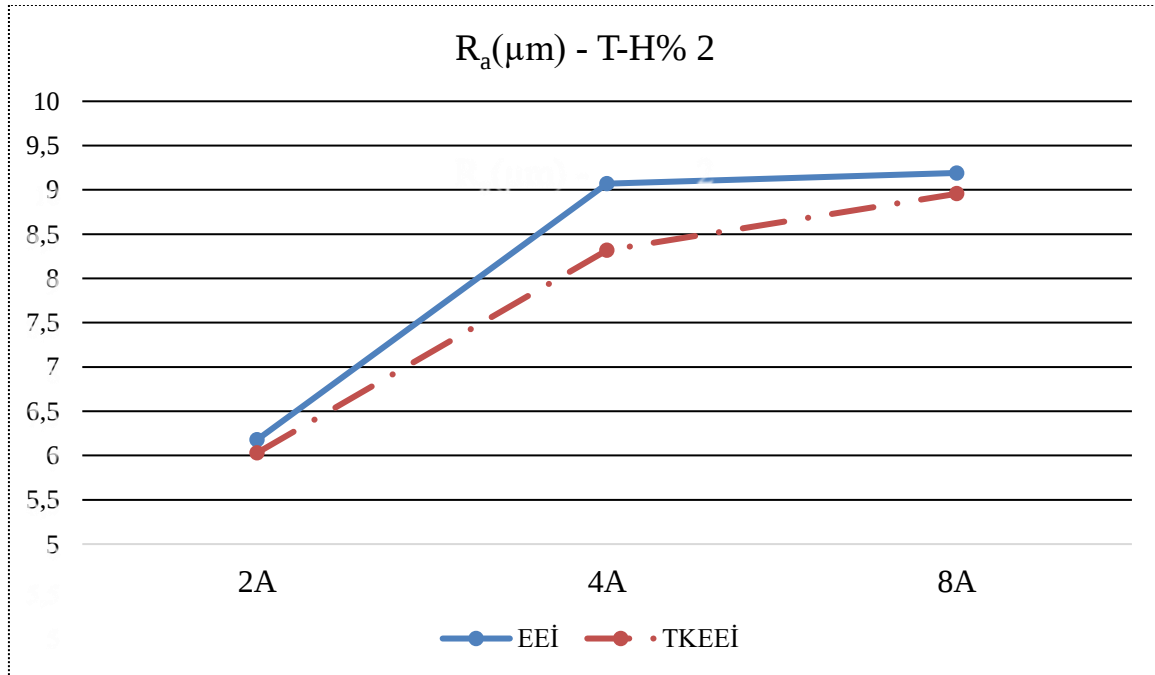
Şekil 8.7. İİH’in normal dağılım eğrisi

Yapılan varyans analizine bakıldığında en etkin parametre akım olmuştur. Yapılan model analiz İİH üzerinde %92 orve a güvenirlilik sağlamıştır.

Çizelge 8.3. İİH varyans analiz sonuçları

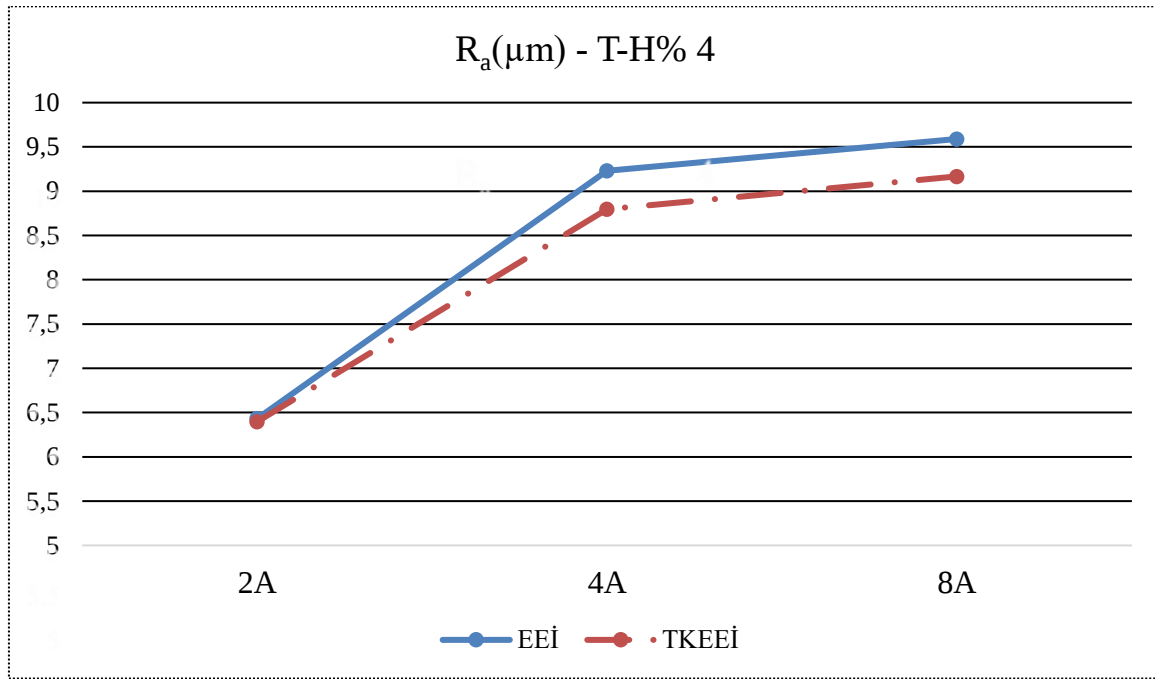
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F – Value	P – Value
İşleme tipi	1	0.004525	0.004525	5.69	0.034
Takviye oranı	2	0.015005	0.007502	9.43	0.003
Akım	2	0.276838	0.138419	173.90	0.000
Error	12	0.009552	0.000796	*****	*****
Total	17	0.305919	*****	*****	*****

Ayrıca ANOVA analizinde regresyon denklemi (8. 1) elde edilmiştir. Denklemi oluşturmak için analizden elde edilen katsayılar ayrıca çizelge 8. 4’de gösterilmiştir. Bu denklemin doğrulama deneyleri yapılmış ve çizelge 8. 5’de sonuç olarak 7 numaralı deneyde hata sapması tespit edilmiştir.



Şekil 8.17. T-H %2 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması

Grafikten de anlaşıldığı gibi T-H %2 takviye oranına sahip işparçalarında en yüksek yüzey pürüzlülük değeri EEİ ile 8A akım değerinde işlenmiş işparçası olmuştur. En iyi yüzey pürüzlülüğü ise TKEEİ yöntemi kullanılarak işparçasının 2A akımında işlenmesiyle elde edilmiştir. T-H oranı %2 olan işparçalarında grafit tozunun katılması işlemeden sonra yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşmeye neden olmuştur. Yüzey pürüzlülüğdeki iyileşme %2 T-H 2A, 4A ve 8A akımın uygulave ığında sırasıyla %2,5 , %9 ve %2,6 olarak hesaplanmıştır. Burada en yüksek iyileşme oranı 4A değerinde elde edilmiştir.



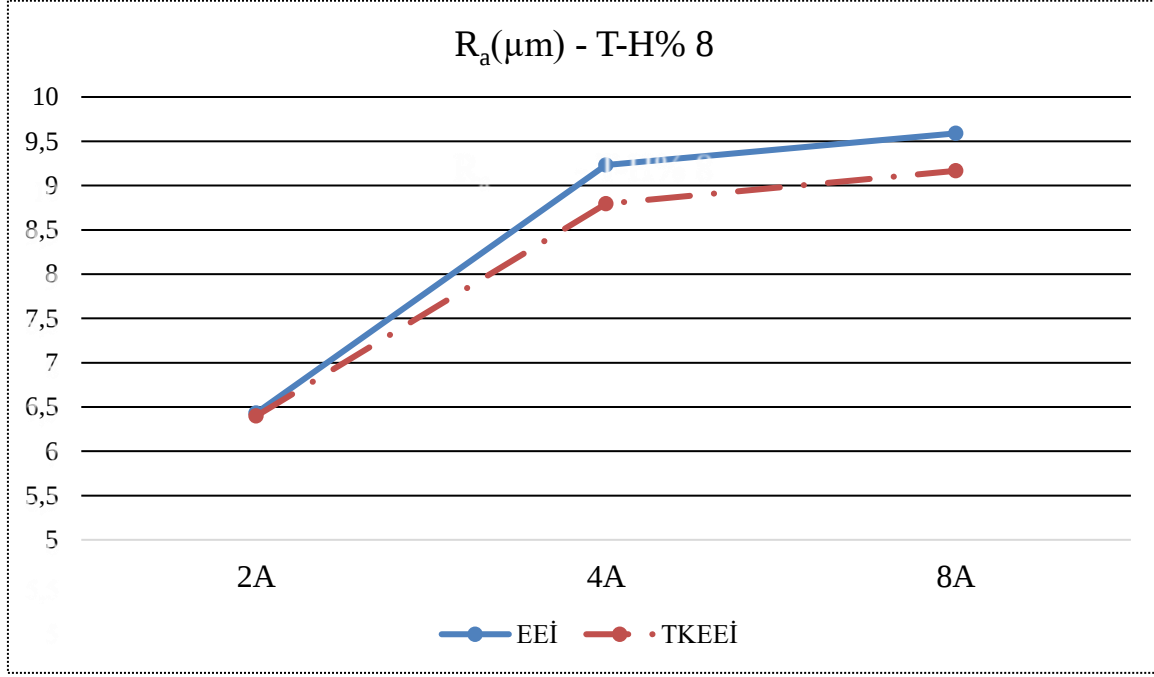
Şekil 8.18. T-H %4 takviyeye sahip işparçaların EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerin karşılaştırılması

T-H oranı %4 olan işparçalarında da yaklaşık aynı davranış gözlenmiştir. Şekil 8.18’de bu durum gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi EEİ yönteminde elde edilen sonuçlar TKEEİ yöntemine kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin akımın artmasıyla artacağı tahmin edildiği gibi gerçekleşmiş olduğu görülmüştür.

Şekil 8.18’de sonuçlara bakıldığında en iyi yüzey pürüzlülük değeri 2A akımında TKEEİ yönteminde elde edilmişken en kötü yüzey pürüzlülüğü ise 8A değerinde EEİ yönteminde ortaya çıkmıştır. Burada aynı T-H%2 takviyeli işparçalarında da olduğu gibi grafit tozunun ilavesi yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. İyileşme oranları 2A, 4A ve 8A için sırasıyla

%0,5, %5 ve %4,6 olarak hesaplanmıştır. Fakat 2A değerinde iyileşme diğer sonuçlara kıyasla çok daha az gerçekleşmiştir.

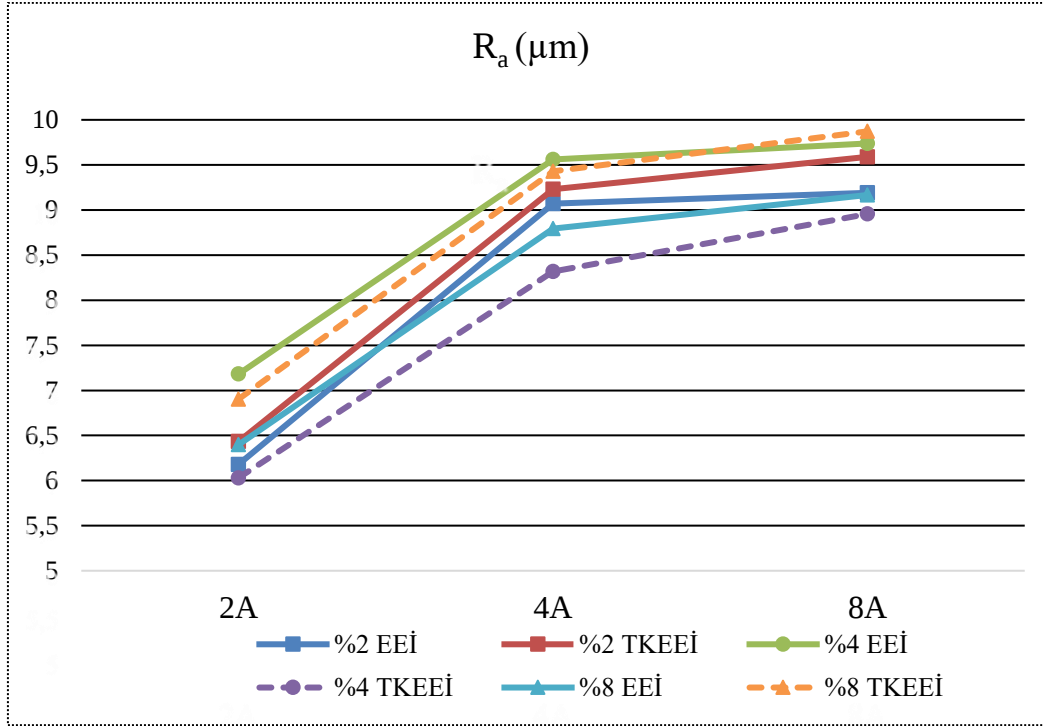
T-H oranı T-H%8 olan işparçalarında yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve Şekil 8.19'da grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 8.19. T-H %8 takviyeye sahip işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEİ yöntemiyle işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması

Grafikten anlaşıldığı gibi burada da akım artışı yüzey pürüzlülüğü üzerinde aynı etkiyi yaratarak, yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmuştur. Ayrıca TKEEİ yönteminde EEİ yöntemine kıyasla daha az pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Görüldüğü gibi dielektrik sıvıya toz katılmasının etkisi boşalım akımının 4 A ve 8 A olduğu işlemlerde daha belirginken 2A'de daha az miktarda olmuştur.

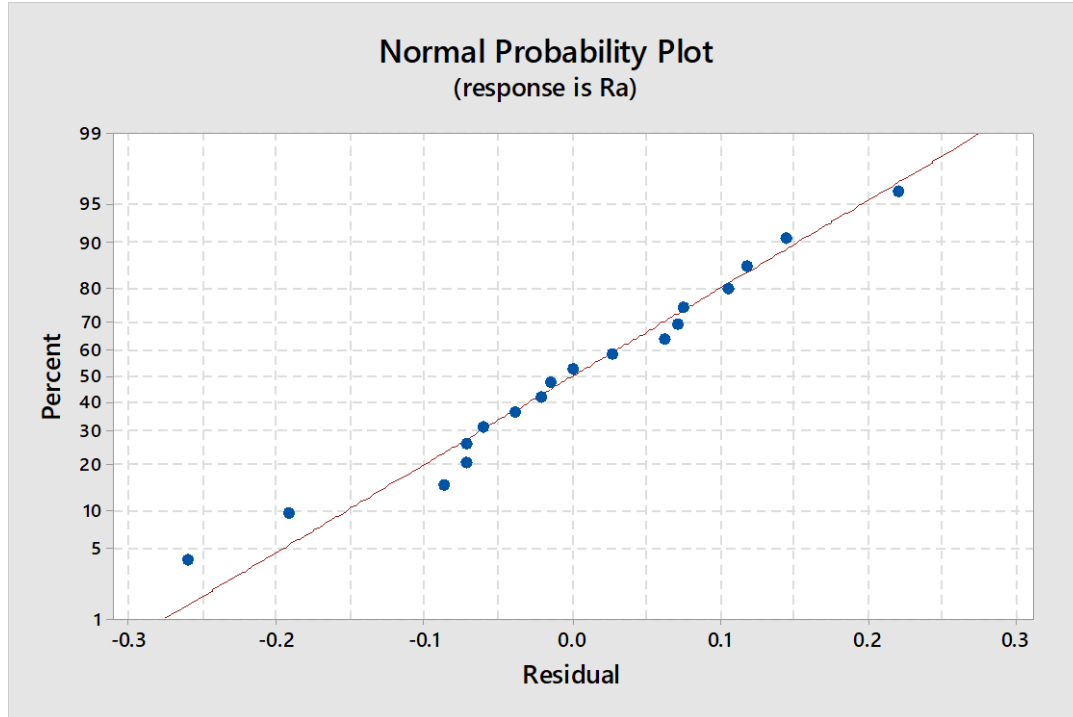
Tüm yüzey pürüzlülük sonuçları daha detaylı bir şekilde Şekil 8.20'de verilmiştir. Bu grafikte akım değerinin ve ayrıca takviye hacim oranının yüzey pürüzlülüğü üstünde nasıl bir etki yarattığı görülmektedir.



Şekil 8.20. Tüm işparçalarının EEİ yöntemi ve TKEEI yöntemiyle işlenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlüklerinin karşılaştırılması

Şekilden de anlaşıldığı gibi en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlülük değeri sırasıyla 2 A’de işlenen T-H%2 takviye oranına sahip ve 8 A’de işlenen T-H %8 takviye oranına sahip işparçalarında elde edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü akım ve T-H oranı ile orantılı bir şekilde artmıştır.

Yüzey pürüzlülük değerlerinin daha iyi incelenmesi ve analiz edilebilmesi için ANOVA analizi uygulanmıştır. Şekil 8.21’de görüldüğü üzere elde edilen yüzey pürüzlülükleri normal dağılım eğrisine yakın olmuştur.



Şekil 8.21. Ra'ın normal dağılım eğrisi

Burada varyans analizi yapılmış ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük üzerine olan etkileri incelenmiştir. Varyans analizin sonuçları çizelge 8. 11'de verilmiştir.

Çizelge 8.11. Yüzey pürüzlülüklerinin varyans analiz sonuçları

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F – Value	P – Value
İşleme tipi	1	0.03509	0.03509	1.77	0.208
Takviye oranı	2	0.12034	0.06017	3.04	0.086
Akım	2	0.18262	0.09131	4.61	0.033
Error	12	0.23782	0.01982	*****	*****
Total	17	0.57586	*****	*****	*****

ANOVA analizi sonucunda Ra için elde edilen denklem aşağıda verilmiştir. Ayrıca elde edilen denklemin katsayıları Çizelge 8. 12'de sunulmuştur. Burada doğrulama deneyleri yapılmış ve 4 numaralı deneyde sapma görülmüştür. Çizelge 8. 13'de yapılan doğrulama deney sonucu gösterilmiştir.

$$R_a = 2.9332 - 0.0442 \text{ İşlemtipi }_{1.0} + 0.0442 \text{ İşlemtipi }_{1.5} - 0.0119 \text{ Takviye oranı }_{2} - 0.0936 \text{ Takviye oranı }_{4} + 0.1056 \text{ Takviye oranı }_{8} - 0.0932 \text{ Akım}(A)_{2} + 0.1399 \text{ Akım}(A)_{4} + 0.0466 \text{ Akım}(A)_{8} \quad (8.3)$$

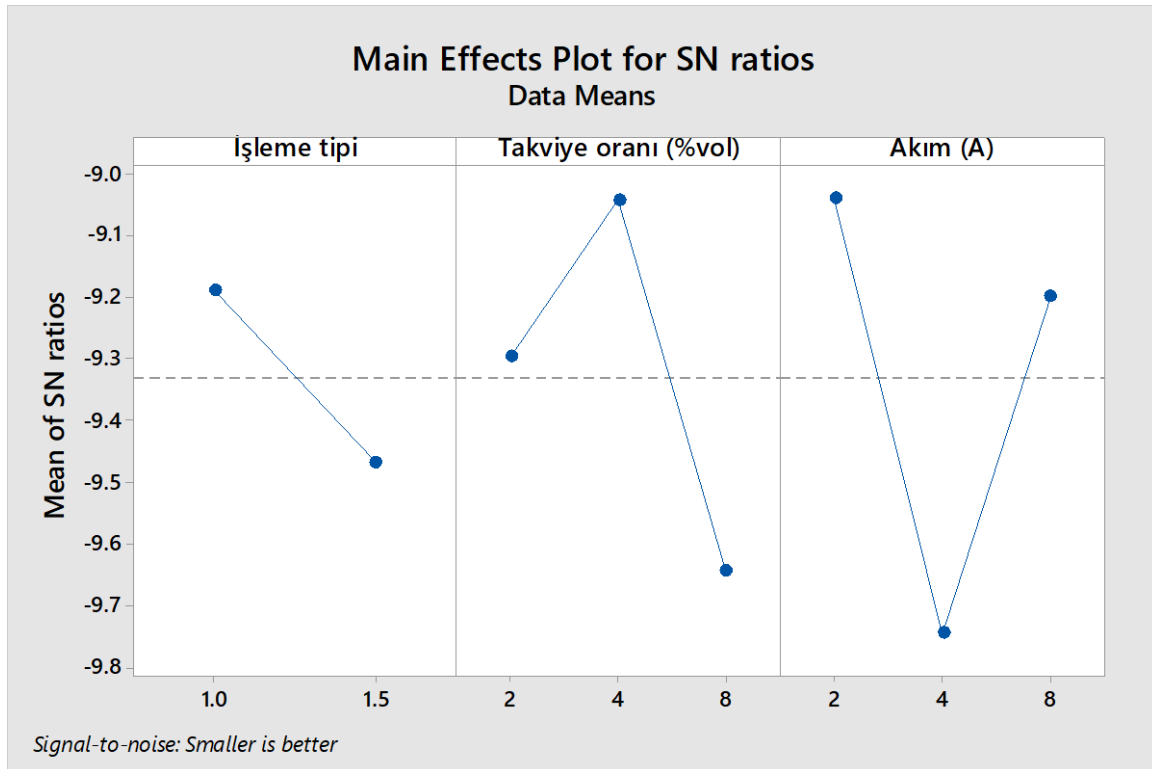
Çizelge 8.12. Ra denklemi için elde edilen katsayılar

Term	Coef	SE Coef	T – Value	P – Value	VIF
Constant	2.9332	0.0332	88.40	0.000	*****
İşleme tipi	*****	*****	*****	*****	*****
1.0	-0.0442	0.0332	-1.33	0.208	1.00
Takviye oranı	*****	*****	*****	*****	*****
2	-0.0119	0.0469	-0.25	0.804	1.33
4	-0.0936	0.0469	-2.00	0.069	1.33
Akım	*****	*****	*****	*****	*****
2	-0.0932	0.0469	-1.99	0.070	1.33
4	0.1399	0.0469	2.98	0.011	1.33

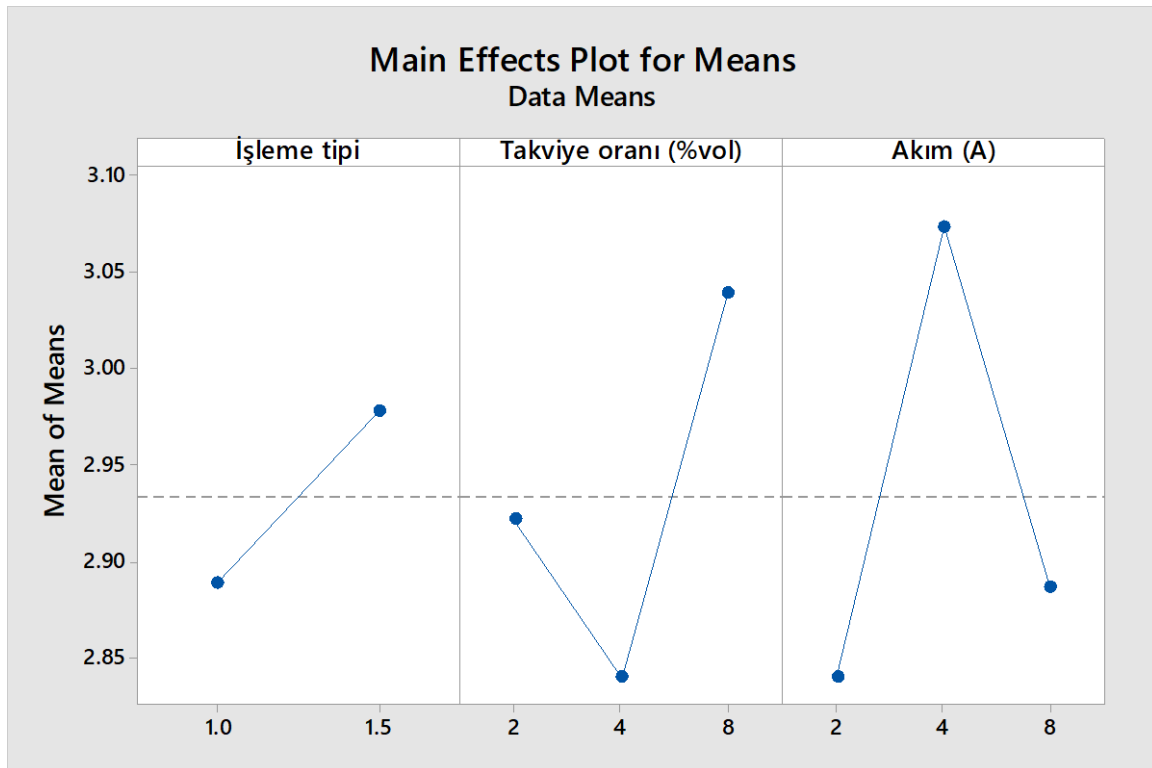
Çizelge 8.13. Ra denklemi için doğrulama deney sonucu

Obs	R _a	Fit	Resid	Std Resid
4	2.4412	2.7022	-0.2610	-2.27 R

Burada işleme tipinin, takviye oranının ve akımın yüzey pürüzlülük üzerinde etkileri incelenmiştir. Şekil 8.22 ve 8. 23’de yüzey pürüzlülüğü grafit tozunun dielektrik sıvısına katılması önemli ölçüde yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. Takviye hacim oranına bakıldığında %4 T-H oranına sahip deneylerde daha iyi yüzeyler elde edilmiştir. Ayrıca akım değerlerinde ise 8 A uygulamasında daha iyi yüzeyler elde edilmiştir. Buna göre optimum parametre olarak %4 T-H oranı ve 8A boşalım akımı önerilmektedir.



