



**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE ELEKTRO EREZYON İLE
İŞLEME PERFORMANSLARININ HİBRİT
TAKVİYELERLE GELİŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**2023
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa MUŞTU

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Bilge DEMİR
Doç. Dr. Fatih AYDIN**

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE
ELEKTRO EREZYON İLE İŞLEME PERFORMANSLARININ HİBRİT
TAKVİYELERLE GELİŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa MUŞTU

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Bilge DEMİR
Doç. Dr. Fatih AYDIN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2023**

Mustafa MUŞTU tarafından hazırlanan “MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ELEKTRO EREZYON İLE İŞLEME PERFORMANSLARININ HİBRİT TAKVİYELERLE GELİŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilge DEMİR
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Fatih AYDIN
Tez 2. Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 23/01/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SU)

Üye : Prof. Dr. Bilge DEMİR

Üye : Doç. Dr. Fatih AYDIN

Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBU)

Üye : Doç. Dr. M. Emre TURAN (KBU)

Üye : Doç. Dr. Hakan GÜRÜN (GU)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ELİTAŞ (BŞEU)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa MUŞTU

ÖZET

Doktora Tezi

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ELEKTRO EREZYON İLE İŞLEME PERFORMANSLARININ HİBRİT TAKVİYELERLE GELİŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Mustafa MUŞTU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

Doç. Dr. Fatih AYDIN

Ocak 2023, 195 sayfa

Bu çalışmada, matris olarak AZ61 ve ZK60 olmak üzere 2 farklı magnezyum alaşımı, mikron TiB_2 (%15) ve nano Grafen (GNP) (%0,5) takviye kullanılarak, T/M sıcak presleme ile üretilmiştir. Üretilen Magnezyum matrisli metal kompozitlerin mekanik, aşınma ve elektro erezyon işlemesi (EEİ) ile işleme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, ANOVA, Taguchi, regresyon analizleri ile işleme parametreleri ve deneysel sonuçlara ait veriler analiz edilerek işleme etkilerini tahmin etmek için kullanılabilirliği araştırılmıştır. T/M metal (AZ61, ZK60) ve kompozit numunelerin (ZK60-AZ61+ TiB_2 (%15 ağı.) ve ZK60-AZ61+ TiB_2 (%15 ağı.) +GNP (%0,5 ağı.) imalatında mekanik alaşımlama, atmosfer kontrollü sıcak presleme ve sinterleme sistematığı takip edilmiştir. Üretilen bu T/M numuneler malzeme karakterizasyon işlemleri (Yoğunluk ölçümü, mikroyapı incelemesi (SEM-EDS)) ile tanımlanmıştır. Ayrıca aşınma, basma

ve sertlik ölçüm testlerine tabi tutulmuştur. Aşınma testleri 10N, 20N, 40N yük ve 200 m yol şartları altında yapılmıştır. Basma testleri ZK60 alaşımlı numuneler için oda sıcaklığında, AZ61 alaşımlı numuneler için ise oda sıcaklığına ilave olarak 100 ve 200°C’de de uygulanmıştır. Numunelerin aşınma ve basma davranışları; aşınma, basma-kırılma yüzeyi, kesitlerin görüntü ve kimyasal analizleri SEM-EDS, XRD ile gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, TiB₂ partiküllerinin AZ61 ve ZK60 matrislerinde homojen olarak dağıldığını, bununla birlikte GNP'lerin topaklanmalarının tamamen çözülmediğini, takviye ile yoğunluk ve mekanik özelliklerin önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Her iki grup alaşım için bağıl yoğunluklar büyükten küçüğe sırasıyla A1-K1, A3-K3 ve A2-K2 şeklindedir. Genel olarak takviyelerin, bağıl yoğunluğun düşmesine sebep olduğu anlaşılmaktadır. Her iki grup için en iyi sertlik, aşınma ve basma sonuçları sırasıyla (ağırlıkça) %15 TiB₂, %15 TiB₂ + 0,5 GNP ve en düşük katkısız alaşım numunelerinde elde edilmiştir. Aşınma testlerinde genel olarak düşük yüklerde abrasif aşınma ve yüksek yüklerde delaminasyon aşınma davranışları gözlenmiştir. AZ61 matrisli numuneler arasında, oda ve yüksek sıcaklıklar için basma dayanım değerleri en yüksekten düşüğe sırasıyla; A2, A3 ve A1 numunelerinde elde edilmiştir. ZK60 matrisli numuneler arasında ise, oda sıcaklığında basma dayanım değerleri en yüksekten düşüğe sırasıyla; K2, K3 ve K1 numunelerinde elde edilmiştir. Kırılma yüzey incelemeleri, mekanizmanın ayrılma kırılması olduğunu ve yüzeyde çatlak oluşumlarının mevcut olduğunu göstermiştir.