Şekil 8.22. İşleme parametrelerinin ortalama Ra'nın SN oranlarına olan etkileri



Şekil 8.23. İşleme parametrelerinin ortalama Ra'nın SN oranları üzerinde etkileri

Tüm yüzey pürüzlülük sonuçları EEİ ve TKEEİ yöntemi için sırasıyla Çizelge 8. 14 ve 8. 15’de sunulmuştur. Ayrıca yüzeylerden alınan yüzey pürüzlülük grafikleri ekte her işparçası için verilmiştir.

Çizelge 8.14. EEİ yöntemi ile yapılmış olan deneylerin sonuçları

Deney sırası	Parametreler		Yüzey pürüzlülük değeri R_a (μm)
	T-H%	Akım (A)	
1	2	2	6.3251
2	2	2	5.0622
3	2	2	7.1515
4	2	4	8.0623
5	2	4	9.6801
6	2	4	9.4702
7	2	8	9.3799
8	2	8	8.8389
9	2	8	9.3536
10	4	2	6.0109
11	4	2	6.6759
12	4	2	6.6103
13	4	4	8.9325
14	4	4	9.832
15	4	4	8.929
16	4	8	9.9711
17	4	8	10.053
18	4	8	8.7443
19	8	2	7.5221
20	8	2	7.1938
21	8	2	6.8277
22	8	4	9.728
23	8	4	9.4401
24	8	4	9.5171
25	8	8	10.6056
26	8	8	9.3628
27	8	8	9.2455

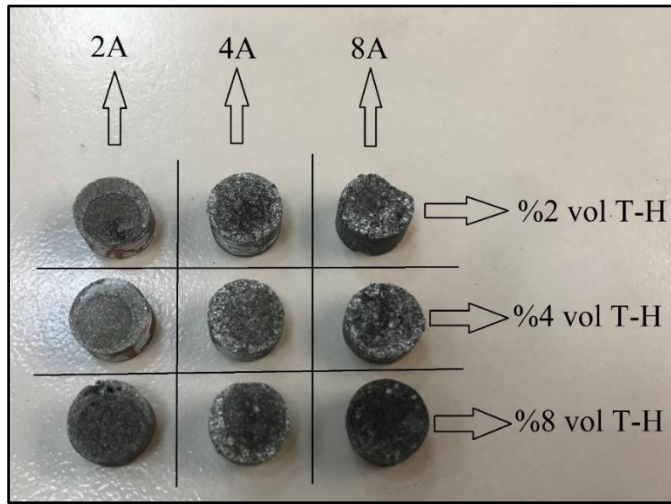
Çizelge 8.15. TKEEİ yöntemi ile yapılmış olan deneylerin sonuçları

Deney sırası	Parametreler		Yüzey pürüzlülük değeri R_a (μm)
	T-H%	Akım (A)	
28	2	2	5.5118
29	2	2	6.691
30	2	2	5.8888
31	2	4	8.7825
32	2	4	8.1634
33	2	4	8.0124
34	2	8	8.6476
35	2	8	9.3476
36	2	8	8.873
37	4	2	4.6656
38	4	2	6.7467
39	4	2	7.7804
40	4	4	9.1369
41	4	4	8.6541
42	4	4	8.5962
43	4	8	8.7565
44	4	8	8.3325
45	4	8	10.4113
46	8	2	7.0476
47	8	2	6.2384
48	8	2	7.4232
49	8	4	9.5451
50	8	4	9.8671
51	8	4	8.8746
52	8	8	10.0202
53	8	8	9.6607
54	8	8	9.936

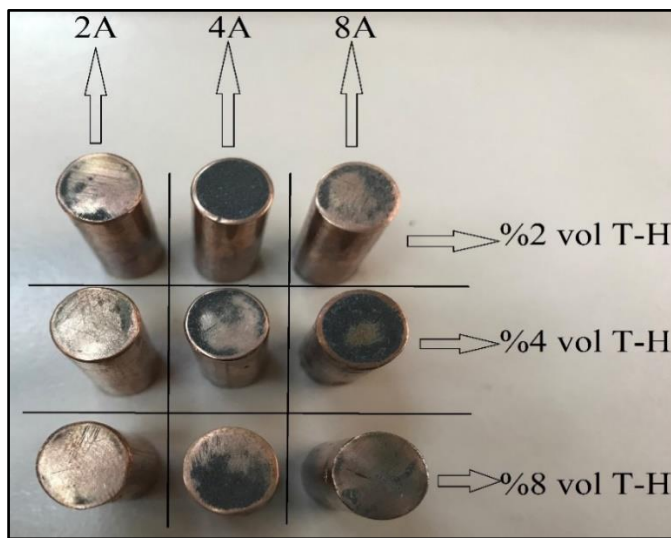
8.5. İşparçalarının Görüntülerinin İncelenmesi

8.5.1. Yüzey görüntülerinin incelenmesi

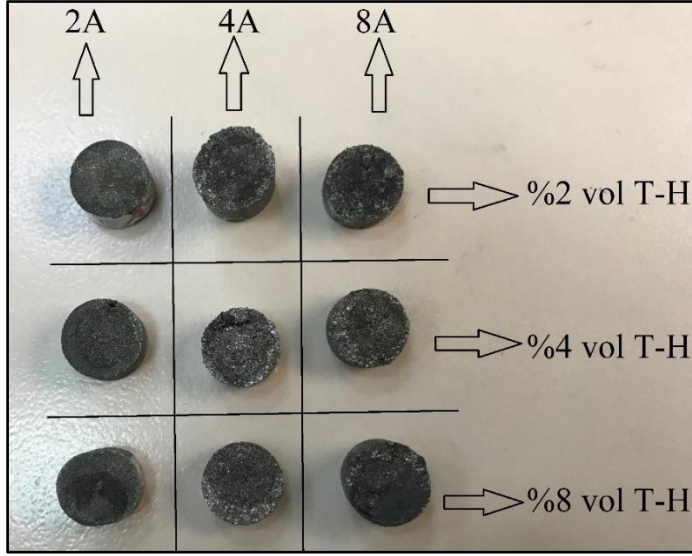
Bu bölümde alınan görüntüler incelenerek işleme kalitesi yorumlanmıştır. Görüntülerin alınması için ilk başta optik mikroskop kullanılmış, daha sonra bazı bölgelerden SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca işparçaları ve takımların işlemeden sonra EEİ yöntemine ait olan yüzey görüntüleri Resim 8. 1 ve 8. 2’de ve TKEEİ yöntemine ait olanları ise Resim 8. 3 ve 8. 4’de gösterilmiştir.



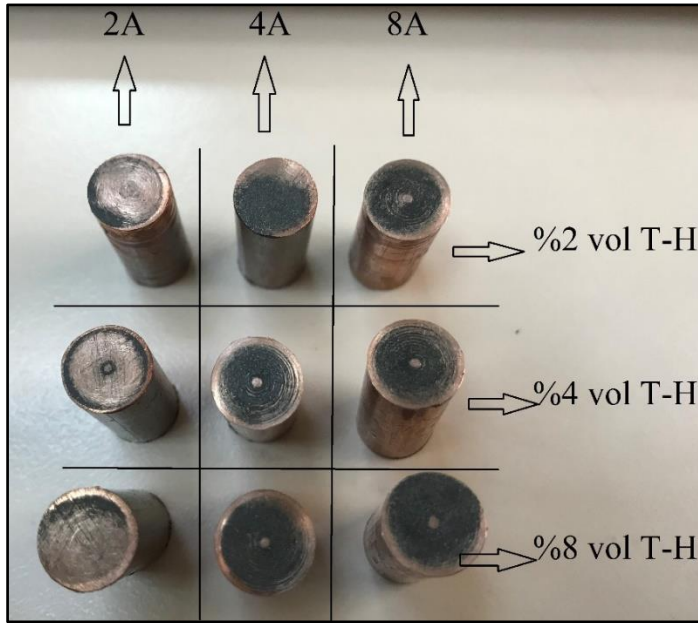
Resim 8.1. EEİ yöntemi ile işlenmiş bazı işparçalarının görüntüleri



Resim 8.2. EEİ yönteminde kullanılan bazı takımların görüntüleri



Resim 8.3. TKEEİ yöntemi ile işlenmiş bazı işparçalarının görüntüleri

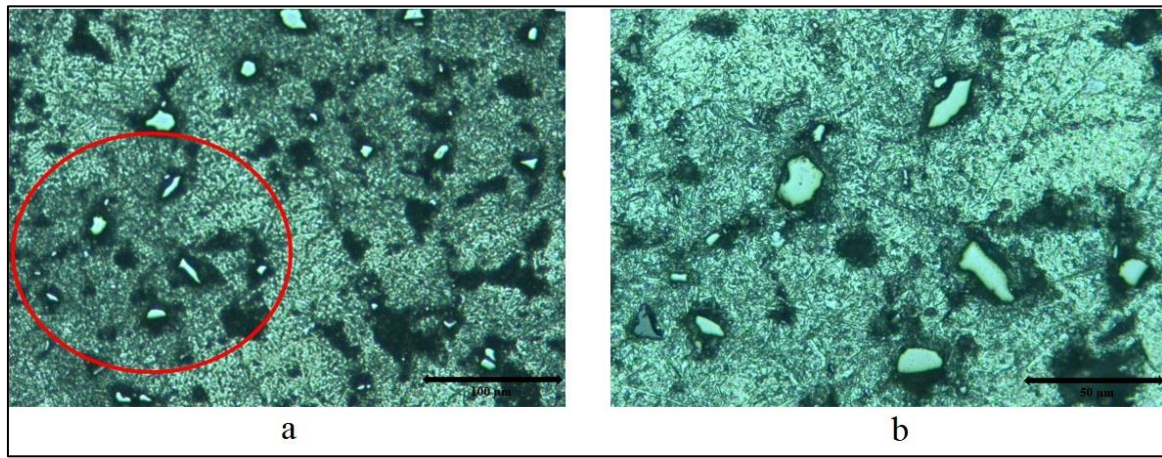


Resim 8.4. TKEEİ yönteminde kullanılan bazı takımların görüntüleri

Fotoğraflardan görüldüğü üzere T-H oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Aynı şekilde akımın artması da yüzey kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. En kötü yüzey kalitesi %8 vol T-H oranına sahip işparçalarında ve 8A uygulave ığında elde edilmiştir. EEİ yöntemindeki yüzeyler işleme mekanizması ve seramik takviyesinden ötürü daha fazla yanarak siyah bölgeler oluşmuştur.

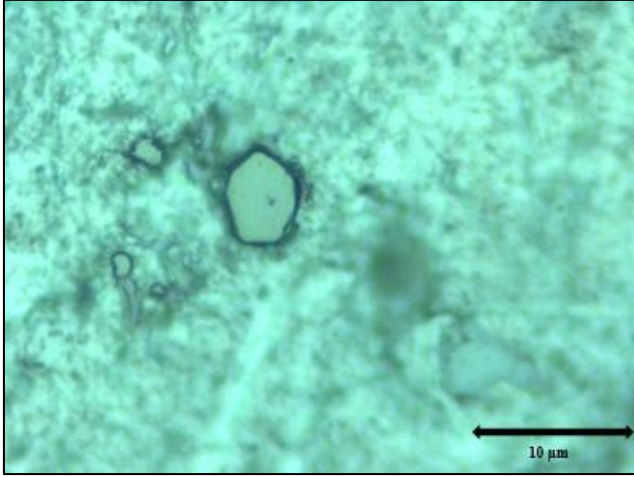
8.5.2. İşlemeden önce mikroyapı görüntülerinin incelenmesi

Bu çalışmada ilk aşamada işlemeden önce üretilen kompozitlerin homojenliğini araştırmak ve ayrıca takviye tozlarının sıvı matris ile ıslatılıp ıslatılmadığını kontrol etmek için mikro yapılar incelenmiştir. Bu sebepten dolayı parçalardan farklı kesitler ve farklı büyütmelerde (10x – 100x) optik mikroskop yardımıyla görüntüler alınıp iç miroyapıları incelenmiştir. İlk aşamada T-H%2 takviyeye sahip işparçasından görüntüler alınıp detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Resim 8.5. T-H %2 takviye oranına sahip iş parçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri. a) 10x büyütme. b) 20x büyütmesi

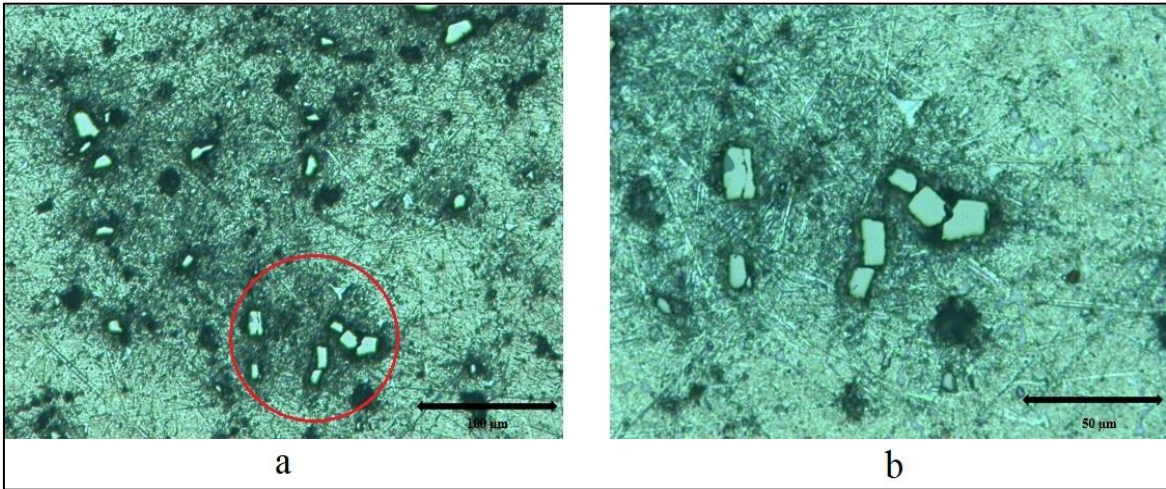
Resim 8. 5 iki farklı büyütmede alınmıştır. Şekil 8.5a'da Seramik partiküllerin homojen biçimde dağıldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 8.5b'den anlaşıldığı gibi seramik tozlar karmaşık şekilli olup keskin köşelere sahiptirler. Görüldüğü üzere T-H%2 takviyeli işparçasında topaklanma neredeyse görülmemektedir. Bu sebepten dolayı bu parçalarının işlenmesinde tezgâhta işleme sırasında diğer işparçalarına kıyasla daha az zorluk yaşanmıştır.



Resim 8.6. T-H %2 takviye oranına sahip işparçasının 100x büyütmedeki görüntüsü

Resim 8. 6 seramik takviye parçasının sıvı matris iyi bir ıslatma elde edildiği görülmektedir. Resimde görüldüğü üzere sıvı matris tamamen infiltrasyon sıcaklığının etkisinden dolayı ergimiş ve soğutmadan sonra katılaşmıştır. Önceden hazırlanmış tüpler içerisinde bulunan Al 2014 tozları tamamen ergimiş ve pota içindeki matris sıvısıyla beraber seramik parçacıkları iyi bir şekilde ıslatmıştır.

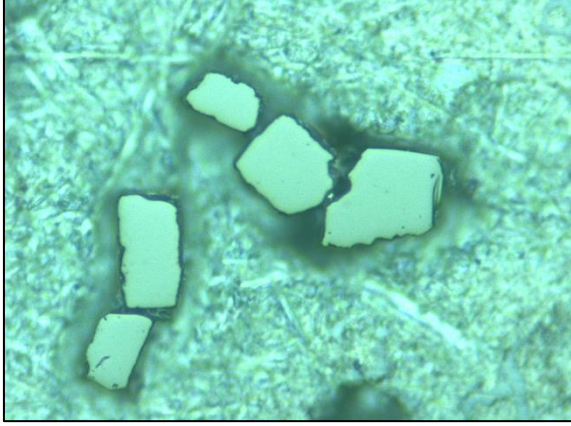
Resim 8. 7'ye bakıldığında takviye oranının T-H %2 oranına göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu resim T-H%4 T-H oranına sahip işparçalarına aittir.



Resim 8.7. T-H %4 takviye oranına sahip işparçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri. a) 10x büyütme. b) 20x büyütmesi

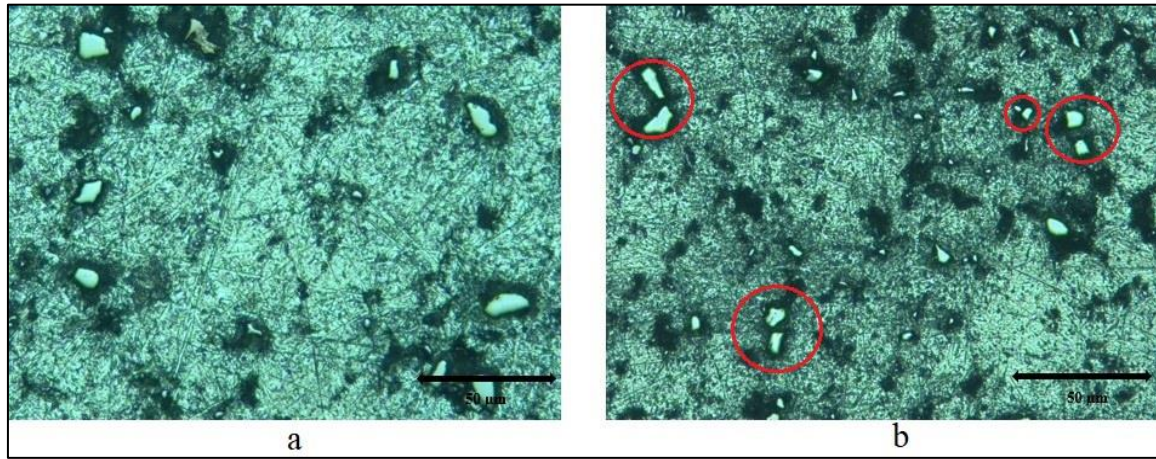
Resim 8. 7a'ya bakıldığında parçacıkların T-H%2 takviye oranına göre biraz daha fazla birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Bu yakınlık seramik partiküllerde topaklanmaya sebep olmaktadır (Resim 8. 7b). Resim 8. 8'de bu topaklanmalardan bir örnek gösterilmiştir.

İşleme sırasında bu topaklanmalar bazı zorluklar yaratmıştır. Seramik partiküllerinin iletkenliğinin düşük seviyelerde olması ve kütle halinde boşalımlara maruz kaldıklarında yüzeyde yanma meydana gelmekle beraber takım ve işparça arasında ark oluşumuna sebep verdiği görülmüştür.



Resim 8.8. T-H%4 takviye oranına sahip işparçasının 50x büyütmedeki görüntüsü

Bu çalışmada T-H %8 takviye oranına sahip işparçaları en yüksek seramik takviye oranına sahip olan işparçalarıdır. Bir numune olarak incelenen işparçasının mikro yapı görüntüleri resim 8. 9’da gösterilmiştir.



Resim 8.9. T-H %4 takviye oranına sahip işparçalarının işlemeden önce mikro yapı görüntüleri.

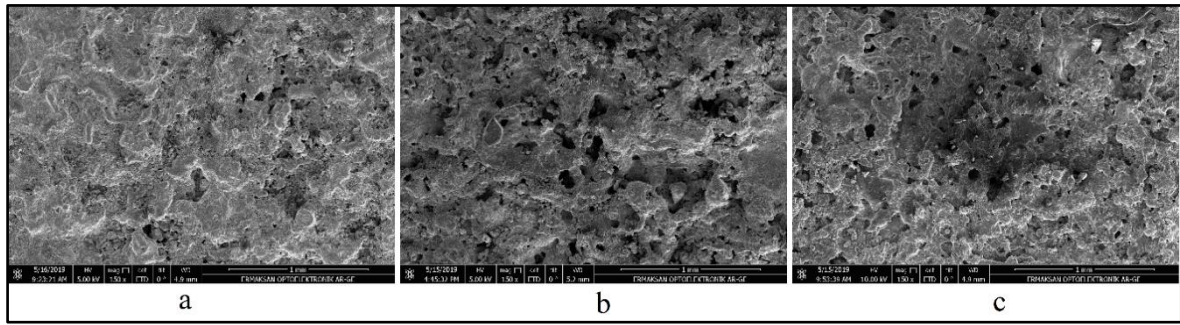
Resim 8. 9’a bakıldığında T-H%8 takviye oranlarına sahip işparçalarında aynı T-H%2 ve 4 takviye oranlarına sahip işparçaları gibi bir homojenlik söz konusudur. Ortalama seramik toz boyutları 10 µm ölçülmüştür. Fakat parçacıkların takviye oranının artması kısmen

topaklanmaya neden olarak işleme sırasında işleme parametrelerini etkilemiştir. Bu bölgelerden bazı örnekler Resim 8. 9b’de işaretlenerek gösterilmiştir.

8.6. İşlemeden Sonra Alınan SEM Görüntülerin İncelenmesi

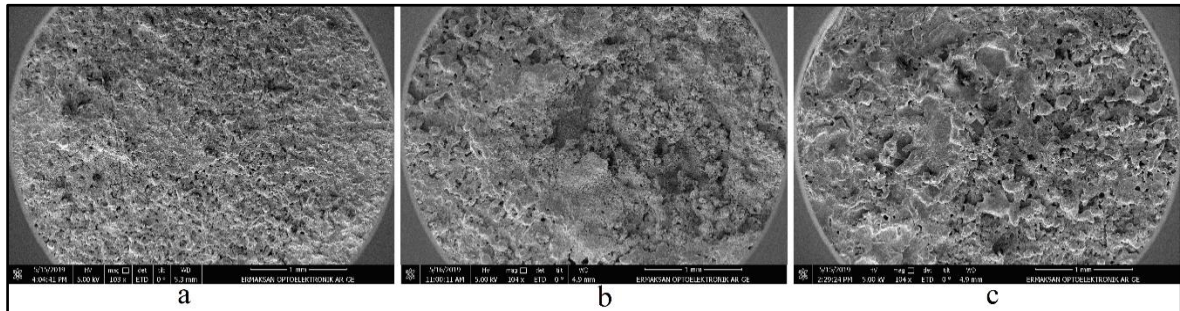
Bu kısımda işlenen işparçalarının yüzeylerini daha detaylı incelemek için SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan SEM görüntüler incelenerek uygulanan akımın ve kullanılan takviye oranının işleme performansına olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca işleme performansını iyileştirmek amacıyla dielektrik sıvıya katılan tozun etkisi incelenmiştir.

Resim 8. 10’da 150X büyütmede sırasıyla T-H%2, T-H%4 ve T-H%8 takviyeye sahip işparçalarının işlenmiş yüzeyleri görülmektedir.



Resim 8.10. 150X büyüklüğünde 8A akımında EEİ yöntemi ile işlenmiş işparçalarında alınan SEM görüntüleri: a) T-H %2, b) T-H %4 ve c) T-H %8.

Resim 8.10’da görüldüğü gibi yüzeydeki oluşan düzensizlikler T-H oranının artmasıyla artmıştır. Resim 8. 11, T-H%8 takviyeye sahip TKEEİ yöntemi ile işlenmiş işparçasının farklı akımlardan nasıl etkilendiğini göstermektedir.

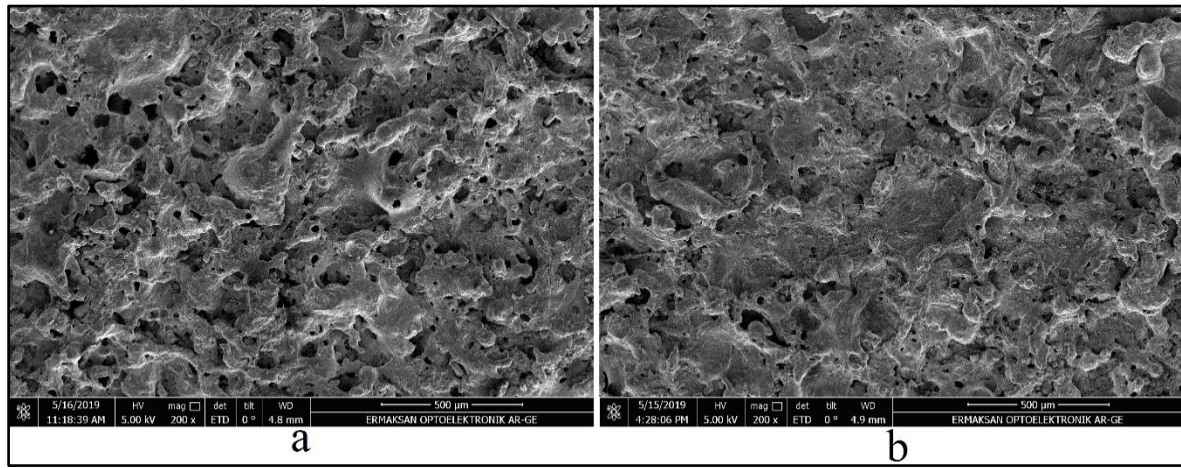


Resim 8.11. T-H %8 takviye oranına sahip farklı akımlarda EEİ yöntemi ile işlenmiş işparçalarında alınan SEM görüntüleri: a) 2 A, b) 4 A ve c) 8 A

Bu görüntülerden anlaşıldığı üzere akım değerinin artması daha büyük değerde boşalım sağlayarak daha büyük boyutlarda kraterler yaratmıştır.

Daha önce belirtildiği üzere işleme performansını iyileştirmek amacıyla dielektrik sıvısına ilave edilen tozun etkisi SEM görüntüleri olarak incelenmiştir.

Yüzeydeki düzensizliklere bakıldığında dielektrik sıvısına ilave edilen tozdan dolayı işlenmiş işparça yüzeyinde iyileşme tespit edilmiş ve krater boyutları küçülmüştür. Resim 8. 12’de EEİ yöntemi ile TKEEİ yönteminin SEM görüntüleri kıyaslanmıştır.



Resim 8.12. T-H %4 takviye oranına sahip 4A akımı ile işlenmiş işparçalarının SEM görüntüleri: a) EEİ ve b) TKEEİ

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada seramik parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretilmiş ve hazırlanan numuneler EEİ ve TKEEİ yöntemleri ile işleme deneyleri yapılarak işlenebilirliği incelenmiştir. Takviye malzemesi TiB₂, matris malzemesi ise Al 2014 alaşımıdır. İşlenen numunelerde farklı parametreler kullanarak İİH, TAH ve YP araştırılmıştır. Takviye malzemeleri hacimce %2, %4 ve %8 oranlarında 3 farklı numune seti üretilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar üzerinde ANOVA analizi yapılmış ve her işleme parametresi için bir regresyon denklemi elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan her parametrenin işleme parametreleri üzerinde olan etkileri yüzdesel olarak verilmiştir.

İşlenmiş yüzeylerden SEM görüntüleri alınarak yüzeyler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca işlenmemiş yüzeylerden optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu yardımıyla mikro yapı incelenmesi yapılmıştır.

Tüm numunelerde işleme sonucunda İİH hesaplanmıştır. İİH sonuçları tüm numunelerde 8 A akımın kullanıldığında en yüksek değere ulaştığını göstermiştir. Takviye oranının etkisi ise açık bir şekilde görülmektedir. Takviye hacim oranının artması ile beraber İİH ters yönde azalmıştır. Akımın artması ise İİH'in artmasına neden olmuştur.

İİH'da T-H%2, T-H%4 ve T-H%8 takviye hacim oranına sahip parçalarda elde edilen en yüksek değerler sırasıyla 0,420419 g/dak, 0,299155 g/dak ve 0,160056 g/dak olmuş en düşük değerler ise sırasıyla 0,005424 g/dak, 0,004414 g/dak ve 0,002540 g/dak olmuştur. Burada artış oranlarına bakıldığında 2A ile 4A arasındaki İİH'in artışı 4A ile 8A arasındaki artışa göre belirgin bir şekilde yüksek olmuştur. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi 4A İİH'da optimum parametre olarak görülmektedir.

Bu tezin amacı doğrultusunda daha yüksek İİH elde etmek için dielektrik sıvı içerisine iletken toz katılması planlanmıştır. Derişim oranı 10 g/L olduğu grafit tozunun katılması İİH üzerinde açık bir şekilde etki göstermiştir. İyileşme oranlarına bakıldığında en yüksek iyileşme 8 A'de ve T-H%2 takviye hacim oranına sahip işparçasında %50 artış olarak elde edilmiştir. Ayrıca grafit tozunun katılması işleme sırasında daha kararlı bir işleme ortamı yaratmış ve işparça ile takım arasındaki ark oluşumunu büyük orve a önlemiştir. İşleme

sırasındaki gözlemlerde daha düzenli bir şekilde boşalımların gerçekleştiği işlemler sırasında anlaşılmıştır.

TAH hesaplanması sonucu tüm takımlarda aşınma tespit edilmiştir. TAH sonuçlarına bakıldığında T-H%2, T-H%4 ve T-H%8 takviye hacim oranlarına sahip işparçalarında sırasıyla en yüksek takım aşınma oranları 0,0015g/dk, 0,0027 g/dk ve 0,0043 g/dak olmuştur. Bu sonuçlar akımın ve T-H oranının artmasının TAH'nın artmasına neden olduğunu göstermektedir.

Grafit tozunun dielektrik sıvıya katılmasıyla TKEEİ işlemleri gerçekleştirilmiş ve TAH değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Yapılan 44 numaralı deneyde takım aşınmasının nerdeyse hiç olmamıştır. TAH'ın azalma oranlarına bakıldığında en yüksek azalma oranı 2 A de T-H%2 takviyeye sahip işparçasında elde edilmiştir. Bu iyileşme oranı %95 olmuştur.

İşparçalarının işlemeden sonra YP değerleri Ra üzerinden ölçülmüştür. Sonuçlar YP değerlerinin, akımın artmasıyla daha düşük ölçülmesine neden olmuştur. Ayrıca takviye hacim oranının artması aynı şekilde yüzeylerin işlenmesini zorlaştırmış ve daha kötü yüzeyler elde edilmiştir. Yüzeylerde oluşan kraterlerin daha büyük olması bu olayı açıklamaktadır.

Yüzey pürüzlülük değerlerini iyileştirmek için dielektrik sıvısına katılan grafit tozu daha pürüzsüz yüzeyler elde etmeye imkân vermiştir. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi TKEEİ yönteminde elde edilen yüzeyler EEİ yönteminde elde edilen yüzeylere kıyasla daha iyi olmuştur.

Optik mikroskopla alınan görüntüler işlemeden önce işparçalarının üretim yöntemine bağlı olarak nasıl özelliklere sahip oldukları hakkında bazı bilgiler vermektedir. Görüntüler bu kompozitlerde homojen bir yapı elde edilmiş olduğunu göstermektedir. Ayrıca takviye hacim oranının artması ile beraber topaklanmaların arttığı SEM ve optik mikroskop fotoğraflarından tespit edilmiştir.

İşlemeden önce yapılan abrasif aşınma testi aynı parametrelerle 3 farklı takviye oranlarına sahip işparçalara yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar T-H%8 takviyeye sahip işparçasının daha yüksek aşınma direnci gösterdiği ve ortalama daha yüksek aşınma katsayısına sahip olduğu

görülmüştür. En düşük aşınma katsayısı ise T-H%2 takviyeye sahip iş parçasında elde edilmiştir. Aşınma katsayıları T-H%2, T-H%4 ve T-H%8 takviyeli işparçalarında sırayla 0.160791358 μ , 0.401000132 μ ve 0.772249636 μ olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sonuçları daha detaylı incelemek amacıyla ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizi tüm sonuçlar için aynı ve a yapılmış olup takviye oranının, akımın ve dielektrik sıvının etkileri İİH, TAH ve YP üzerinde yüzde olarak verilmiş ve matematiksel bir denklem sunulmuştur. Elde edilen denklemlerin güvenilirliği İİH, TAH ve YP için sırasıyla %92, %84,24 ve %72 olmuştur. Ayrıca varyans sapma oranları hesaplanmış ve deneylerde oluşan hata sayısı İİH, TAH ve YP için sırasıyla 1, 2 ve 1 olmuştur.

Görüldüğü üzere ANOVA analiz sonucu uygulanan akımın tüm işleme parametrelerinde en etkili parametre olduğunu açıkça göstermektedir. Takviye hacim oranının işleme sonuçlarına etkisi boşalım akımına kıyasla daha düşük olmuştur.

KAYNAKLAR

- Ve erson, I., ve Foley, J. (2001). Determining the role of surfaces ve interfaces in the powder metallurgy processing of aluminum alloy powders. *Journal Of Materials Transactions*, 31(7), 599-608.
- Ateş, S., Uzun, İ., Calin, R., ve Citak, R. (2012). Effect of Infiltration Pressure on Thermal Conductivity of Al 2014 Matrix Composite Powered by Silicon Carbide. *Asian Journal of Chemistry*, 24(1), 76-80.
- Basu, B., Raju, G., ve Suri, A. (2013). Processing ve properties of monolithic TiB₂ based materials. . *International Materials Reviews*, 51(6), 352-374.
- Chawla, N., Williams, J., ve Saha, R. (2002). Mechanical behavior ve microstructure characterization of sinter-forged SiC particle reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Light Metals*, 2(4), 215-227.
- Chethan, R., Syed, K., ve Piue, K. (2016). Machinability of Al/ 10%SiC/ 2.5%TiB₂ Metal Matrix Composite with Powder-mixed Electrical Discharge Machning. *Procedia Technology*, DOI: 10.1016/j, 1056-1063.
- Choudhury, S., Saharia, N., ve Mondal, G. (2018). Study on the Influence of Hybridized Powder Mixed Dielectric in Electric Discharge Machining of Alloy Steels. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18410-18415.
- Chow, H.-M., Hwa, Y., Huang, F.-Y., ve Hung, J.-C. (2000). Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1-3), 95-103.
- Çalın, R. (2015). Effects of reinforcement volume fraction on the abrasive wear behaviour of Al–MgO composites produced by the vacuum infiltration method. *Jornal of Engineering Tribology*, 30 (3-4), 808-814.
- Çalın, R., Pul, M., Bican, O., ve Küçüktürk, G. (2015). Effect of matrix temperature ve powder size on the infiltration height of SiO₂-reinforced Al 7075 matrix composites produced by vacuum infiltration. *Science ve Engineering of Composite Materials*, 24(1), 1-5.
- Çıtak, R., Çalın, R., ve Zühtü, P. (2010). Effect of Reinforcement Volume Ratio on ThermalConductivity of MgO Reinforced Al Matrix Composite Produced by Vacuum Infiltration Method. *Asian Journal of Chemistry*, 22(5), 4054-4060.
- Dewangan, S., Gangopadhyay, S., ve Biswas, C. (2015). Study of surface integrity ve dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS ve sensitivity analysis. *Measurement*, 63, 364-376.
- Divecha, A., Fishman, S., ve Karmarkar, S. (1981). Silicon Carbide Reinforced Aluminum A Formable Composite. *Journal Of Metal*, 33(9), 12-17.
- Erden, A., ve Bilgin, S. (1980). *Role of impurities in electric discharge machining*. Proceedings of 21st International Machine Tool Design ve Research. London.

- Friedrichs, P., Kimoto, T., Ley, L., Pensl, G., ve Wiley, J. (2011). *Silicon Carbide*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH ve Co.
- Fukuzawa, Y., Mohri, N., Gotoh, H., ve Tani, T. (2009). Three-dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 14, 150-156.
- Furutania, K., Saneto, A., Takezawa, h., Mohri, N., ve Niyake, H. (2001). Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid. *Precision Engineering*, 25, 138-144.
- Ghosh, A. (1993). *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, in *Metal Matrix Composites*. London: Stomeham.
- Guedes, M., Ferreira, J., Rocha, L., ve Ferro, A. (2011). Vacuum infiltration of copper aluminate by liquid aluminium. *Ceramics International*, 37(8), 3631-3635.
- Gupta, K., ve Jain, N. (2014). Analysis ve optimization of micro-geometry of miniaturespur gears manufactured by wire electric discharge machining. *Precision Engineering*, 38(4), 728-737.
- Gupta, K., ve Jain, N. (2014). Comparative study of Wire-EDM ve Hobbing for manufacturing high-quality miniature gears. *Mater Manuf Processes*, 29(11-12), 1470-1476.
- Hassan, A. (2014). *Conventional ve Nonconventional Processes*. Paris: Taylor ve Francis Group.
- Helmi, A., ve Youssef, H. (2008). *Machining technology machine tools ve operations*. Boca Raton: CRC Press co.
- Hu, F., Cao, Y., Song, B., Hou, P., Zhang, Y., Chen, K., ve Wei, J. (2013). Surface Properties of SiCp/Al Composite by Powder-Mixed EDM. *Procedia*, 6, 101-106.
- Islam, M., Ping Li, C., Jae Won, S., ve Jo Ko, T. (2017). A deburring strategy in drilled hole of CFRP composites using EDM process. *Journal of Alloys ve Compounds*, 703, 477-485.
- Isro, M., Selvaraj, L., Sathiyarayanan, C., ve Jeyapaul, R. (2016). Optimization of EDM process parameters in machining Si₃N₄-TiN conductive ceramic composites to improve form ve orientation tolerances. *Measurement*, 92, 114-129.
- Jabbaripour, B., Sadeghi, M., Shabgard, M., ve Faraji, H. (2013). Investigating surface roughness, material removal rate ve corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1), 56-68.
- Jain, V. (2004). *Advanced Machining Processes*. London: Allied Publishers Pvt. Limited.
- James, E., Shackelford, F., ve Alexve er, W. (2001). *Materials Science ve Engineering Hve book*. CRC Press LLC.

- Jatti, V., ve Bagane, S. (2018). Thermo-electric modelling, simulation ve experimental Thermo-electric modelling, simulation ve experimental. *Alexve ria Engineering Journal*, 57(2), 643-653.
- Jeswani, M. (1981). Effects of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. *Wear*, 18(4), 133-139.
- Kansal, H., Singh, S., ve Kumar, P. (2008). Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method. *Mathematical ve Computer Modelling*, 47(11-12), 1217-1237.
- Khazraji, A., Amin, S., ve Ali, S. (2016). The effect of SiC powder mixing electrical discharge machining on white layer thickness, heat flux ve fatigue life of AISI D2 die steel. *Engineering Science ve Technology*, 19(3), 1400-1415.
- Kozak, J., ve Dabrowski, M. (2013). Study of electrical discharge machining using powder suspended working media. *Journal of Engineering Manufacture*, 217(11), 1597-1602.
- Kumar, N., kumaran, s., ve Kumaraswamidhas, L. (2015). An investigation of mechanical properties ve material removal rate, tool wear rate in EDM machining process of AL2618 alloy reinforced with Si₃N₄, AlN ve ZrB₂ composites. *Alloys ve Compounds*, 650, 318-327.
- Kumar, S. (2013). *An experimental study of the phenomenopn of surface alloying by EDM process using Inconel tool electrode*. ASME 2013 International Manufacuturing Science ve Engineering Conference. Madison.
- Kumar, S., ve Kumar, M. (2015). Machining process parameter ve surface integrity in conventional EDM ve cryogenic EDM of Al–SiCp MMC Manufacturing . *Processes*, 20, 70-78.
- Kumar, V., Kumar, A., Kumar, S., ve Singh, N. (2018). Comparative Study of Powder Mixed EDM ve Conventional EDM Using Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18089-18094.
- Lauwers, B., Kruth, J.-P., Liu, W., ve Eeraerts, W. (2004). Investigation of Material Removal Mechanisms in EDM of Composite Ceramic Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 347-352.
- Lei Xu, Mi Yan, Yi Xia, Peng, J., Li, W., Zhang, L., Li, Y. (2014). Influence of copper content on the property of Cu–W alloy prepared by microwave vacuum infiltration sintering. *Journal of Alloys ve Compounds*, 592, 202-206.
- Li, L., Bai, X., ve Lİ, Z. (2016). Surface characteristics of Ti–6Al–4V alloy by EDM with Cu–SiCcomposite electrode . *Applied Surface Science*, 388, 546-550.
- McGeough, J. (1988). *Advanced Methods of Machining*. Amasterdam: Springer Netherlve s.
- McGeough, J. (2002). *Micromachining of Engineering Materials*. Paris: Taylor ve Francis Group.

- Mondal, G., Surekha, B., ve Choudhury, S. (2018). Investigation on the influence of different Powder mixed Dielectric in Electric discharge Machining. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18281-18286.
- Noble, A., ve Ajmal, L. (1983). Electro-discharge machining of silicon carbide. *International Symposium of Electro Machining*, 305-312.
- Ou, S., ve Wang, C. (2017). Effects of bioceramic particles in dielectric of powder-mixed electrical discharge machining on machining ve surface characteristics of titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 70-79.
- Patil, N., brahmankar, P., ve Thakur, D. (2016). *On the effects of wire electrode ve ceramic volume fraction in wire electrical discharge machining of ceramic particulate reinforced aluminium matrix composites*. 18th CIRP Conference on Electro Physical ve Chemical Machining. Amsterdam.
- Pecas, P., ve Henriques, E. (2002). Emerging technologies in penetration on EDM. *O Molde*, 26-36.
- Pecas, P., ve Henriques, E. (2003). Influence of silicon powder mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. *International Journal of Machining Tools ve Manufacturing*, 43(14), 1465-1471.
- Pehlivanl, Z., Çalın, R., ve Uzun, I. (2010). Effect of Moisture ve Temperature on Thermal Conductivity of G2/04 Class Autoclaved Aerated Concrete. *Asian Journal of Chemistry*, 22(5), 4101-4110.
- peng Li, X., gangWang, Y., Zhao, F.-l., hua Wu, M., ve Liu, Y. (2014). Influence of high frequency pulse on electrode wear in micro-EDM. *Defence Technology*, 10(3), 316-320.
- Prakash, C., Kansal, H., Pabla, S., ve Puri, S. (2017). On the Influence of Nanoporous Layer Fabricated by PMEDM on β -Ti Implant: Biological ve Computational Evaluation of Bone- Implant Interface. *Materials Today Proceedings*, 4(2), 2298-2307.
- Pul, M., Küçüktürk, G., Çalın, R., ve Şeker, U. (2011). Effects of Reinforcement Volume Fraction on the Abrasive Wear Behaviour of Al—MgO Composites Produced by the Vacuum Infiltration Method. *ournal of Engineering Tribology*, 280, 84-90.
- Qi, L., Ju, L., Zhou, J., Li, S., Zhang, T., ve Tian, W. (2017). Tensile ve fatigue behavior of carbon fiber reinforced magnesium composite fabricated by liquid-solid extrusion following vacuum pressure infiltration. *Journal of Alloys ve Compounds*, 721, 55-63.
- Rao, P. N. (2000). Metal Cutting ve Machine Tools. *Manufacturing Technology*. New Delhi: Tata McGraw Hill.
- Rengasamy, N., Rajkumar, M., ve Kumaraan, S. (2016). An analysis of mechanical properties ve optimization of EDM process parameters of Al 4032 alloy reinforced with Zrb2 ve Tib2 in-situ composites. *Alloys ve Compounds*, 325-338.