T/M numunelerin TKEEİ işlem parametreleri, yüzey kalitesi ve MRR (Malzeme işleme hızı) ölçüm verileri değerlendirilerek, TKEEİ ile işlenebilme performansı araştırılmıştır. Artan TKEEİ akım ve vuruş süresi değerleri, yüzey beyaz tabaka kalınlığını, Yüzey Pürüzlülüğü'nü (YP) ve MRR'yi etkilemiştir. İşlenmiş yüzey tabakasının (beyaz tabaka) kimyasal bileşimi, işleme ile bir miktar değişmektedir. Sonuçlar, TKEEİ'nin yüzeyde işleme parametreleriyle doğru orantılı olarak bir erime ve katılma tabakası, yani beyaz tabaka (BT) ve geçiş bölgesi ürettiğini göstermiştir. BT ve geçiş bölgesinin ana metal ile bütünlüğü mevcuttur. İşlenmiş yüzey ve kesit incelemelerinde volkanik kraterler, delikler, çatlaklar, ergimiş metalle kaplı kalıntılar ve takviye elemanları gözlenmiştir. Kerosen ile üretilen ısı arasındaki etkileşim

sonucunda, işlenmiş yüzeyde TKEEİ parametrelerinin miktarı ile orantılı olarak değişen yüksek miktarda oksijen tespit edilmiştir. Ayrıca, ANOVA sonuçlarında, AZ61 matrisli malzemelerde YP'ye %65.46 ile vurum süresi en yüksek katkıyı sağlarken, ZK60 matrisli malzemelerde YP'ye %87,58 ile yine vurum süresi en yüksek katkıyı sağlamıştır. MRR'ye AZ61 matrisli malzemelerde %45,79 ile en yüksek katkıyı malzeme çeşidinin yaptığı tespit edilirken, ZK60 matrisli malzemelerde %21.85 ile vurum süresi en yüksek katkıyı yapmıştır. Regresyon modellerinde, YP ve MRR'nin tahmini için belirleme (güvenilirlik) katsayısı sırasıyla AZ61 için 0,98-0,85 iken, ZK60 için 0.92-0,83 olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar, TKEEİ deneysel ve optimizasyon (ANOVA, Taguchi ve regresyon analizleri) verilerinin uyumluluğunu göstermiştir. Genellikle artan TKEEİ akımı ve vurum süresi, beyaz tabaka kalınlığını, YP'yi ve MRR'yi arttırmıştır.

Anahtar Sözcükler : AZ61, ZK60, Magnezyum matrisli kompozitler, TiB₂, Grafen, TKEEİ, Yüzey kalitesi, MRR

Bilim Kodu : 9141

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE IMPROVEMENT THE MECHANICAL PROPERTIES AND THE ELECTRO EROSION MACHINING PERFORMANCES OF MAGNESIUM ALLOYS WITH HYBRID REINFORCEMENTS

Mustafa MUŞTU

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

Assoc. Prof. Dr. Fatih AYDIN

January 2023, 195 pages

In this study, 2 different magnesium alloys, AZ61 and ZK60 were produced by P/M hot pressing using micron TiB_2 (15%wt.) and nano Graphene (GNP) (0.5%wt.) reinforcement. The mechanical and wear performances of the produced magnesium matrix metal composites and the processing properties by electro discharge machining (EDM) were investigated. In addition, ANOVA, Taguchi, regression analyzes and processing parameters and data of experimental results were analyzed and its usability was investigated to predict processing effects. Mechanical alloying in the manufacture of P/M metal (AZ61, ZK60) and composite samples (ZK60-AZ61+ TiB_2 (15% wt.) and ZK60-AZ61 + TiB_2 (15wt.) + GNP (0.5% wt.), atmosphere-controlled hot pressing and sintering systematics were followed. These P/M samples produced were

defined by material characterization processes (density measurement, microstructure examination (SEM-EDS)). In addition, they were subjected to abrasion, compression and hardness measurement tests. Abrasion tests were carried out under 10N, 20N, 40N loads and 200 m road conditions. Compression tests were performed at room temperature for ZK60 based samples, in addition to the room temperature for AZ61 based samples also at 100°C and 200°C. Wear and compression behavior of samples; wear, compression-fracture surface, image and chemical analyzes of the sections were performed with SEM-EDS, XRD.

The results showed that TiB₂ particles were homogeneously dispersed in AZ61 and ZK60 matrices, however, the aggregation of GNPs was not completely dissolved, and density and mechanical properties changed significantly with reinforcement. The relative densities for both groups of samples are A1-K1, A3-K3 and A2-K2 respectively, from highest to lowest. It is generally understood that supplements cause a decrease in relative density. The best hardness, wear and compression results for both groups were obtained with 15%(wt.) TiB₂ and 15%(wt.) TiB₂ + 0.5(wt.) GNP and the lowest undoped alloy samples, respectively. In the wear tests, abrasive wear behavior at low loads and delamination wear behavior at high loads were observed. Among the AZ61 matrix samples, the compressive strength values for room and high temperatures are from highest to lowest, respectively; Obtained in A2, A3 and A1 samples. Among the ZK60 matrix samples, the compressive strength values at room temperature are from the highest to the lowest, respectively; It was obtained in K2, K3 and K1 samples. Fracture surface investigations showed that the mechanism was cleavage fracture and the presence of crack formations on the surface.

The processing performance of P/M samples with PMEDM was investigated by evaluating the measurement data of PMEDM process parameters, surface quality and MRR (material removal rate). Increasing PMEDM current and pulse on time values affected the surface white layer thickness, surface roughness and material removal rate. The chemical composition of the treated surface layer (white layer) changes somewhat with processing. Results showed that PMEDM produced a melting, white layer and transition zone direct proportionally to the processing parameters. The white layer did not differ from the metal integrity of the transition zone. Additionally,

volcanic craters, holes, cracks, debris covered with molten metal, and reinforcement particles were observed at the machined surface and cross-section. A high amount of oxygen was detected on the machined surface as a result of the interaction between kerosene and generated heat changing proportionally to the amount of the EDM parameters. In addition, in the ANOVA results, the pulse on time made the highest contribution to the surface roughness with 65.46% in the AZ61 matrix materials, also the pulse on time provided the highest contribution to the surface roughness with 87.58% in the ZK60 matrix materials. While it was determined that the material type made the highest contribution to MRR with %45.79 in AZ61 matrix materials, the highest contribution was made by the pulse on time with 21.85% in ZK60 matrix materials. For regression models, the determination coefficient (R^2) for the prediction of SR and MRR were determined as 0.98-0.85 for AZ61, 0.92 and 0.83 for ZK60, respectively.

As a result, PMEDM experimental and optimization (ANOVA, Taguchi and regression analyzes) data are compatible. Generally, increasing PMEDM current and pulse on time increased the white layer thickness, surface roughness and material removal rate.

Key Word : AZ61, ZK60, Mg matrix composite, TiB₂, GNPs, PMEDM, machined surface quality, MRR

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Bilge DEMİR'e ve Doç. Dr. Fatih AYDIN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez alıőması boyunca engin bilgi ve tecrübeleriyle çalıőmalarına büyük katkı sağlayan değerli Doç. Dr. Muhammet Emre TURAN ve Elektro Erezyon testlerinin yapılmasındaki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Hakan GÜRÜN hocalarıma teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalıőmasına FDK-2020-2322 proje numarası ile finansal olarak vermiş oldukları desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (KBU BAP) birimine teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	5
2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1.1. Mg Alaşımları.....	9
2.1.1.1. Mg Alaşımlarının Sınıflandırılması	11
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI.....	11
2.2.1. Otomotiv Endüstrisi.....	14
2.2.2. Havacılık ve Uzay Endüstrisi	16
2.2.3. Tıp Endüstrisi.....	19
2.2.4. Spor Endüstrisi	21
2.2.5. Elektronik Endüstrisi	22
BÖLÜM 3	24
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	24
3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT YAPISI.....	24
3.1.1. Matris Yapısı	25