- Rozenek, M., Kozak, J., ve Dabrowski, L. (2001). *Study of electrical discharge machining using powder suspended working media*. 12th ISEM. Bilbao.
- Saha, R., Morris, E., Chawla, N., ve Pickard, M. (2002). Hybrid ve conventional particle reinforced metal matrix composites by squeeze infiltration casting. *Journal of Materials Science Letters*, 21(4), 337-339.
- Satpathy, A., Tripathy, S., Senapati, P., ve Brahma, K. (2017). Optimization of EDM process parameters for AlSiC- 20% SiC reinforced metal matrix composite with multi response using TOPSIS. *Materials today: proceedings*, 4(2), 3043-3052.
- Schmidt, J., Böhlting, M., Burkhardt, U., ve Grin, Y. (2007). Preparation of Titanium Diboride TiB₂ by Spark Plasma Sintering at Slow Heating Rate. *Science ve Technology of Advanced Materials*, 8(5), 376-382.
- Schwartz, M. (1985). *Engineering Applications of Ceramic Materials*. Ohayo: American Society for Mertals.
- Shabgard, M., ve Khosrozadeh, B. (2017). Investigation of carbon nanotube added dielectric on the surface characteristics ve machining performance of Ti-6Al-4V alloy in EDM process. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 212-219.
- Sharma, S., Fitriani, P., ve Yoon, H. (2016). Microstructure-fracture behavior correlation of toughened SiCf/SiC composites prepared by vacuum infiltration ve hot pressing. *Ceramics International*, 42(7), 8713-8723.
- Shen, J., Luo, C., Zeng, W., ve Xu, P. (2002). Ceramics grinding under the condition of constant pressure. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1), 176-181.
- Spowart, J., Maruyama, B., ve Miracle, D. (2001). Multi-scale characterization of spatially heterogeneous systems: implications for discontinuously reinforced metal matrix composite microstructures. *Material Science ve Engineering*, 189-200.
- Surya, V., Kumar, V., Keshavamurthya, R., Ugrasen, G., ve Ravindra, V. (2016). Prediction of Machining Characteristics using Artificial Neural Network in Wire EDM of Al7075 based In-situ Composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1-10.
- Tani, T., Fukazawa, F., Mohri, N., ve Okada, M. (2001). *Machining phenomena in EDM of insulating ceramics using powder suspended working oil*. 12th ISEM. Bilbao.
- Torres, A., Luis, C., ve Puertas, I. (2017). EDM machinability ve surface roughness analysis of TiB₂ using copper electrodes. *Alloys ve Compounds*, 690, 337-347.
- Toshimitsu, R., Okada, A., Kitada, R., ve Okamoto, Y. (2016). Improvement in Surface Characteristics by EDM with Chromium Powder Mixed Fluid. *Procedia*, 42, 231-235.
- Tripathy, S., ve Tripathy, D. (2017). An approach for increasing the micro-hardness in electrical discharge machining by adding conductive powder to the dielectric. *Materials Today Proceedings*, 4(2), 1215-1224.

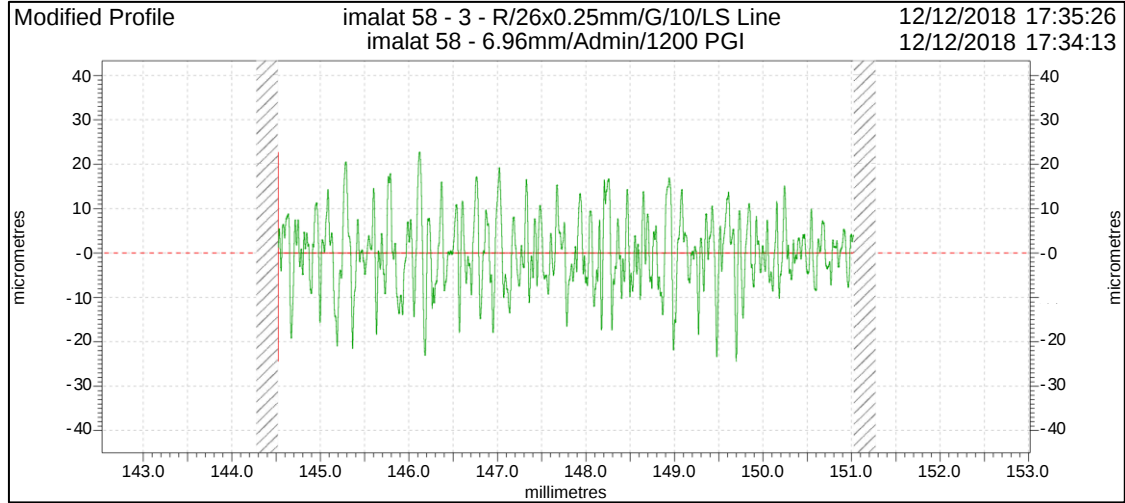
- Tripathy, S., ve Tripathy, D. (2017). Surface Characterization ve Multi-response optimization of EDM process parameters using powder mixed dielectric. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2058-2067.
- Tzeng, Y., ve Lee, C. (2001). Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency. *Journal of Advance Manufacturing Technology*, 17(8), 586-592.
- Uhlmann, E., Schimmelpfennig, T.-M., Perfilov, I., Streckenbach, J., ve Schweitzer, L. (2016). Comparative Analysis of Dry-EDM ve Conventional EDM for the Manufacturing of Micro Holes in Si₃N₄-TiN. *Procedia*, 42, 173-178.
- Uno, Y., ve Okada, A. (1997). Surface generation mechanism in electrical discharge machining with silicon powder mixed fluid. *International Journal Of Electrical Machining*, 2, 13-18.
- Uno, Y., Okada, A., Hayashi, Y., ve Tabuchi, Y. (1998). Surface Integrity in EDM of Aluminum Bronze with Nickel Powder Mixed Fluid. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 24-31.
- Vilà, J., Sket, F., Wilde, F., ve Requena, G. (2015). An in situ investigation of microscopic infusion ve void transport during vacuum-assisted infiltration by means of X-ray computed tomography. *Composites Science ve Technology*, 119, 12-19.
- Vogeler, F., Lauwers, B., ve Ferraris, E. (2016). Analysis of Wire-EDM finishing cuts on large scale ZrO₂-TiN hybrid spark plasma sintered blanks. *Procedia*, 42, 268-273.
- Vogt, U., Gorbar, M., Eggenschwiler, P., ve Broenstrup, A. (2010). Improving the properties of ceramic foams by a vacuum infiltration process. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(15), 3005-3011.
- Wang, H., Yang, X., Xu, J., ve Liu, L. (2019). Effect of Na₃AlF₆ Addition ve Surface Modification of SiCp on the Microstructure ve Mechanical Properties of SiCp/Al Composites. *Journal of Wuhan University of Technology*, 34(3), 534-540.
- Wong, Y., Lim, L., Rahuman, I., ve Tee, W. (1998). Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30-40.
- Xiang, L., ve Park, S. (2016). Preparation of titanium dioxide films on etched aluminum foil by vacuum infiltration ve anodizing. *Applied Surface Science*, 388, 245-251.
- Yang, N., Boselli, J., ve Sinclair, I. (2001). Simulation ve quantitative assessment of homogeneous ve inhomogeneous particle distributions in particulate metal matrix composites. *Journal of Microscopy*, 201(2), 189-200.
- Yeo, S., Kurnia, W., ve Tan, P. (2008). Critical assessment ve numerical comparison of electro-thermal models in EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1), 241-251.
- Zhao, W., Meng, Q., ve Wang, Z. (2002). The application of research on powder mixed EDM in rough machining. *Journal of Material Process Technology*, 129(1), 30-33.

- Zhao, X., Gu, D., Ma, C., Xi, L., ve Zhang, H. (2019). Microstructure characteristics ve its formation mechanism of selective laser melting SiC reinforced Al-based composites. *Vacuum*, 160, 189-196.
- Zhu, J., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., ve Wang, L. (2017). Interfacial structure ve stability of a co-continuous SiC/Al composite prepared by vacuum-pressure infiltration. *Ceramics International*, 43(8), 6563-6570.
- Ziada, Y., ve Koshy, P. (2007). Rotating Curvilinear Tools for EDM of Polygonal Shapes with Sharp Corners. *Manufacturing Technology*, 56(1), 221-224.