	<u>Sayfa</u>
3.1.2. Takviye Elemanı	25
3.2. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	27
3.2.1. Toz Metalurjisi.....	27
3.2.1.1. Karış	29
3.2.1.2. Toz Metalurjisinin Avantajları.....	34
3.2.1.3. Toz Metalurjisinin Dezavantajları	35
3.2.2. Difüzyonla Bağlama	35
3.2.3. Sürtünme Karıştırma.....	35
3.2.4. Sıvı-Metal İnfiltrasyonu.....	36
3.2.5. Sprey döküm ile üretim	37
3.2.6. Karıştırma Döküm	38
3.2.5. In-situ (Reaktif) Yöntemi	39
3.2.6. Sıkıştırma Döküm.....	39
BÖLÜM 4	41
MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	41
4.1. TAKVİYE ELEMANLARI	42
4.1.1. Mikro Takviye	42
4.1.2. Nano Takviyeler	43
4.2. BASMA DAYANIMI	45
4.2.1. Mukavemet artış mekanizmaları.....	46
4.2.1.1. Yük Transferi	47
4.2.1.2. Orowan.....	48
4.2.1.3. Termal Uyumsuzluk.....	49
4.2.1.4. Tane Küçültme.....	50
4.3. AŞINMA	50
4.3.1. Aşınma Mekanizmaları.....	51
4.3.1.1. Abrasif Aşınma	51
4.3.1.2. Delaminasyon Aşınması	52
4.3.1.3. Plastik Deformasyon Aşınması.....	53
4.3.1.4. Oksidatif Aşınma	54

	<u>Sayfa</u>
4.3.1.5. Adhesif Aşınma	54
4.3.1.6. Aşınma Sonrası Kalıntı (Artık) Malzeme	55
BÖLÜM 5	56
ELEKTRO EREZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ VE METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN İŞLENMESİ	56
5.1. EEİ SİSTEMİ	56
5.1.1. EEİ Bileşenleri.....	58
5.1.2. EEİ Yönteminin Talaş Kaldırma Mekanizması ve EEİ Prensibi.....	59
5.2. MALZEME	61
5.2.1. EEİ Elektrotu	61
5.2.2. Dielektrik Sıvı.....	61
5.2.3. İşlenebilen Malzemeler.....	62
5.2.4. İşleme Tozları	62
5.2.5. TKEEİ Yönteminin Elektriksel Parametreleri.....	63
5.3. TKEEİ İŞLEME YÖNTEMİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	65
5.4. OPTİMİZASYON	66
5.4.1. Deney Planlaması (DOE)	67
BÖLÜM 6	69
TEORİK VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
6.1. MATRİS VE TAKVİYE MALZEMELERİ	69
6.2. T/M METODU İLE KOMPOZİT ÜRETİMİ	70
6.2.1. Mekanik Alaşımlama.....	71
6.2.2. Sıcak Presleme.....	72
6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	74
6.4. NUMUNE HAZIRLAMA VE MİKROYAPI TESTLERİ	75
6.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	77
6.6. BASMA TESTLERİ	78
6.7. AŞINMA TESTLERİ.....	79
6.8. ELEKTRO EREZYON TESTLERİ.....	80
6.8.1. İşlenmiş numunelerin geometrik ölçümleri	84

	<u>Sayfa</u>
6.8.2. İşlenmiş yüzeylerin topografya ve YP ölçümleri	85
BÖLÜM 7	86
DENEY VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	86
7.1. SERTLİK.....	86
7.2. YOĞUNLUK	88
7.3. MİKROYAPI ANALİZİ	89
7.3.1 AZ61 Matrisli Kompozitler	89
7.3.2. ZK60 Matrisli Kompozitler	93
7.4. AŞINMA TESTİ	98
7.4.1. AZ61 Matrisli Kompozitler	98
7.4.2. ZK60 Matrisli Kompozitler	103
7.5. BASMA TESTİ SONUÇLARI	111
7.5.1. AZ61 Matrisli Kompozitler	111
7.5.2. ZK60 Matrisli Kompozitler	121
7.6. ELEKTRO EREZYON İLE İŞLENEBİLİRLİK SONUÇLARI.....	125
7.6.1. AZ61 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ ile İşlenmesi	125
7.6.2. ZK60 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ ile İşlenmesi	141
7.7. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER	152
7.7.1. AZ61 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ Sonrası İstatistiksel Analizleri .	152
7.7.1.1. S/N Oranlarının Analizi	152
7.7.1.2. ANOVA Sonuçları.....	155
7.7.1.3. Regresyon Denklemleri	159
7.7.2. ZK60 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ Sonrası İstatistiksel Analizleri .	162
7.7.2.1. S/N Oranlarının Analizi	162
7.7.2.2. ANOVA Sonuçları.....	165
7.7.2.3. Regresyon Denklemleri	169
BÖLÜM 8	171
SONUÇLAR	171
KAYNAKLAR	174
ÖZGEÇMİŞ	195

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bazı yapısal materyallerin spesifik mukavemet değerleri	7
Şekil 2.2. Bazı yapısal materyallerin spesifik sertlik değerleri	7
Şekil 2.3. Endüstriyel olarak kullanılan hafif ve yapısal elementlerin yıllara göre üretim miktarları	13
Şekil 2.5. Mg'nin yaygın olarak kullanıldığı sektörler	14
Şekil 2.7. Bir otomobilde Mg kullanımına ait örnekler	15
Şekil 2.8. Mg alaşımları için uygulama örnekleri, Boeing 747'de: Kanat ve koltuk bileşenleri	17
Şekil 2.9. Mg alaşımlarının uçak yapımında kullanımı	17
Şekil 2.10. Üretiminde Mg alaşımı kullanılan balistik füzeler (En solda, bir insanın füzelere kıyasla boyutu gösterilmiştir)	18
Şekil 2.11. Atak helikopterine ait dişli kutusu gövdesi	19
Şekil 2.12. Mg alaşımından üretilmiş stent	20
Şekil 2.13. a) Damar tıkanıklığı tedavisinde kullanılan stentler ve b) ortopedik implantlar	20
Şekil 2.14. Spor ve eğlence ekipmanlarında Mg alaşımı uygulaması	21
Şekil 2.15. Mg'nin elektronik alanındaki kullanımları	22
Şekil 2.16. Nikon D4 (2012) Mg alaşımı fotoğraf makinesi kasası	23
Şekil 3.1. Kompozitlerdeki takviye çeşitleri: a) sürekli fiber takviye, b) Süreksiz kısa elyaf takviyesi, c) Parçacık takviyesi	26
Şekil 3.2. Toz metalurjisi üretim aşamaları	28
Şekil 3.3. Vakum destilasyon yöntemi ile karıştırma yöntemi	29
Şekil 3.4. Mekanik Alaşımlama yöntemi	30
Şekil 3.5. Soğuk pres tekniğinin gösterimi.	31
Şekil 3.6. Sıcak pres tekniğinin gösterimi.....	32
Şekil 3.7. Sıcak pres cihazında eş zamanlı sinterleme ve presleme işlemi esnasında kompozit toz partikül tanelerinin temsili gösterimi	34
Şekil 3.8. Sürtünmeli karıştırma yöntemi ile üretim şeması.	36
Şekil 3.9. Sıvı-metal infiltrasyon yöntemi şematik gösterimi	37