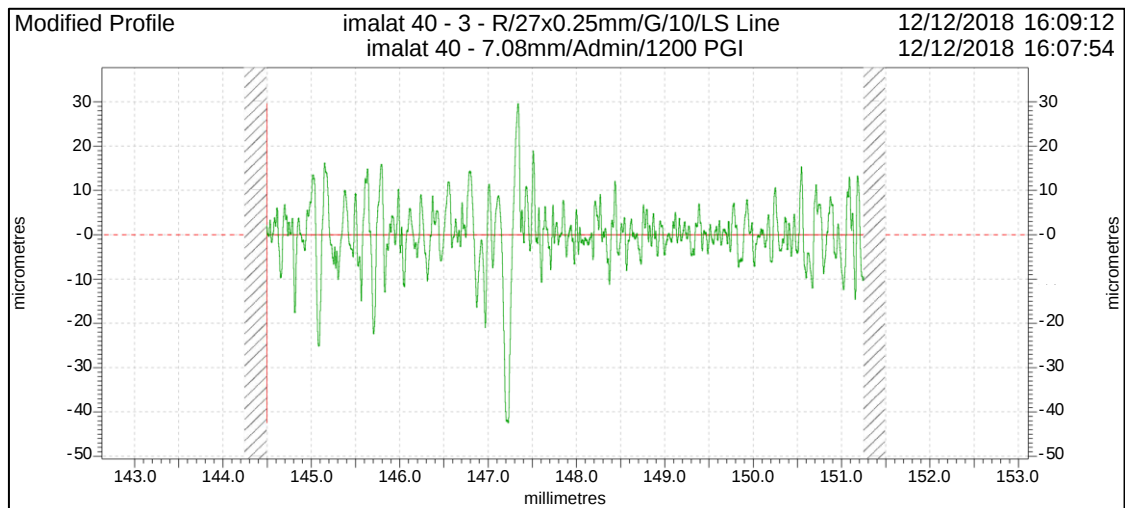
EKLER

EK-1. Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

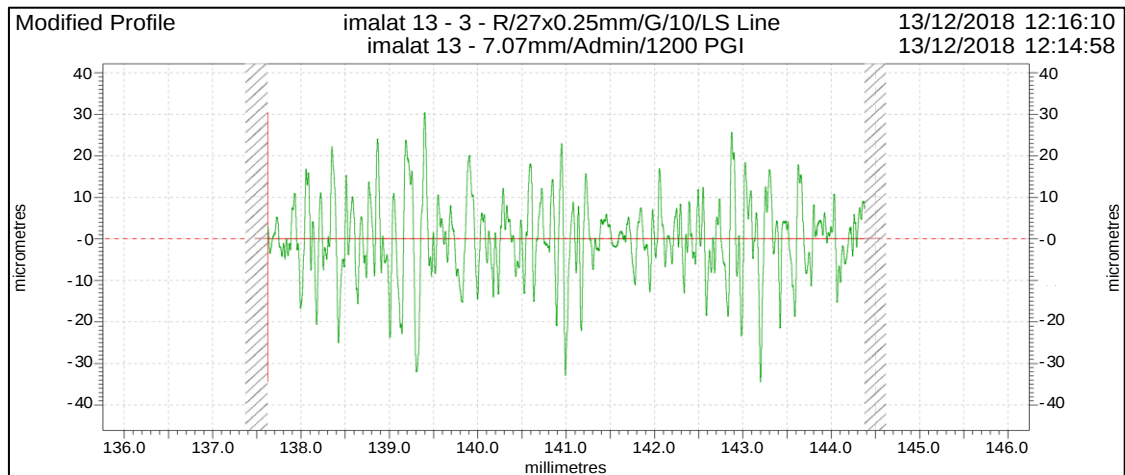
1 numaralı deney



2 numaralı deney

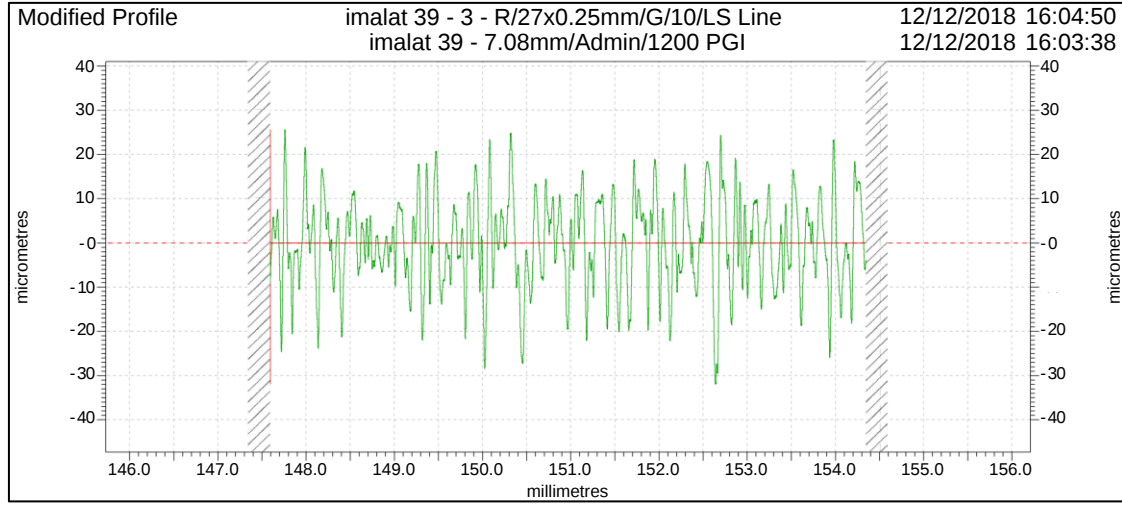


3 numaralı deney

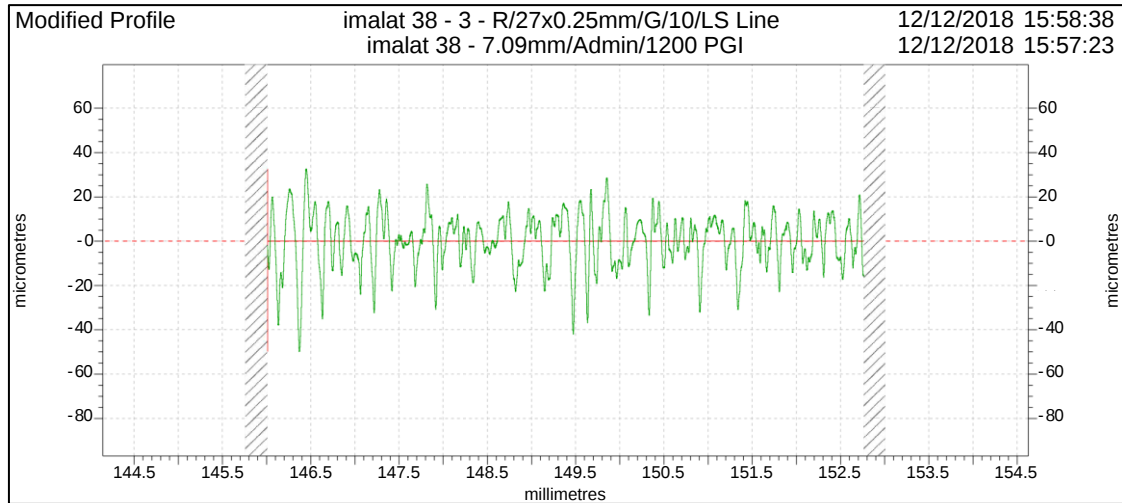


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

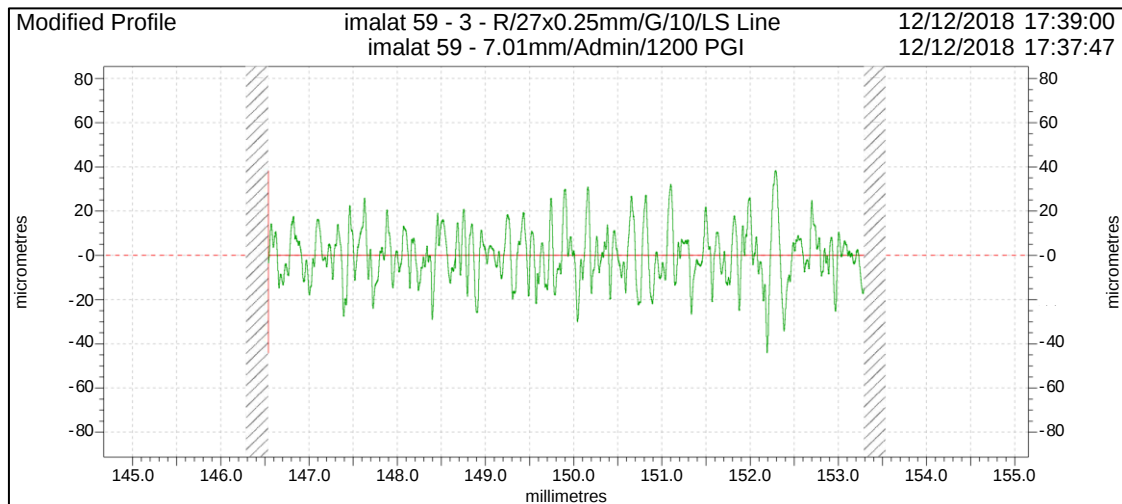
4 numaralı deney



5 numaralı deney

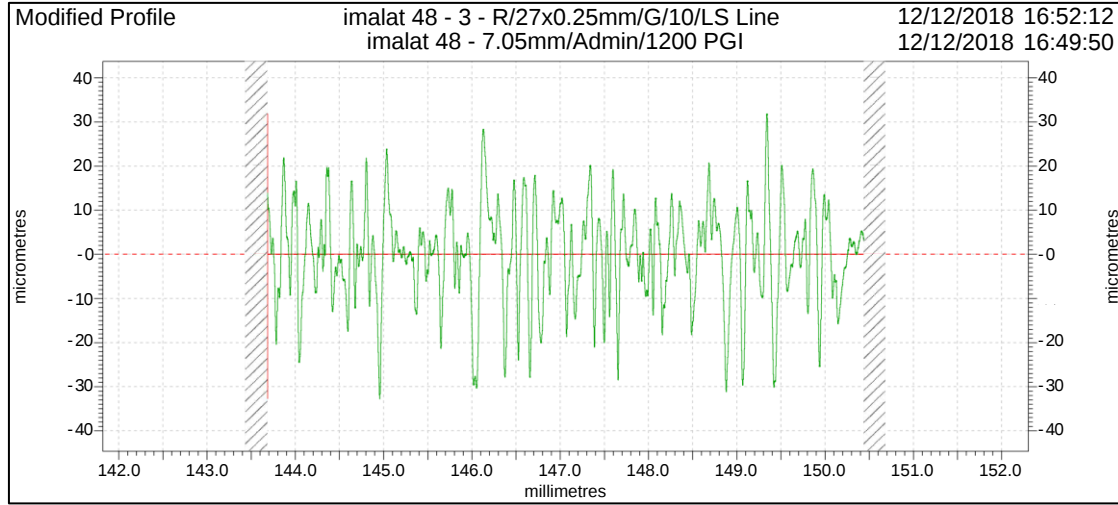


6 numaralı deney

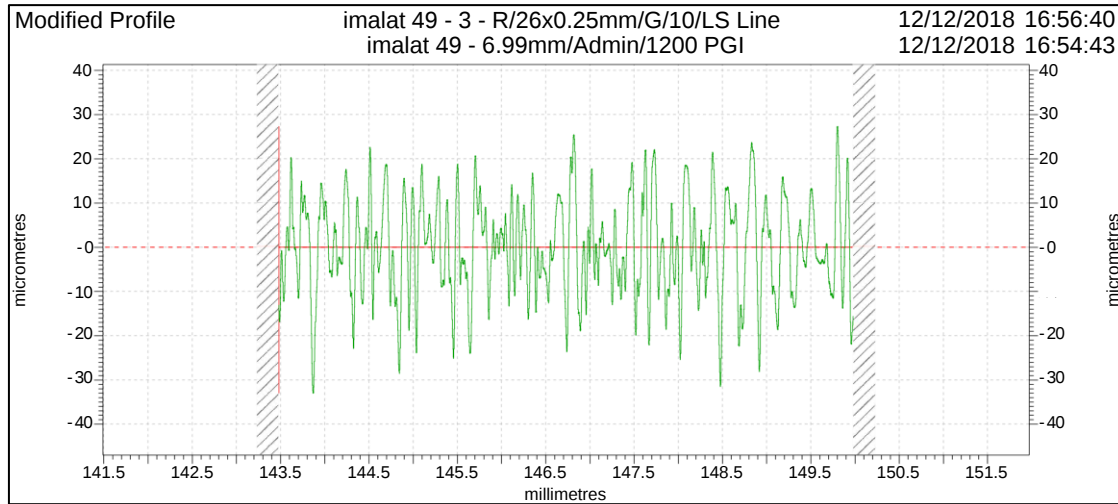


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

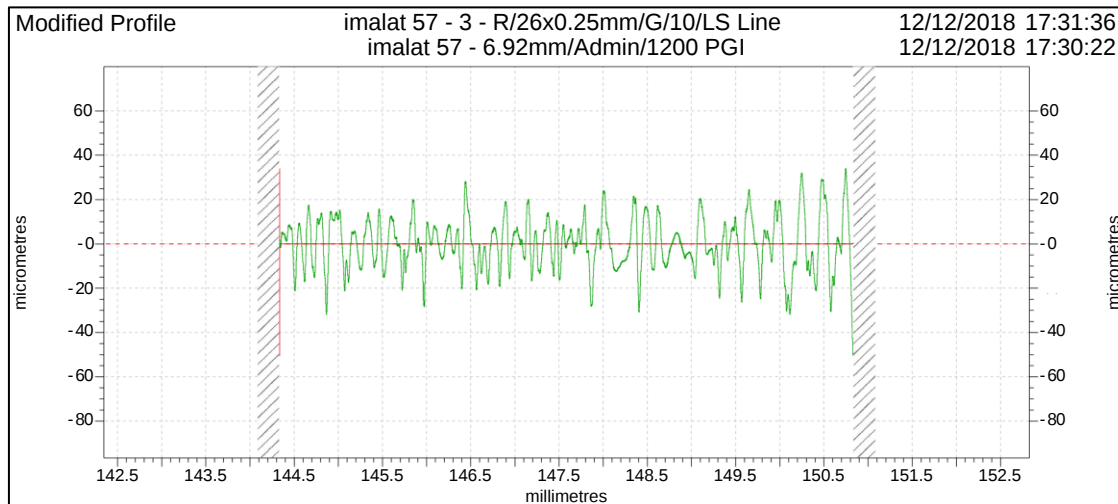
7 numaralı deney



8 numaralı deney

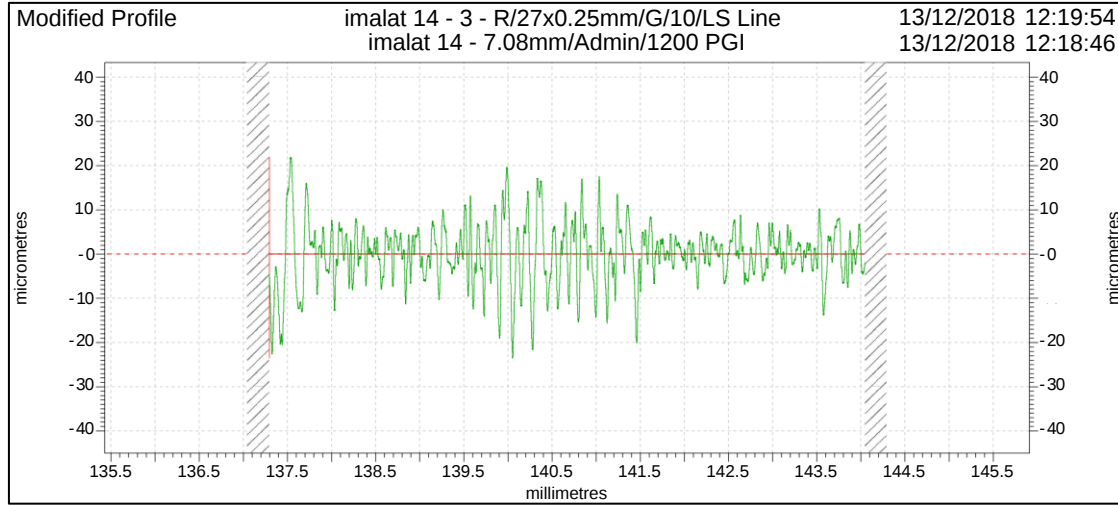


9 numaralı deney

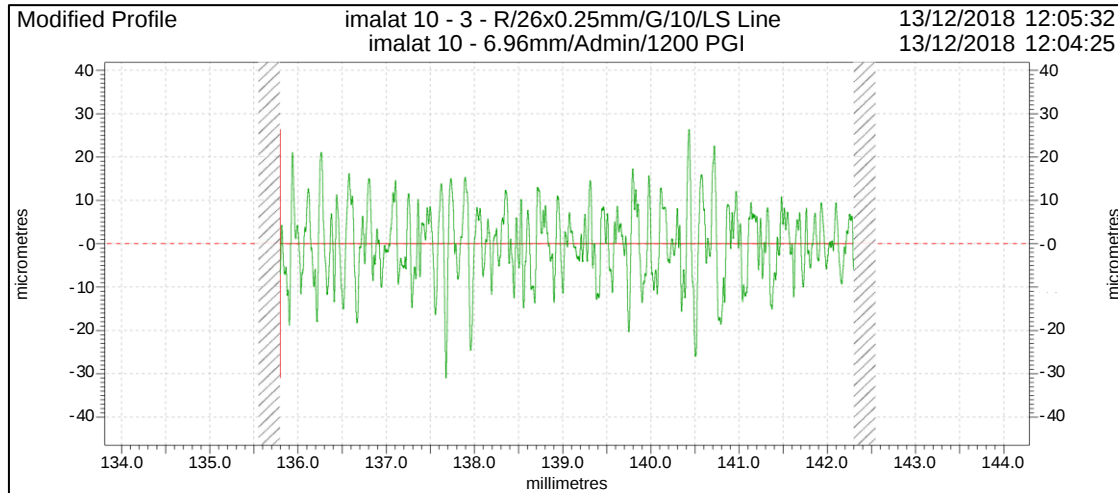


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

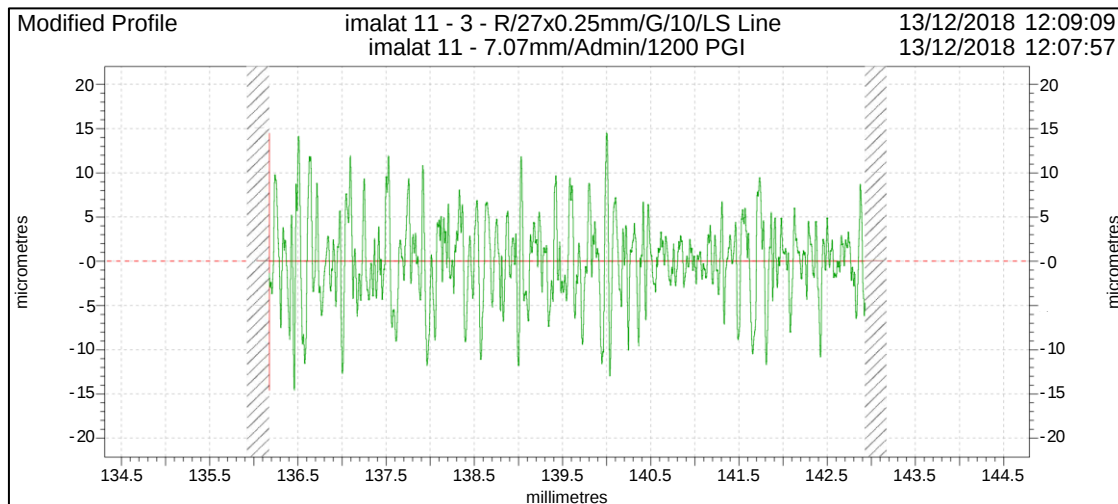
10 numaralı deney



11 numaralı deney

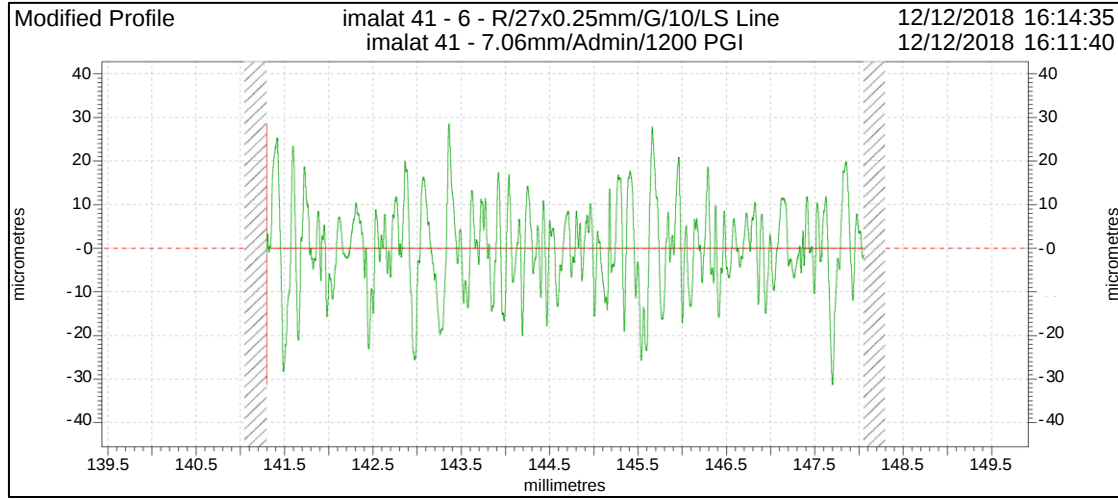


12 numaralı deney

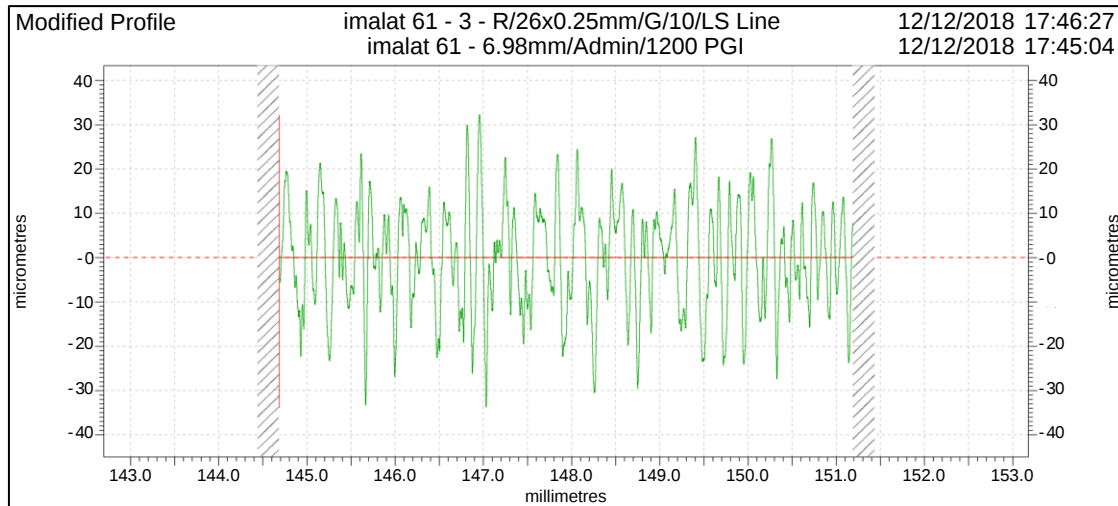


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

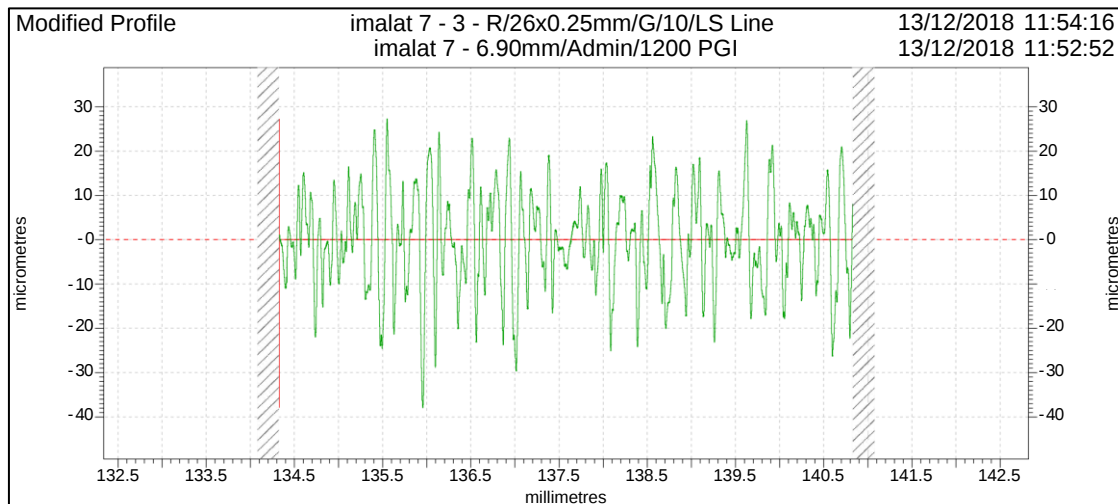
13 numaralı deney



14 numaralı deney

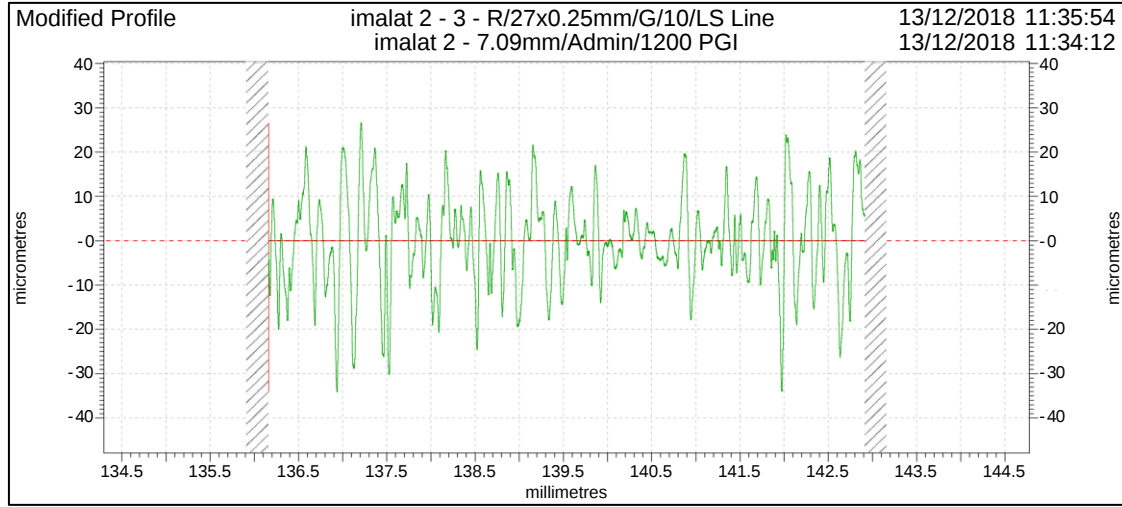


15 numaralı deney

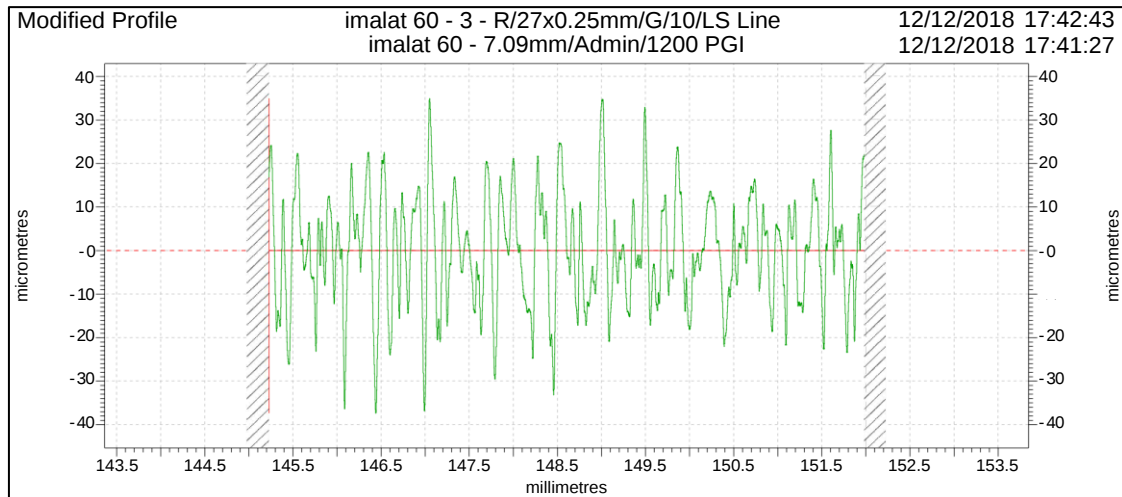


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

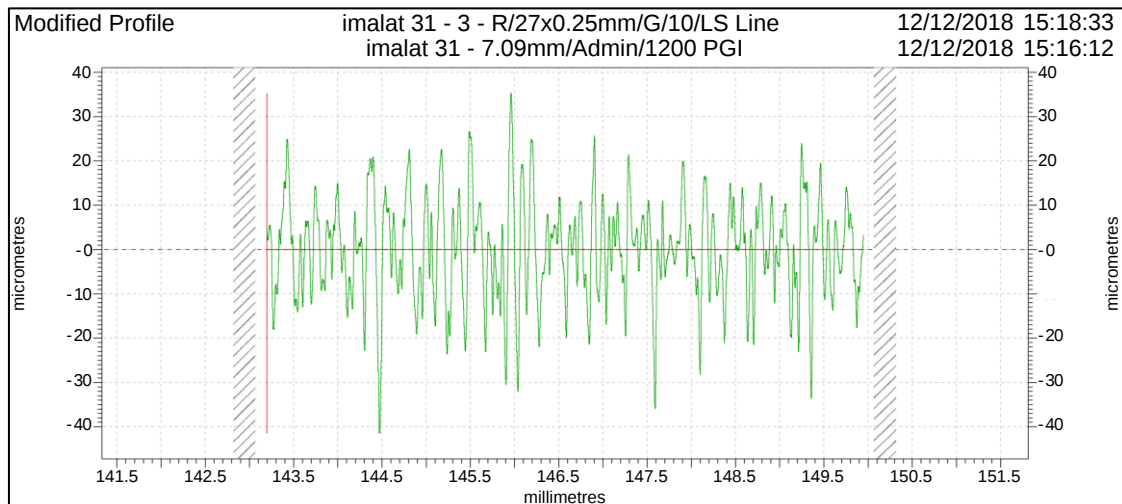
16 numaralı deney



17 numaralı deney

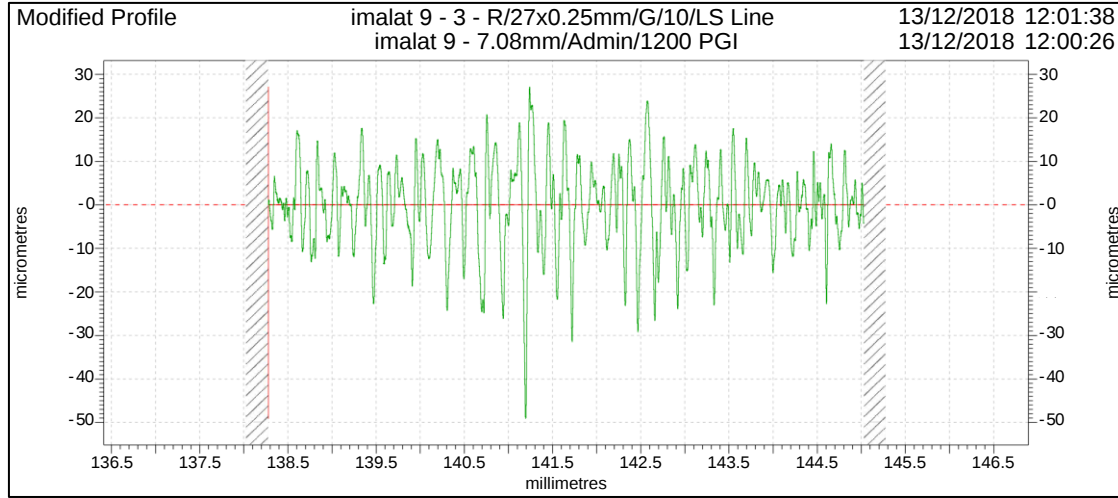


18 numaralı deney

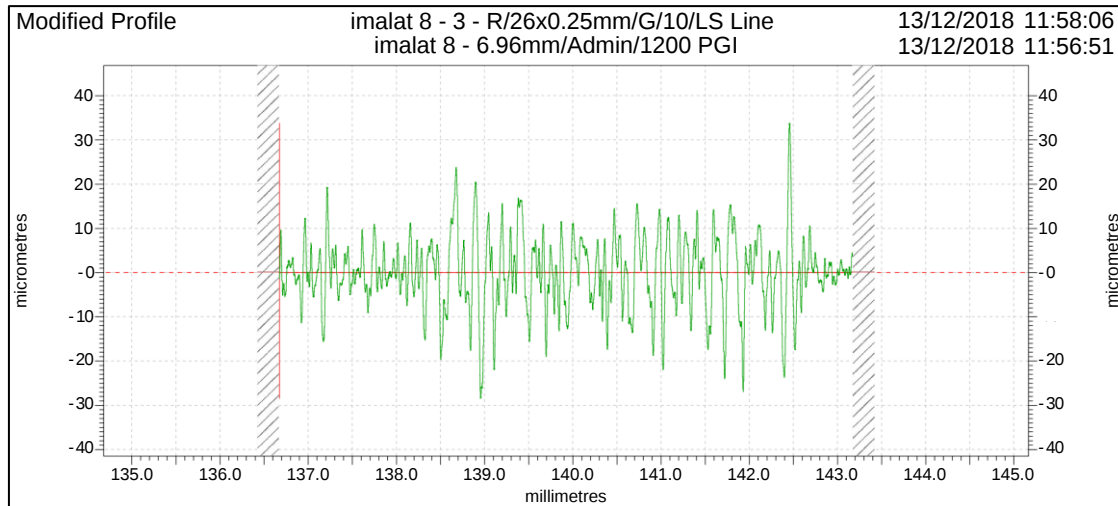


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

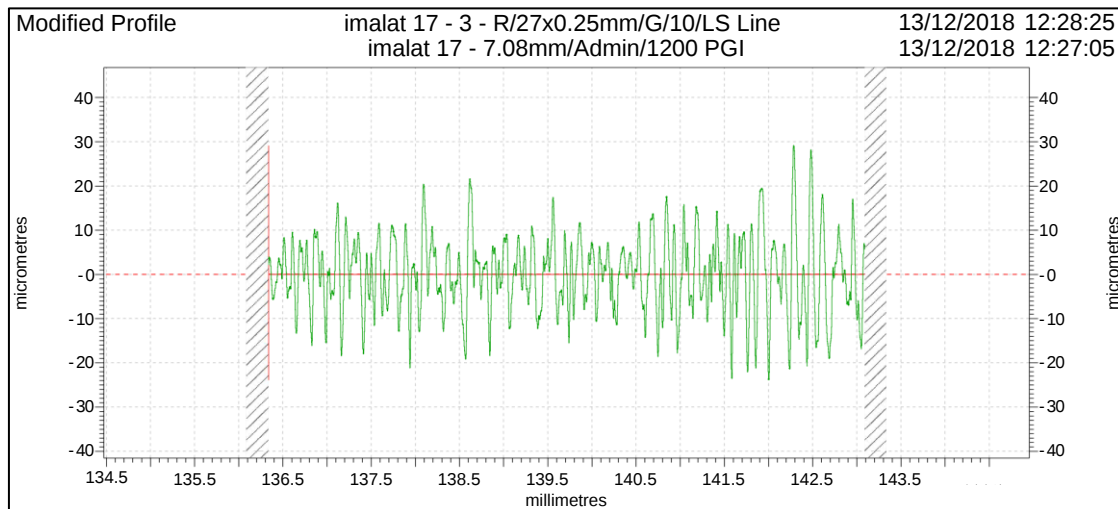
19 numaralı deney



20 numaralı deney

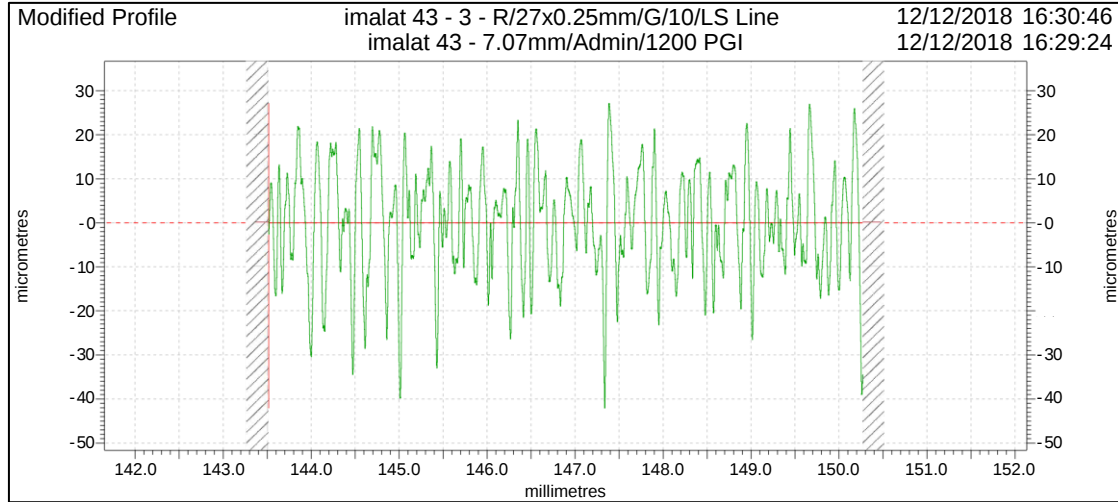


21 numaralı deney

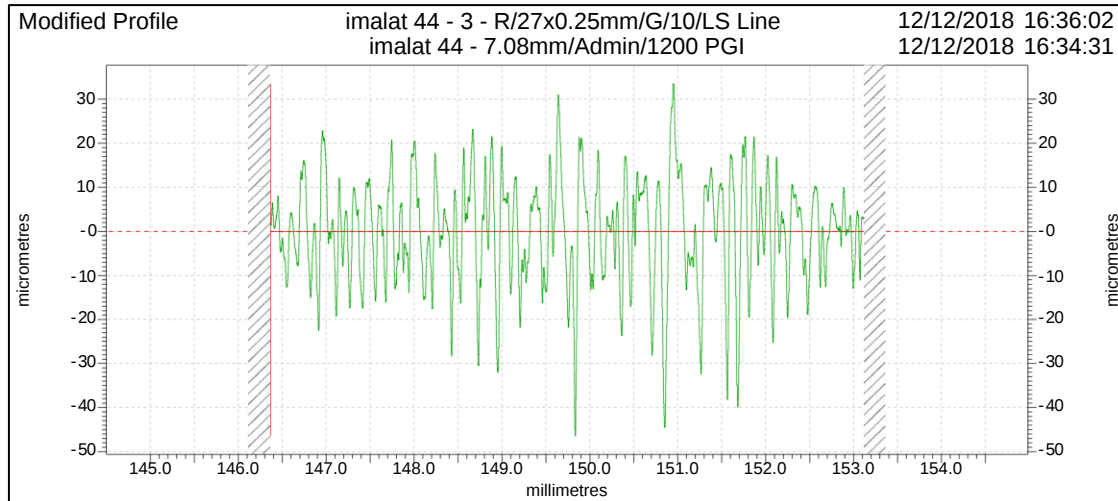


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

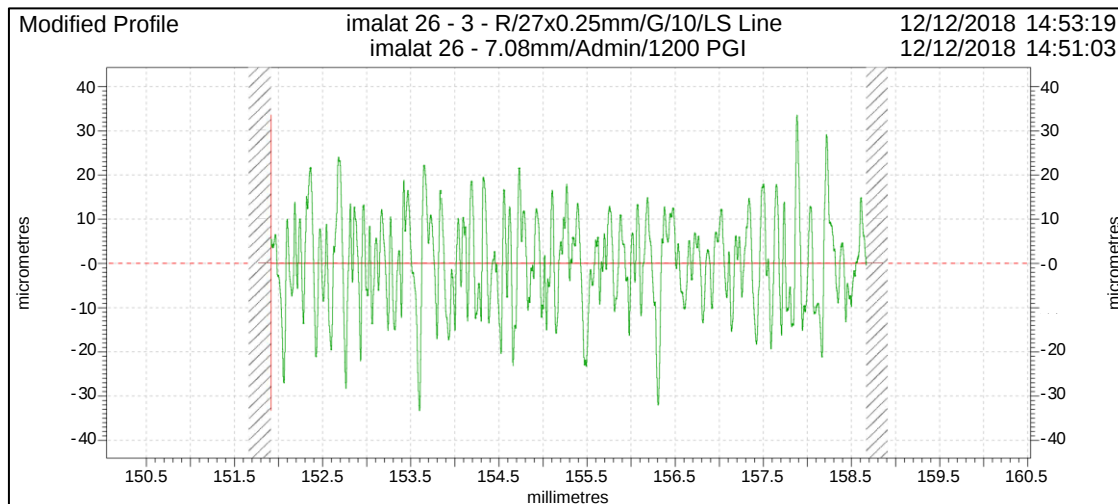