Şekil 3.10. Karıştırılmalı döküm sistemi.....	38
Şekil 3.11. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi aşamaları; a) Ergimiş metal Mg matris kalıba dökülür, b) yüksek basınç uygulanır, c) kompozit malzeme çıkarılır.	40
Şekil 4.1. Orowan mekanizması; a) Orowan dislokasyon çevrimi oluşumunun şematik gösterimi, b) Orowan takviye çevrimine ait mikroyapı görüntüsü, c) Takviye partiküllerinin dislokasyon hareketi tarafından kesilerek parçalanmasına ait görüntü	49
Şekil 4.2. 20 N'de test edilen ZE41A numunesinin aşınmış yüzeylerinin SEM mikrografları ve: (a) 0,1 m s-1; (b) 0,5 m s-1 ve (c) 0,5 m s-1 için aşınma döküntüsü	52
Şekil 4.4. AM60B numunesinin aşınmış yüzeylerinin SEM mikro fotoğrafları (a) 0,3 m/s 40 N; (b) 0,3 m/s 80 N ve (c) enine kesit 0,3 m/s 80 N; (d) 1 m/s 40 N.	53
Şekil 4.5. Yapışma ile malzeme transferi	55
Şekil 5.1. TKEEİ sisteminin şeması	57
Şekil 5.2. a) EEİ ve b) TKEEİ işlemi esnasında elektrik deşarjı ile oluşturulan ark şeması	58
Şekil 5.3. EEİ prensibinin şematik diyagramı	60
Şekil 6.1. Tozların SEM resimleri: a) AZ91, b) ZK60, c) TiB ₂ , d) Grafen.	70
Şekil 6.2. Kompozit numunelerin üretim şeması.	71
Şekil 6.3. Mekanik alaşımlama cihazı.....	72
Şekil 6.4. Sıcak pres cihazı.	73
Şekil 6.5. Üretilen a) AZ61 matrisli (soldan sağa sırasıyla A1, A2 ve A3) ve b) ZK60 matrisli kompozit numuneler (soldan sağa sırasıyla K1, K2 ve K3).	73
Şekil 6.6. Sıcak pres üretimlerinde kullanılan grafit kalıp.....	74
Şekil 6.7. Elektronik terazi ve yoğunluk ölçüm düzeneği.	75
Şekil 6.8. a) Hassas kesme cihazı, b) Zımparalama-parlatma cihazı.	76
Şekil 6.9. XRD cihazı.....	76
Şekil 6.10. SEM Cihazı.....	77
Şekil 6.11. Sertlik ölçüm cihazı.	78
Şekil 6.12. Basma test cihazı.	78
Şekil 6.13. Aşınma test cihazı.	80
Şekil 6.14. Aşınma hacim kaybı ölçümünün gösterimi.	80
Şekil 6.15. TKEEİ sistemin şeması.....	81

Şekil 6.16. Bu çalışma kapsamında üretilmiş ve deneylerde kullanılmış olan bakır elektrot.....	82
Şekil 6.17. TKEEİ testlerinde kullanılan işleme tezgahı.	83
Şekil 6.18. EEİ işlemi esnasında ark oluşumuna ait bir gösterim.....	83
Şekil 6.19. a) Projektör, b) Nikon ShuttlePix stereo mikroskobu.....	84
Şekil 6.20. A1 numunesinin (a) minimum ve (b) maksimum parametreleri ile TKEEİ işleme yapılmış yüzeylere ait makro görüntüleri.....	85
Şekil 7.1. T/M tarafından üretilen (a) A1, (b) A2 ve (c) A3 kompozitlerinin SEM mikro fotoğrafları	90
Şekil 7.2. Numunelerin tane boyutu dağılımı.	90
Şekil 7.3. T/M tarafından üretilen A3 kompozitinin EDS analizleri.	91
Şekil 7.4. Sırasıyla A1, A2, A3 numunelerinin SEM-EDS mikrofotoğrafları ve EDS analizi ile A3 numunesinin Mg, Ti, C dağılımları.	92
Şekil 7.5. a) A1, b) A2 ve c) A3'ün XRD desenleri.	93
Şekil 7.6. K1 (a), K2 (b) ve K3 (c) SEM görüntüleri, kısaltmalar: TS: Tane Sınırı..	94
Şekil 7.7. K1, K2 ve K3'ün tane boyutu dağılımı.	94
Şekil 7.8. K3 numunesinin EDS elementel haritalama analizi. Kısaltmalar: AG: Grafen topaklanması.	95
Şekil 7.9. K3 numunesine ait çizgi EDS analizi.	96
Şekil 7.10. a) K1, b) K2, c) K3, d) TiB ₂ ve e) Grafen'in XRD desenleri.....	97
Şekil 7.11. A1, A2 ve A3 kompozitlerinin aşınma oranları.....	99
Şekil 7.12. (a-b) A1, (c-d) A2, (e-f) A3 numunelerinin aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri.	100
Şekil 7.13. 40N yük altında aşınma testi sonrası A3 numunesinin EDS analizi.....	102
Şekil 7.14. Uygulanan yüklere karşı numunelerin aşınma oranları.	104
Şekil 7.15. Numunelerin aşınma yüzeyi, sırasıyla 10N ve 40N aşınma yükü olarak; a) ve b) K1 numuneleri, c) ve d) K2, e) ve f) K3.	105
Şekil 7.16. 40 N yük altındaki K2 kompozitinin aşınmış yüzeyinin EDS analizi. ..	106
Şekil 7.17. a) K1 ve b) K3 numunelerin 40 N yük altındaki aşınma kalıntılarının SEM görüntüleri.....	107
Şekil 7.18. 40 N yük altında K3'ün aşınma kalıntılarının EDS analizi.....	107
Şekil 7.19. a) K1 ve b) K3'e ait çelik karşıt (aşındırıcı) yüzeyinin SEM görüntüleri.	108
Şekil 7.20. K3 numunesine ait aşındırıcı bilye yüzeyinin EDS analizi.	109
Şekil 7.21. 10 N yük altındaki a) K1, b) K2 ve c) K3 numunelerinin kesit görüntüsü.	110