22 numaralı deney



23 numaralı deney

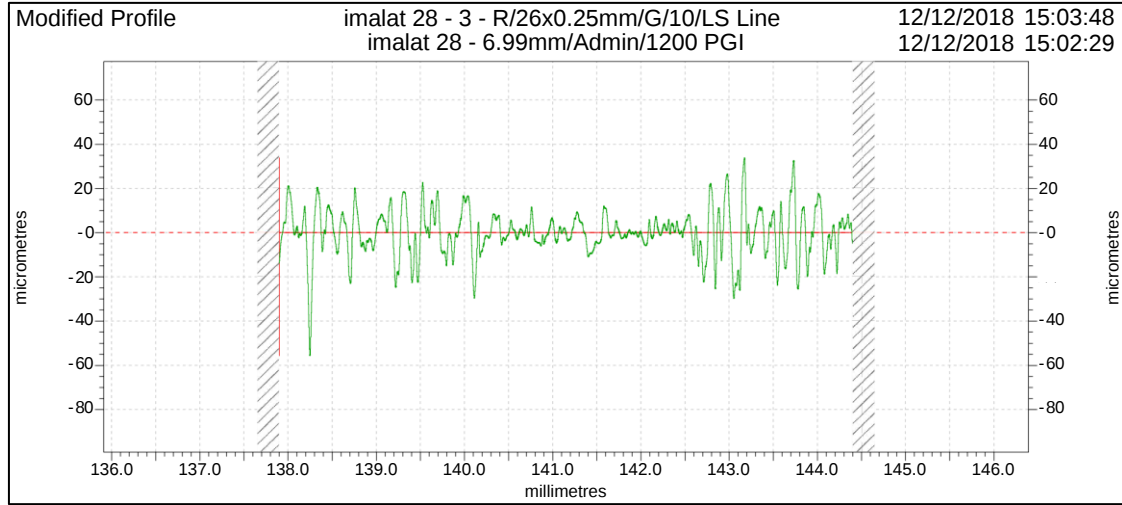


24 numaralı deney

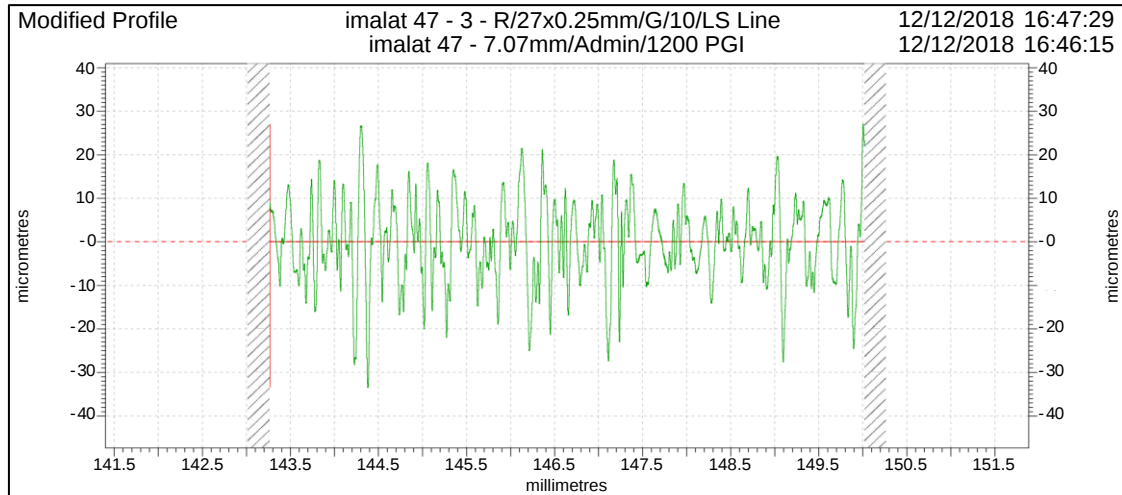


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

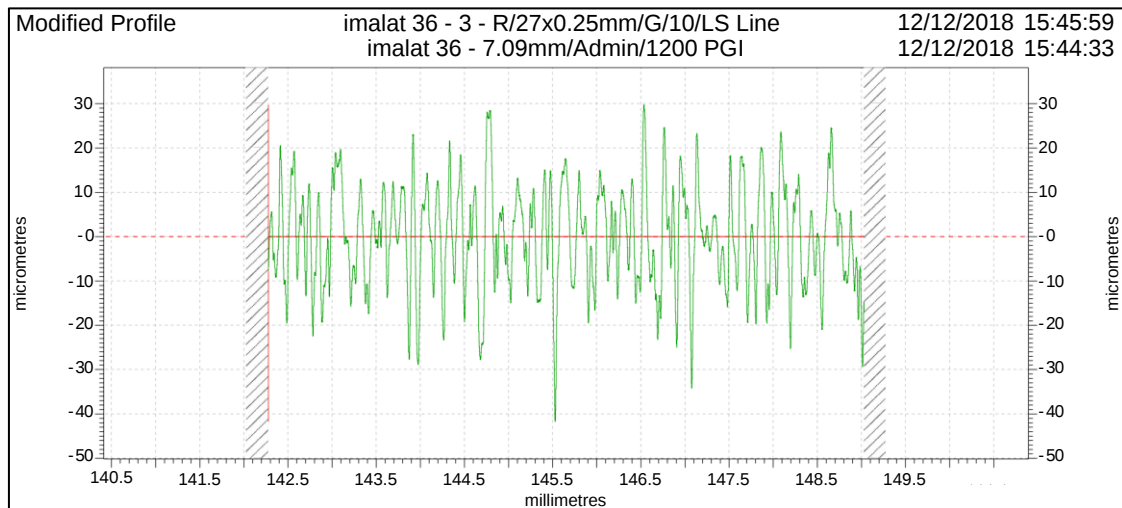
24 numaralı deney



25 numaralı deney

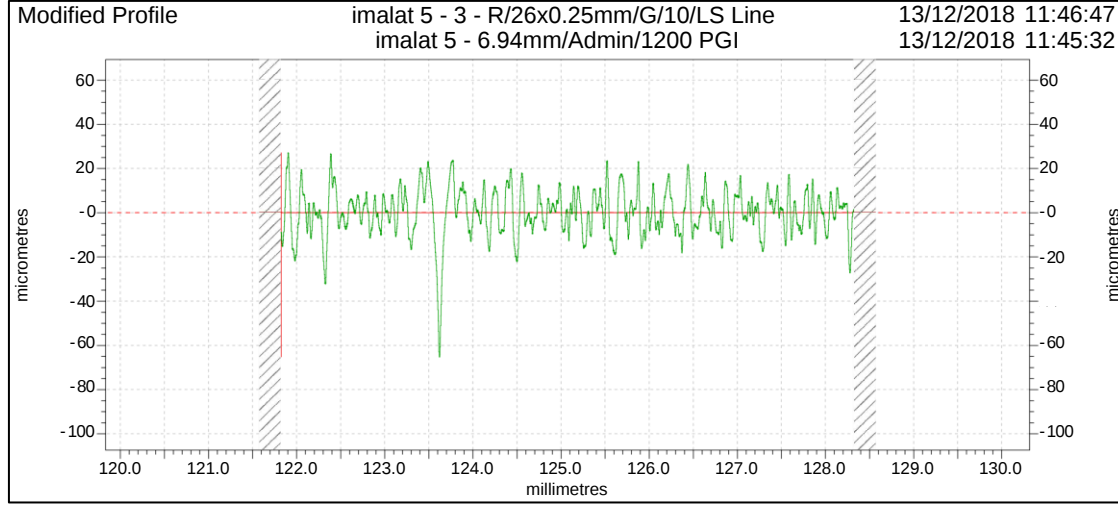


26 numaralı deney

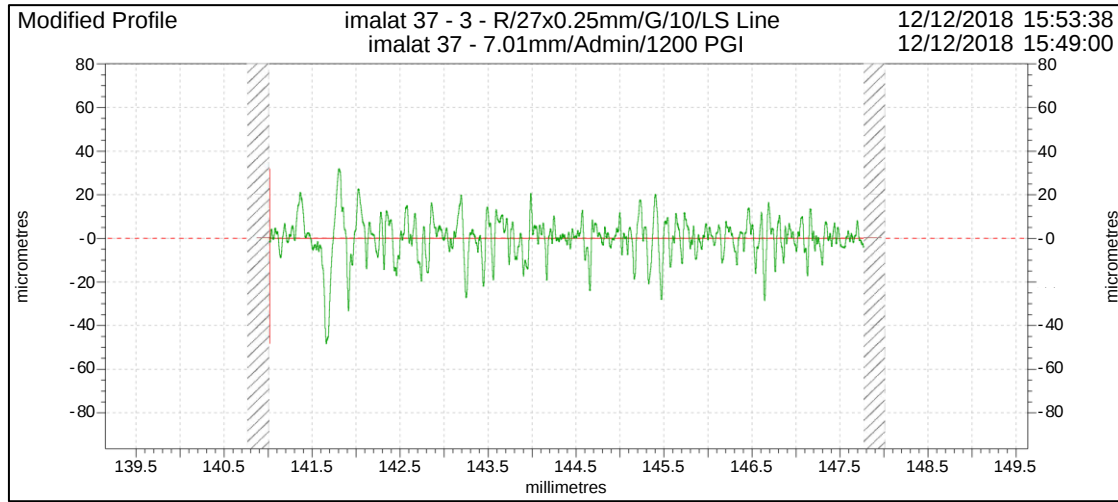


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

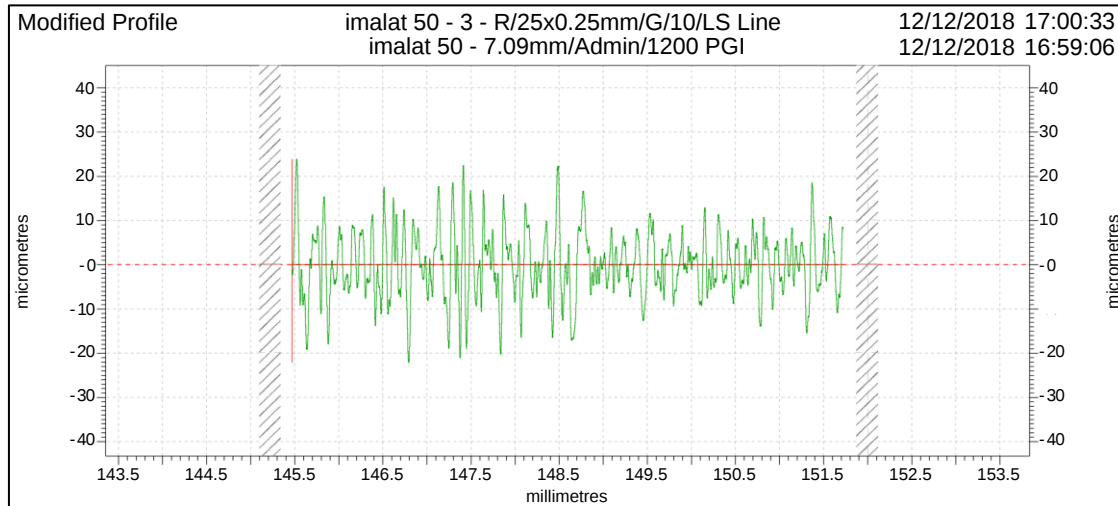
27 numaralı deney



28 numaralı deney

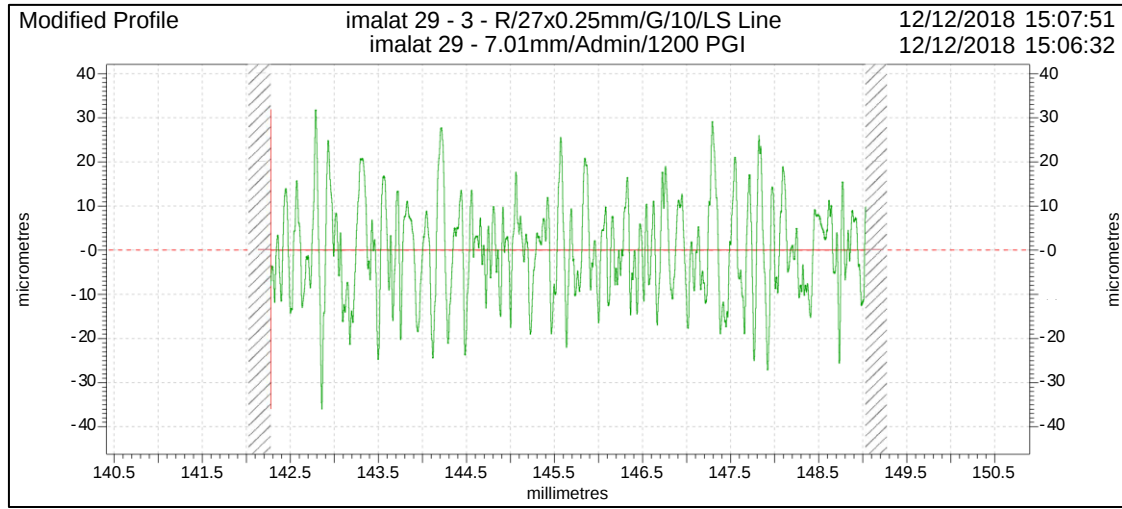


30 numaralı deney

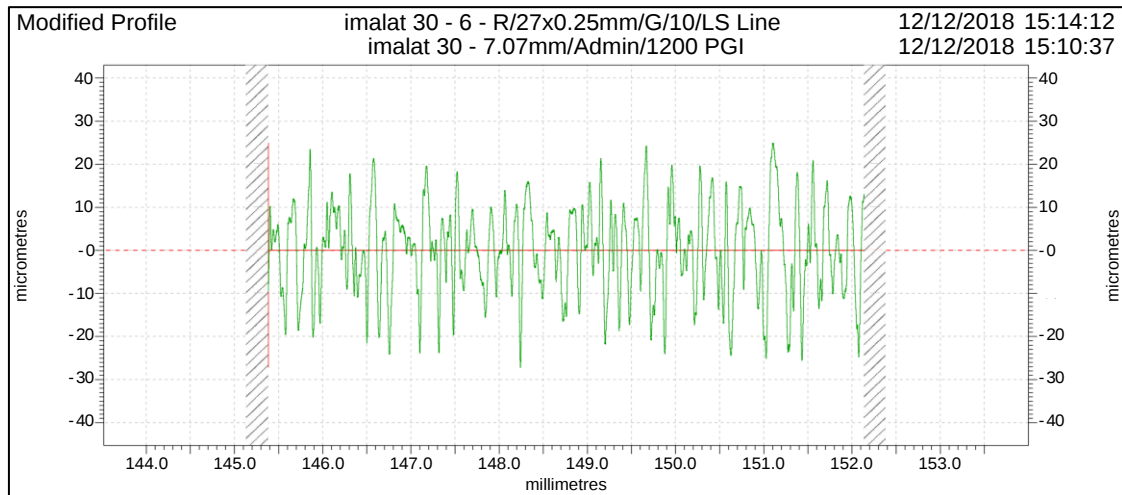


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

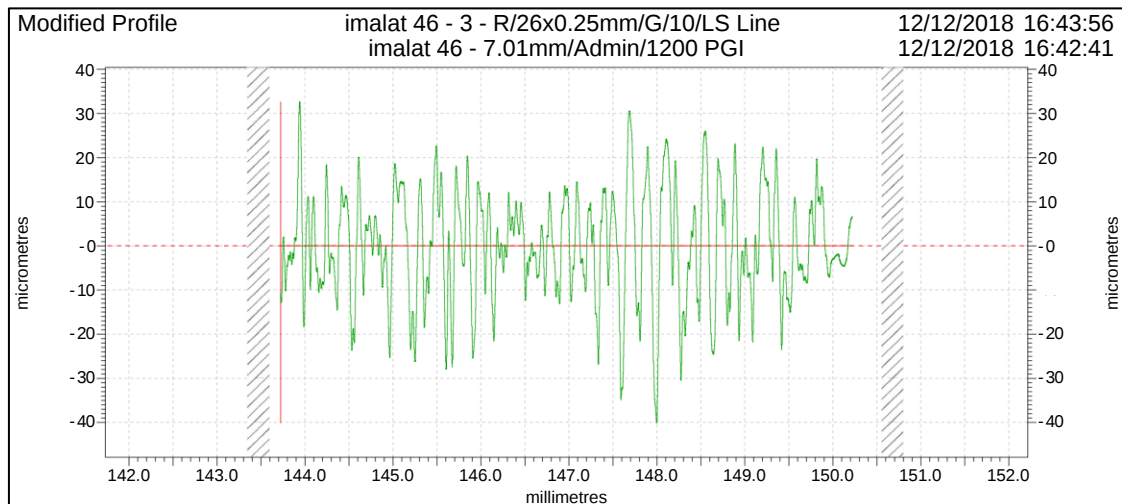
31 numaralı deney



32 numaralı deney

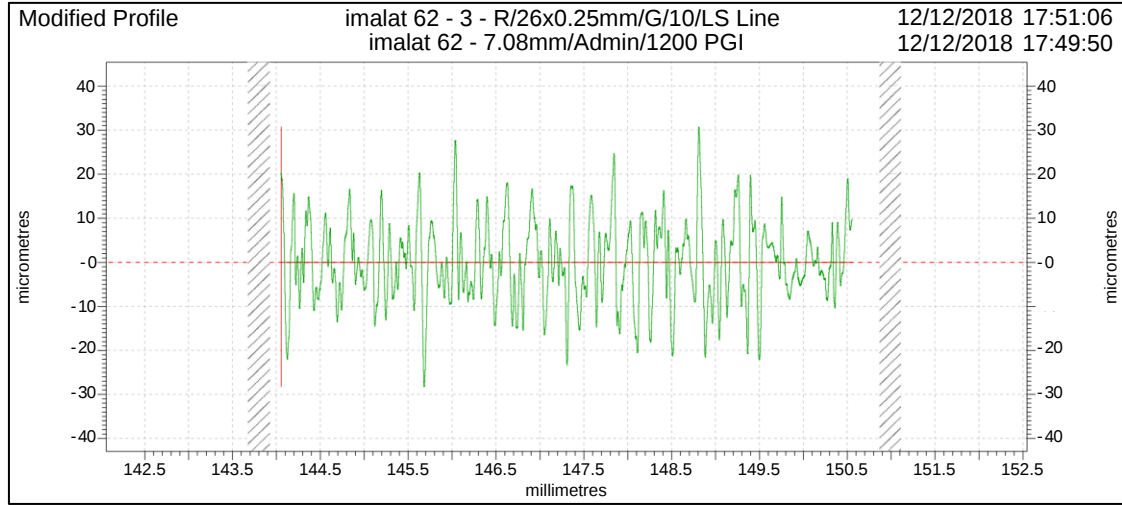


33 numaralı deney

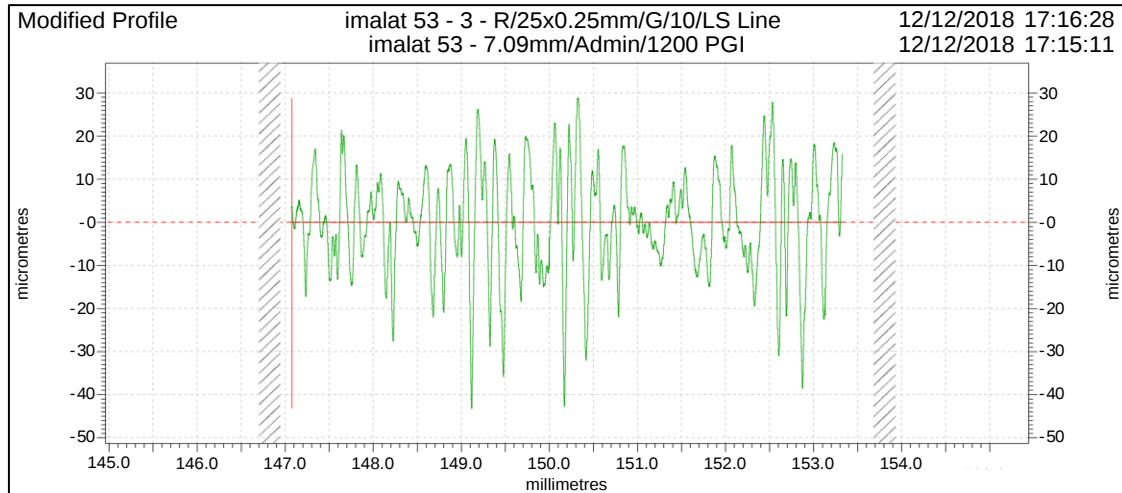


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

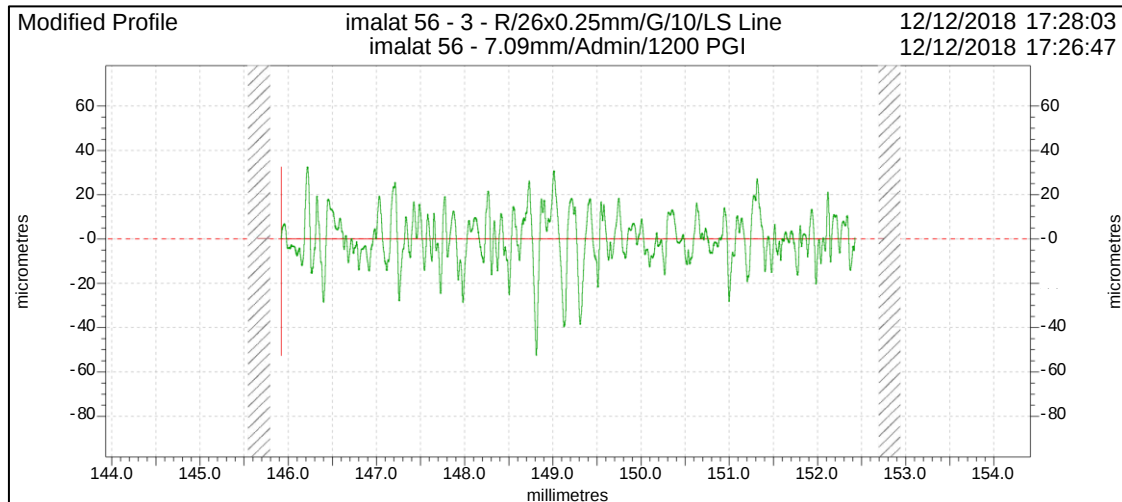
34 numaralı deney



35 numaralı deney

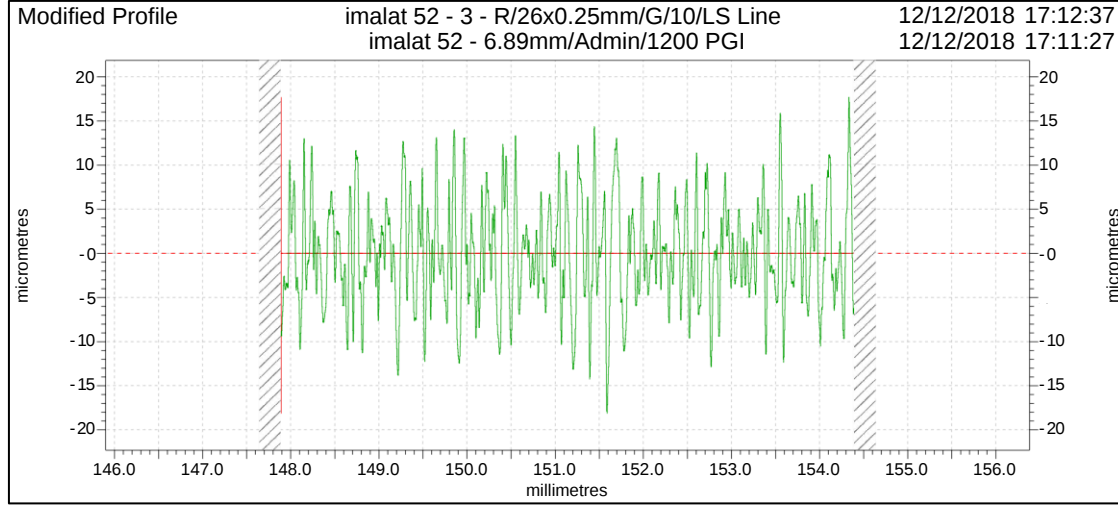


36 numaralı deney

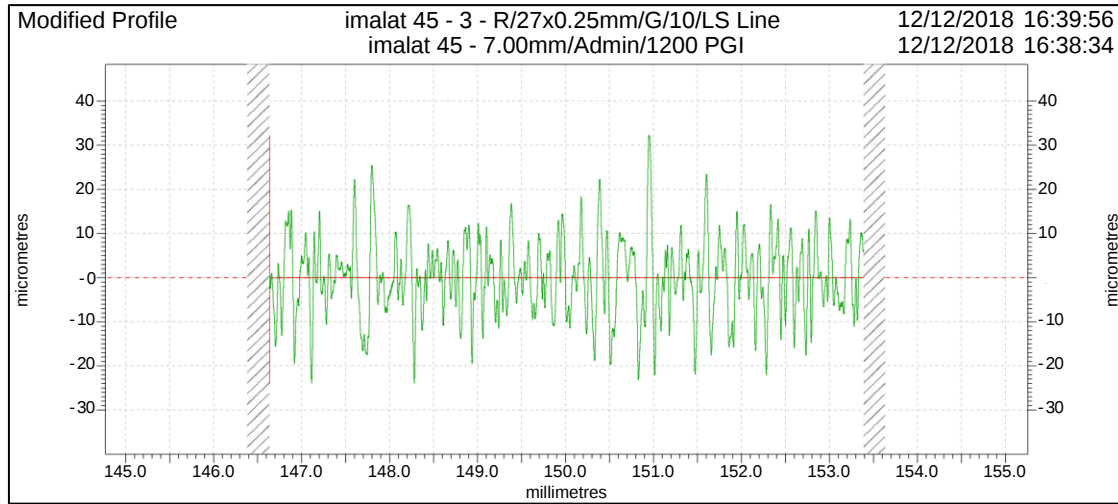


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

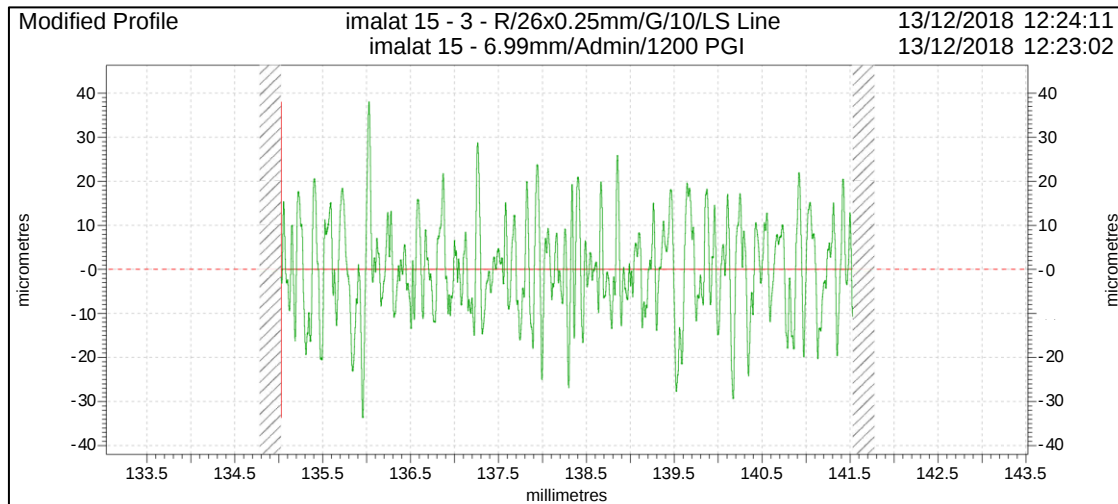
37 numaralı deney



38 numaralı deney

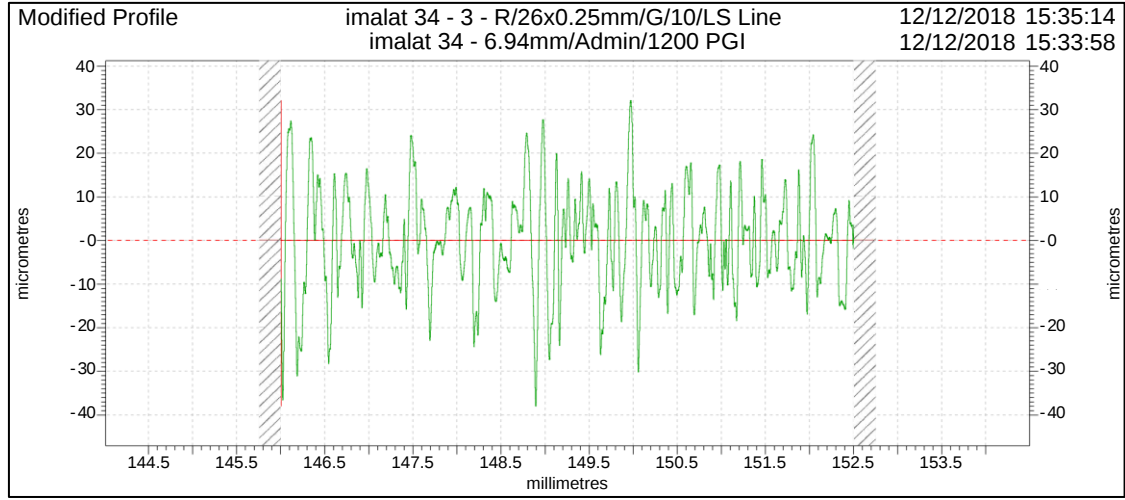


39 numaralı deney

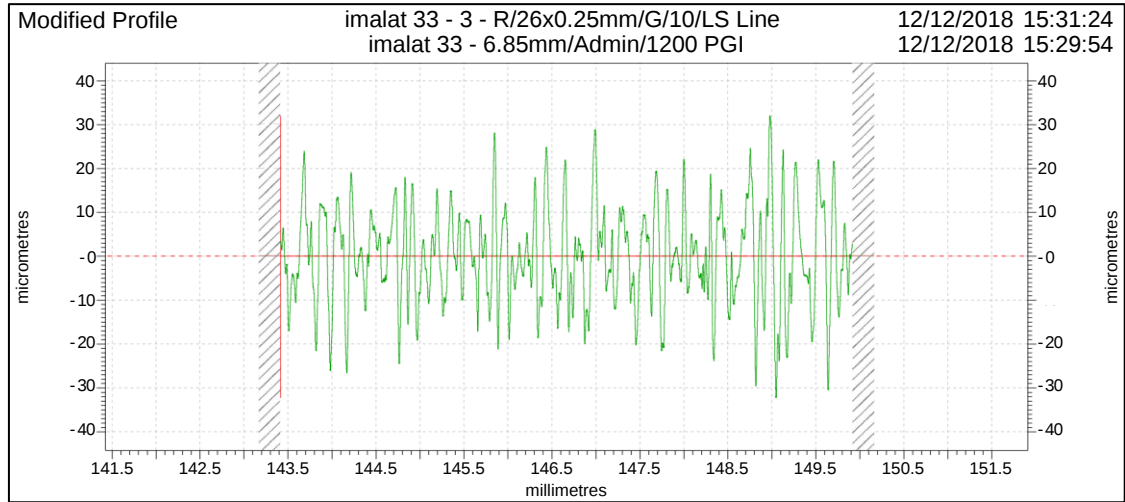


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

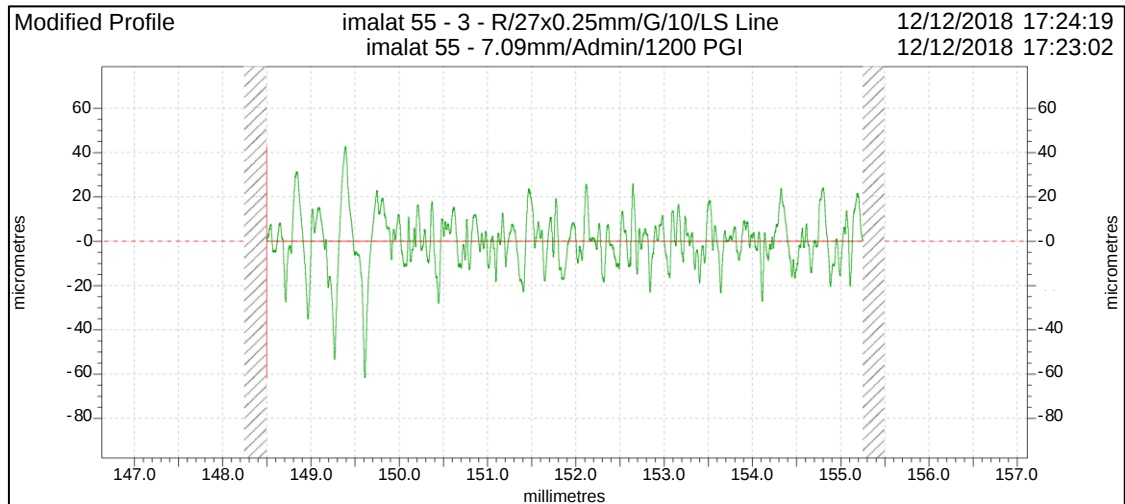
40 numaralı deney



41 numaralı deney

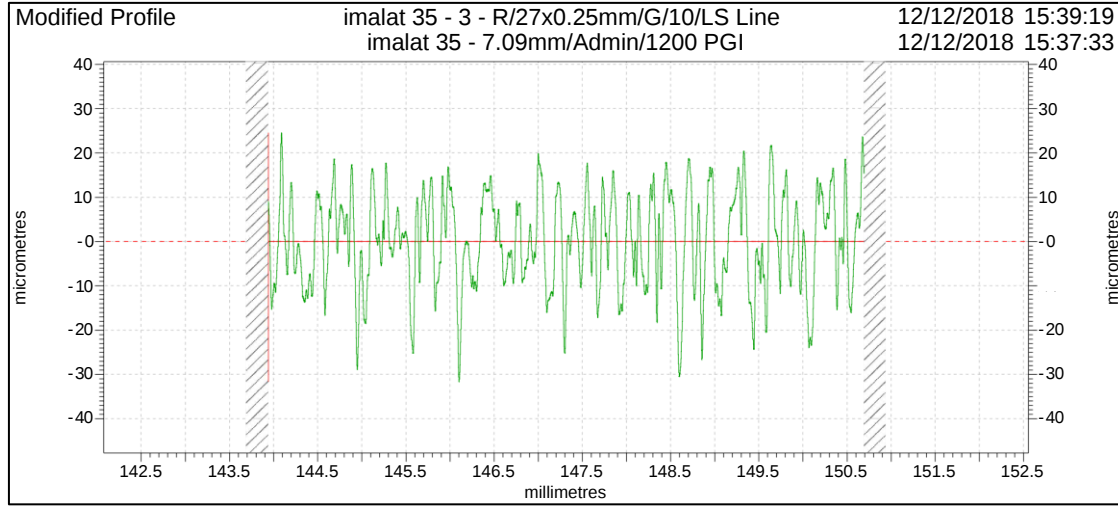


42 numaralı deney

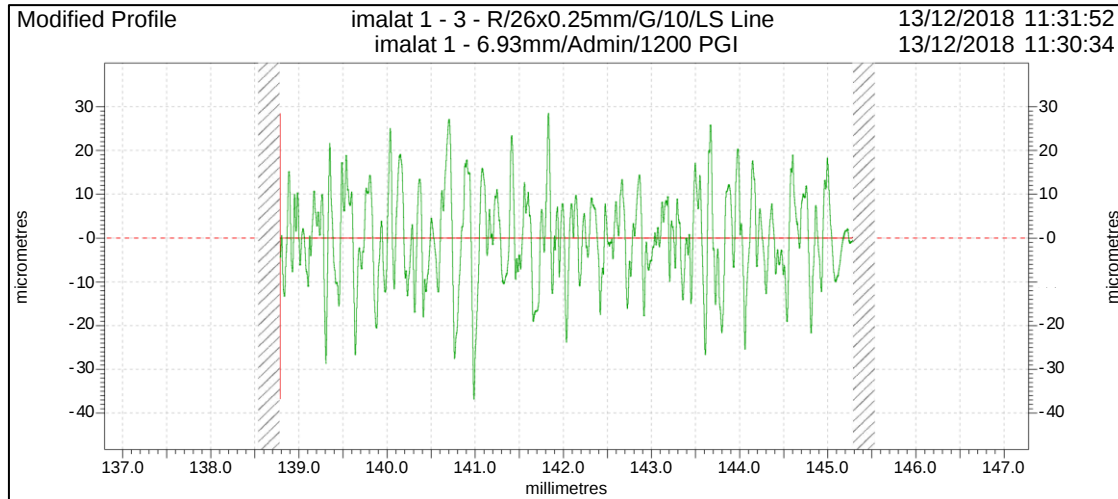


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

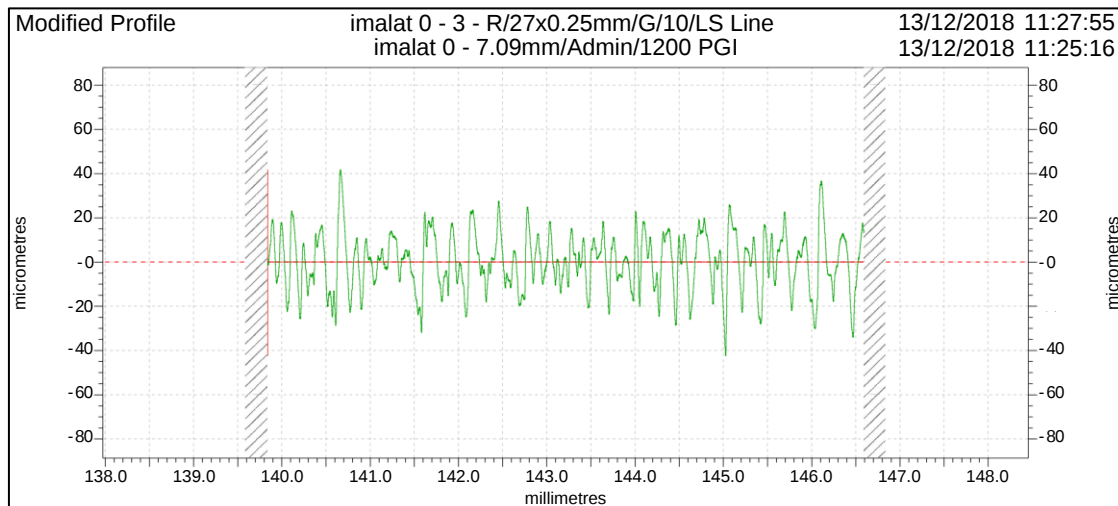
43 numaralı deney



44 numaralı deney

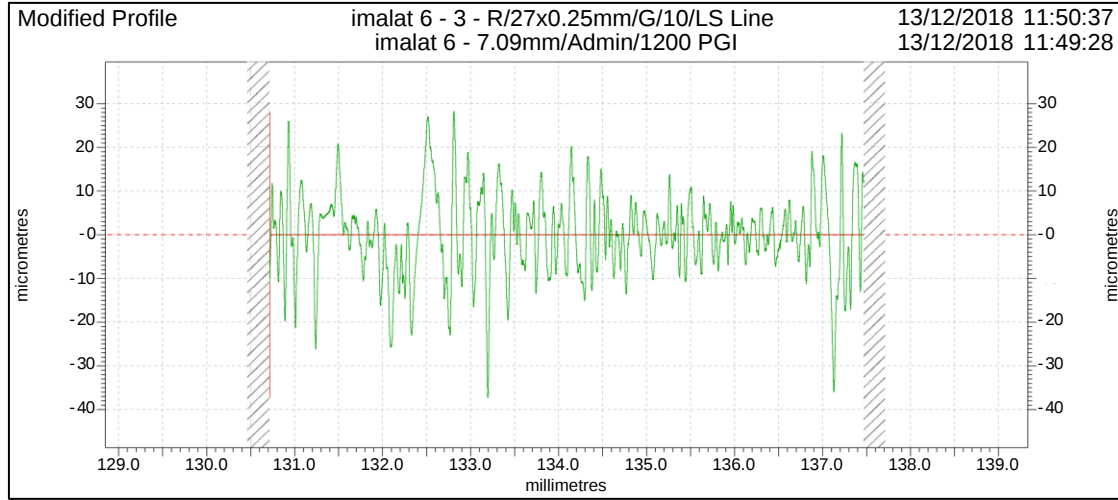


45 numaralı deney