Şekil 7.22. K3 numunesi aşınma yüzeyi kesitinin EDS analizi.	110
Şekil 7.23. a) 25 °C, b) 100°C ve c) 200°C'de AZ61 ve kompozit numunelerinin basma testi Gerilme-Gerinim grafikleri.	112
Şekil 7.24. Oda sıcaklığında basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri.	116
Şekil 7.25. 100°C sıcaklıkta basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri.	117
Şekil 7.26. Oda sıcaklığında basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.	118
Şekil 7.27. 100°C sıcaklıkta basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.	119
Şekil 7.28. 200°C sıcaklıkta basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.	120
Şekil 7.29. ZK60 ve kompozitlerinin gerilme-gerinim eğrileri.	121
Şekil 7.30. Numunelerin kırılma yüzeyi a) K1, b) K2, c) K3, d) K2 (basma uygulanmış üst yüzey).....	124
Şekil 7.31. a) A1 numunesinin minimum parametreler ile b) maksimum parametreler ile işlenmiş yüzeyi.....	125
Şekil 7.32. TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerin yüzey topografyası.	127
Şekil 7.33. A1'in min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.	128
Şekil 7.34. A2'nin min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.	129
Şekil 7.35. A3'ün min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.	130
Şekil 7.36. TKEEİ işlenmiş A1 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografı.	133
Şekil 7.37. TKEEİ işlenmiş A2 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografı.	134
Şekil 7.38. TKEEİ işlenmiş A3 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografı.	135
Şekil 7.39. Daha düşük ve daha yüksek büyütme oranları ile maksimum TKEEİ akımı ve vurum süresi değerleri ile işlenmiş numunelerin beyaz tabakasının mikrofotografı.....	137
Şekil 7.40. Daha düşük ve daha yüksek büyütme oranları ile minimum TKEEİ akımı ve vurum süresi değerleri ile işlenmiş numunelerin beyaz tabakasının mikrofotografı	138
Şekil 7.41. TKEEİ Minimum akım - vurum süresi değerleri ile EDS elementel ve Harita analizi.	139

Şekil 7.42. a) A1, b) İşlemeden sonra A1, c) A2, d) İşlemeden sonra A2, e) A3 ve f) İşlemeden sonra A3'ün XRD desenleri.	140
Şekil 7.43. TKEEİ ile işlenmiş bölgelerin (deliklerin) üstten görünüşleri.	141
Şekil 7.44. Numunelerin TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerinin SEM mikrofotografı.	143
Şekil 7.45. TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerin SEM-EDS spektrumları.	145
Şekil 7.46. TKEEİ işlenmiş yüzeyin yüzey topografisi.	146
Şekil 7.47. K1'in min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.	147
Şekil 7.48. K2'nin min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.	148
Şekil 7.49. K3'ün min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları	149
Şekil 7.50. K3 numunesinin farklı parametreler ile işlenmiş bölge kesitinin beyaz tabakasının mikrofotografı (Sağ üstte EDS analizi) ve beyaz tabaka kalınlıkları.	150
Şekil 7.51. K3 numunesinin a) işleme öncesi ve b) işleme sonrası (400 μ s, 16A) yüzeylerinin XRD analizleri.	151
Şekil 7.52. YP için ana etki grafikleri a) Ortalamalar ve b) S/N oranları	154
Şekil 7.53. MRR için ana etki grafikleri a) Ortalamalar ve b) S/N oranları.	154
Şekil 7.54. a) YP ve b) MRR için normal olasılık grafikleri.	157
Şekil 7.55. Parametrelerin YP üzerindeki etkileşim grafiği.....	158
Şekil 7.56. MRR'deki parametrelerin etkileşim grafiği.	158
Şekil 7.57. (a) YP ve (b) MRR için harita grafikleri.....	159
Şekil 7.58. Deneysel ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması a) YP ve b) MRR.	161
Şekil 7.59. a) YP ve b) S/N oranları için ana etki grafikleri.	164
Şekil 7.60. a) MRR ve b) S/N oranları için ana etki grafikleri.	164
Şekil 7.61. a) YP ve b) MRR için normal olasılık grafikleri.	166
Şekil 7.62. Parametrelerin YP üzerindeki etkileşim grafiği.....	167
Şekil 7.63. Parametrelerin MRR üzerindeki etkileşim grafiği.	168
Şekil 7.64. (a) YP ve (b) MRR için harita grafikleri.....	169
Şekil 7.65. a) YP ve b) MRR için deneysel ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	170