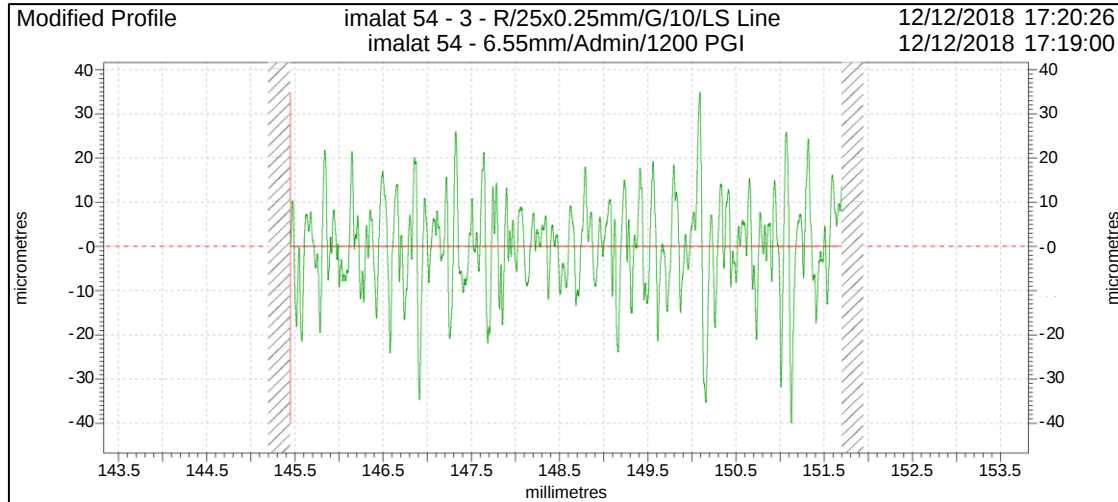


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

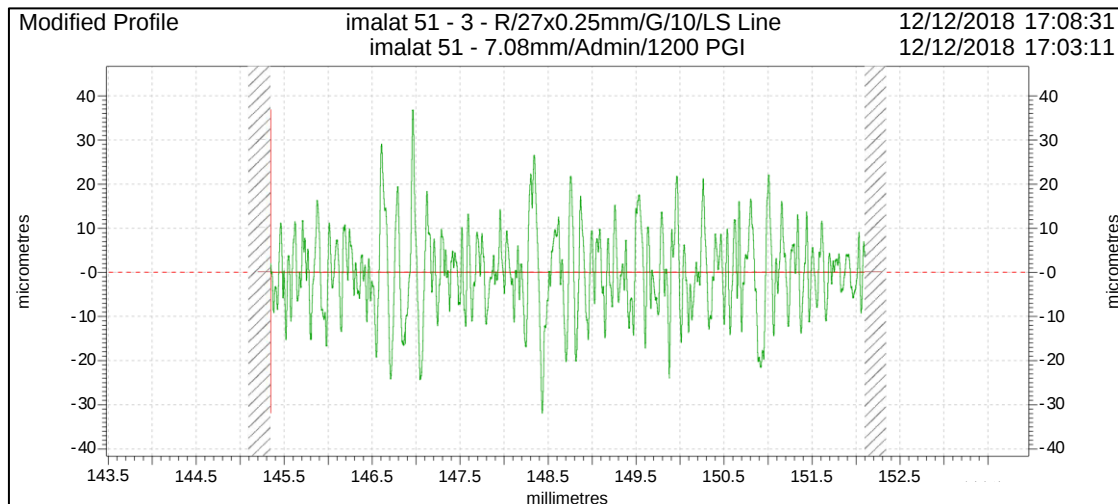
46 numaralı deney



47 numaralı deney

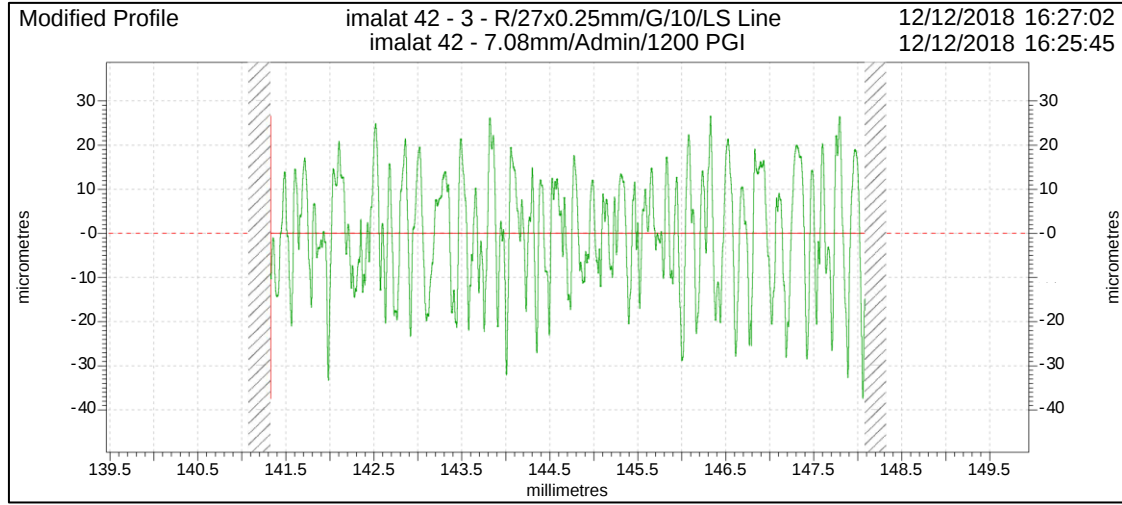


48 numaralı deney

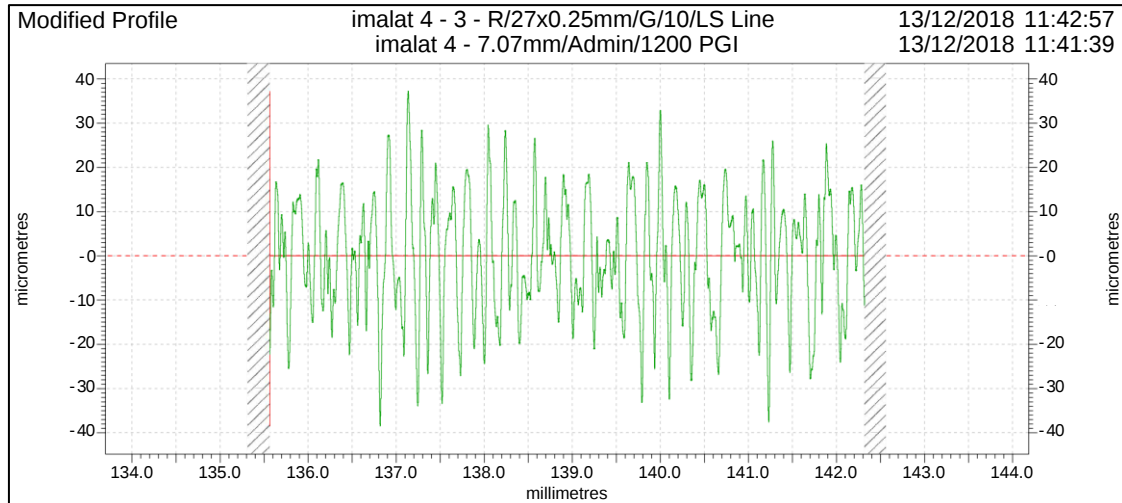


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

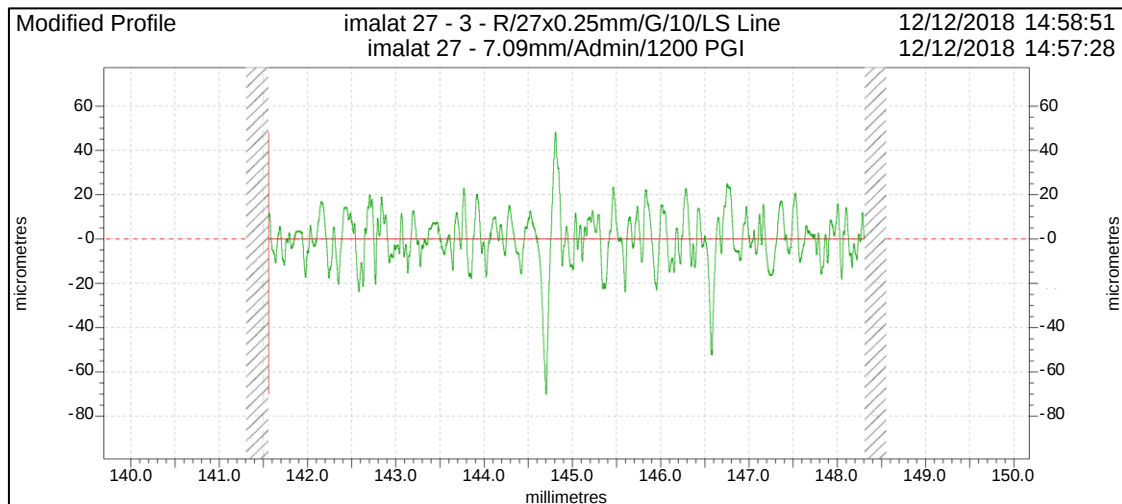
49 numaralı deney



50 numaralı deney

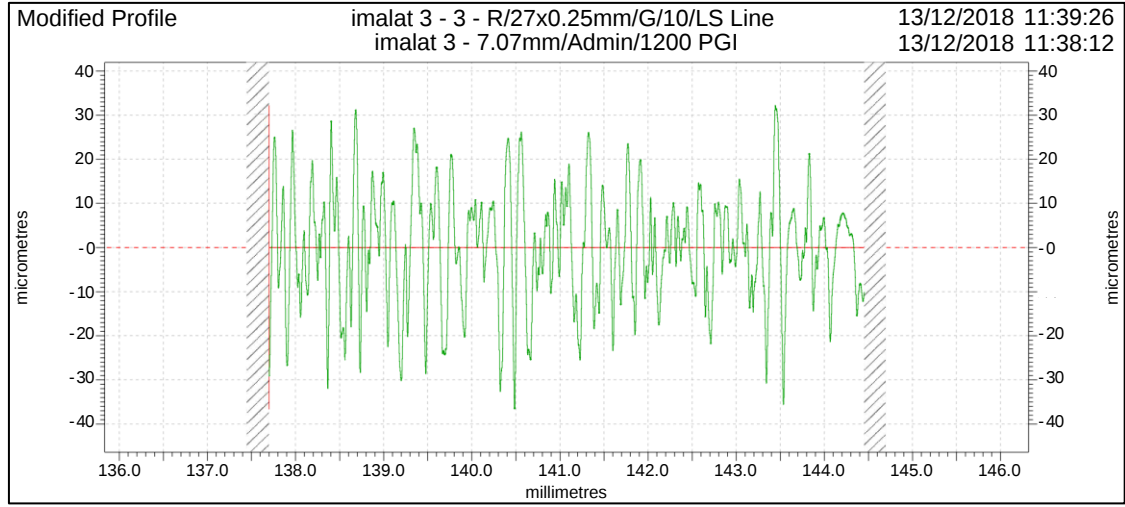


51 numaralı deney

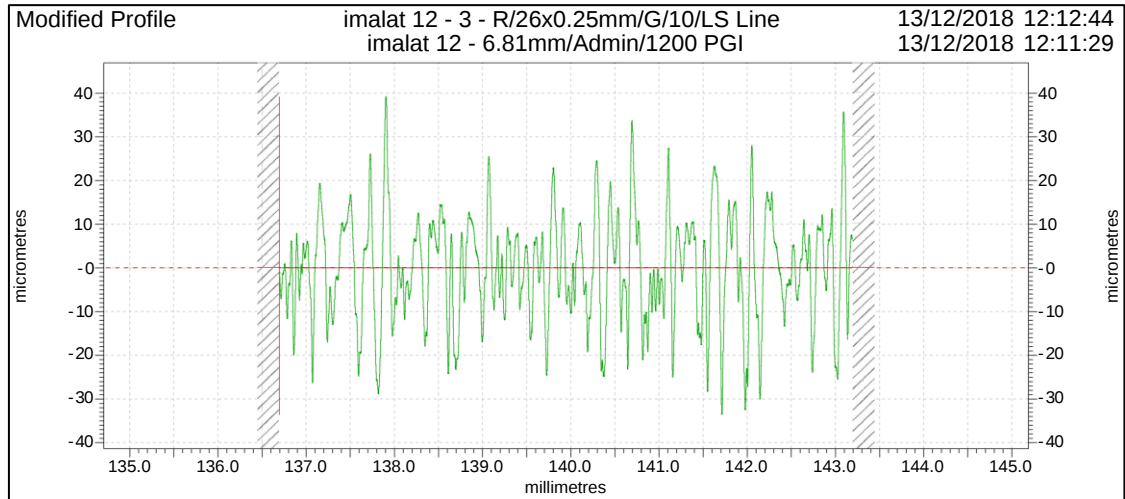


EK-1. (devam) Deneylerin yüzey pürüzlülüklerin grafikleri

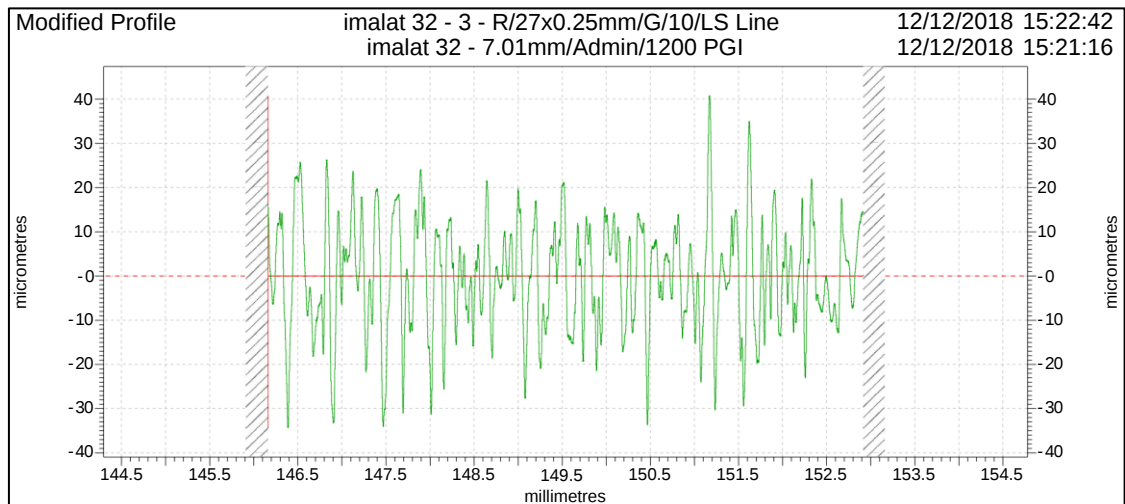
52 numaralı deney



53 numaralı deney

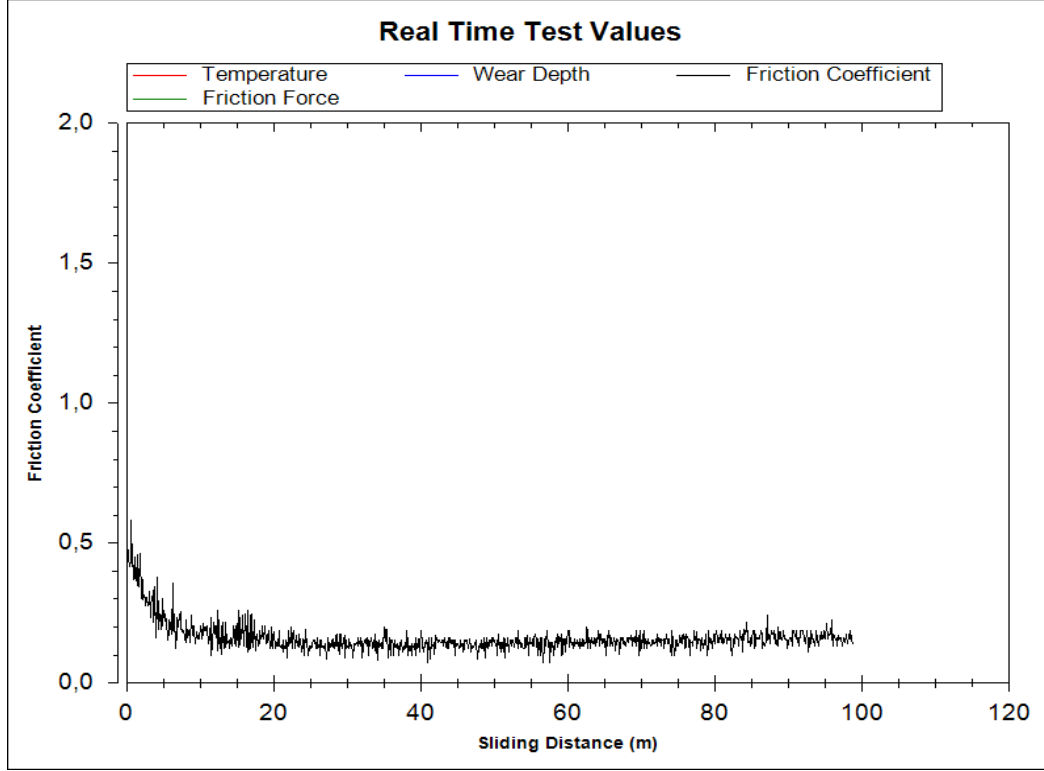


54 numaralı deney

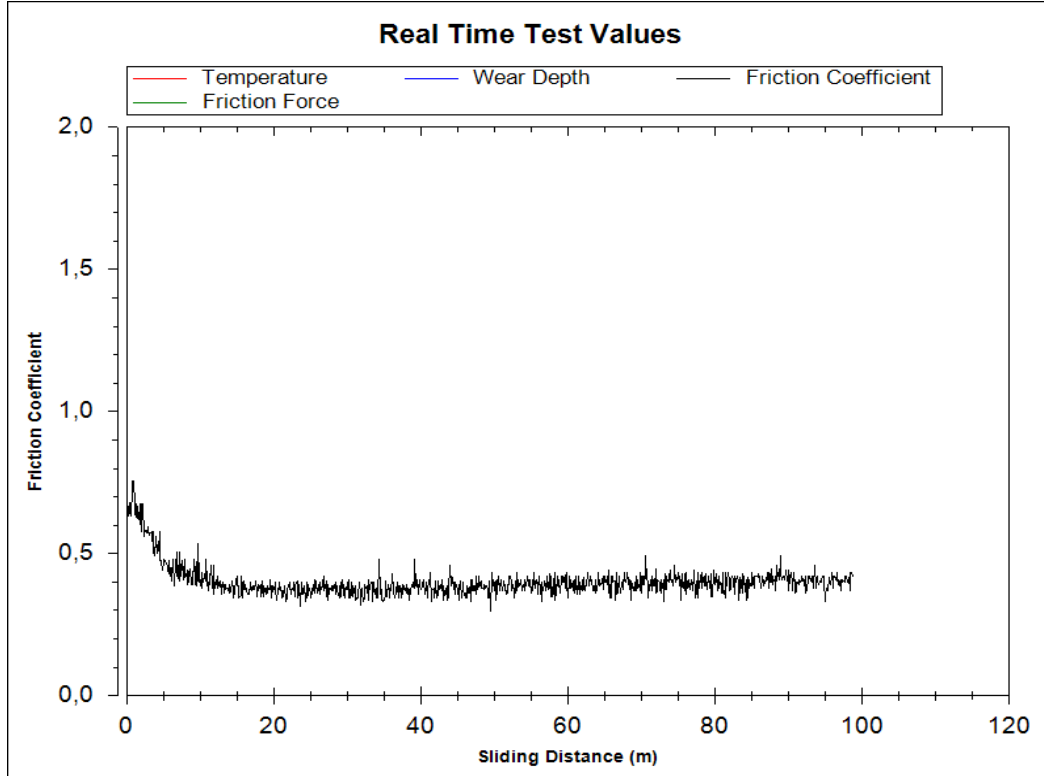


EK-2. Abrasive aşınma testinden elde edilen grafikler

T-H% 2 takviye hacim oranına sahip olan işparçanın aşınma eğrisi (1)

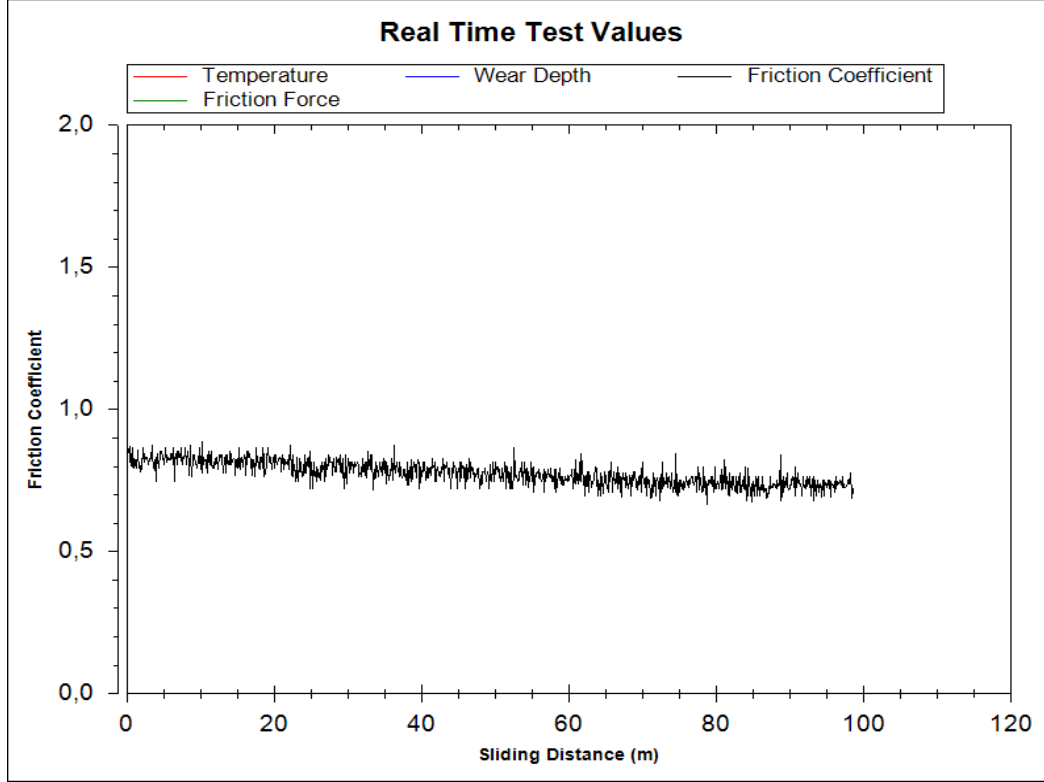


T-H% 4 takviye hacim oranına sahip olan işparçanın aşınma eğrisi (2)



EK-2. (devam) Abrasive aşınma testinden elde edilen grafikler

T-H% 4 takviye hacim oranına sahip olan işparçanın aşınma eğrisi (2)



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : JOUDİ, Javad
 Uyruğu : İRAN
 Doğum tarihi ve yeri : 28.05.1992, Tabriz
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (553) 151 96 80
 e-mail : javad.joudi1992@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	IAUT / Makine mühendisliği Mühendisliği	2014
Lise	Ferdosi Lisesi	2009

Yabancı Dil

İngilizce, Farsça, Azerice, Arapça

Yayınlar

1. Küçüktürk, G. Joudi, J. Çalın, R. Şeker, U. Gürün, H. Ahmadinia, O. F. (2018). Experimental Investigation of Machining Characteristics for Al 2014 Alloy Reinforced with TiB₂ Composites in Powder-Mixed EDM. *The 18th International Conference on Machine Design ve Production*, 112-125.
2. Küçüktürk, G. Ahmadinia, O. F. Çalın, R. Şeker, U. Kaya, D. Joudi, J. (2018). An Investigation of Material Removal Rate ve Tool Wear Rate in Powder Mixed EDM Machining Process of Al 2014 Alloy Reinforced with B₄C Composites. *The 18th International Conference on Machine Design ve Production*, 125-137.

Hobiler

Yüzme, Yürüyüş, Kitap okuma

DİZİN

A

Abstract · 25, 66, 68
Alıntılar · 14
Alt Bölümler · 10
APA · 35, 45
Araştırma · 30
Arial · 6

B

Bakınız · 23
Baskı · 36, 42
başlık · 10, 15, 20, 29, 31, 34, 40, 47
bölüm · 6, 31, 47

C

CD · 3
Cilt · 8

Ç

çizelge · 4, 19, 20, 21, 23, 25, 28, 47, 81
Çizelge · 9, 27, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77

D

Dipnot · 18
Dizin · 50
Doğrudan aktarma · 15
Dolaylı aktarma · 16

E

EKLER · 6, 20, 47, 49, 51, 69
Eşitlik · 20, 21
Etik · 9, 25

F

Format · 4, 5

formül · 20, 25

G

Giriş · 2, 4, 5, 9, 29, 31, 80
Görüntü · 4
grafik · 4, 20, 25

H

Harita · 9
Haritalar · 27

İ

İlk kontrol · 3
indis · 6
İspat · 11

K

Kabul ve Onay · 25
Kaynak · 11
Kenar Boşlukları · 7
Key Words · 25, 65, 66
Kılavuz · 1

L

Lemma · 11
literatür · 11, 14, 29

N

Numaralve ırılma · 9, 11, 20

O

Onay · 2, 9
Ondalık Sayılar · 19

Ö

Özet · 10, 25, 64, 68
Özgeçmiş · 10, 49, 69, 76

P

patent · 5
pdf · 1, 3, 4
program · 4, 47
punto · 6, 9, 10, 18, 24, 25, 26

R

Referans · 5, 18
resim · 2, 4, 20, 21, 28, 47
Resimle · 27
Resimlemelerin Açıklamaları · 21

S

savunma · 1
sembol · 25, 40
simge · 6, 25, 28
Simgeler ve kısaltmalar · 28, 75
Simgeler ve Kısaltmalar · 9, 19
Sonuç ve öneriler · 31

Ş

şekil · 4, 20, 21, 23, 25, 28, 47
Şekil · 27, 68, 71
Şekille · 9, 27

T

Tanım · 11, 19
Teşekkür · 9, 10, 26, 67, 68, 70, 71, 73, 74
Tetkik · 75
Times New Roman · 6

U

Unvan · 34

Y

yazar · 13, 14, 15, 16, 34, 38, 42



GAZİ GELECEKTİR..