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Mg'nin genel özellikleri	6
Çizelge 2.2. Mg'nin atomik özellikleri ve kristal yapısı	8
Çizelge 2.3. Mg'nin Fiziksel özellikleri	8
Çizelge 2.4. Saf Mg'nin 20 ⁰ C'deki mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.5. Otomotiv endüstrisinde Mg alaşımı uygulamaları	16
Çizelge 5.1. TKEEİ'de kullanılan dielektrik sıvıların özellikleri	62
Çizelge 5.2. Yaygın olarak kullanılan TKEEİ tozları ve fiziksel özellikleri	63
Çizelge 5.3. Kontrol faktörlerinin seviyeleri.....	67
Çizelge 6.1. T/M sıcak presleme yöntemiyle üretilen AZ61 ve ZK60 matrisli, mikro- nano parçacık takviyeli kompozit numunelerin içeriği ve çalışma boyunca temsilen kullanılan kodları.	71
Çizelge 6.2. T/M numunelerinin sinterleme parametreleri ve değerleri.	74
Çizelge 6.3. Aşınma testi parametreleri ve değerleri.	79
Çizelge 6.4. TKEEİ işlem parametreleri.	81
Çizelge 7.1. Numunelerin sertlik değerleri.....	87
Çizelge 7.2. Numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları.....	89
Çizelge 7.3. AZ61 ve AZ61 matrisli kompozitlerin basma testi sonuçları.....	112
Çizelge 7.4. ZK60 ve kompozit numunelerin basma testi sonuçları.....	122
Çizelge 7.5. L18 dizisi için işleme parametreleri ve S/N oranları.	152
Çizelge 7.6. S/N oranlarının yanıtı (YP için).....	153
Çizelge 7.7. S/N oranlarının yanıtı (MRR için).....	153
Çizelge 7.8. YP için ANOVA sonuçları.	156
Çizelge 7.9. MRR için ANOVA sonuçları.....	156
Çizelge 7.10. L18 dizisi, işleme parametreleri ve S/N oranı.	162
Çizelge 7.11. S/N oranları için yanıt (YP için).	163
Çizelge 7.12. S/N oranları için yanıt (MRR için).	163
Çizelge 7.13. YP için ANOVA sonuçları.	165
Çizelge 7.14. MRR için ANOVA sonuçları.	166

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A	: akım
Al	: alüminyum
Ar	: argon
B	: bor
C	: karbon
Cu	: bakır
Fe	: demir
Mg	: magnezyum
O	: oksijen
Ti	: titanyum
T _{on}	: vurun süresi
T _{off}	: vurun ara süresi
V	: volt
Zn	: çinko

KISALTMALAR

- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
- CNT : Karbon Nanotüp
- GNP : Grafen
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- MMK : Metal Matris Kompozit
- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
- XRD : X-ray Diffractometer
- HV : Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
- ağ. : Ağırlıkça
- MP : Mikro-porozite
- DC : Direct Current (Doğru Akım)
- EEİ : Elektro Erezyon ile İşleme
- MRR : Malzeme İşleme Hızı
- TAO : Takım Aşınma Oranı
- TEEİ : Tel Elektro Erezyon ile İşleme
- TKEEİ: Toz Katkılı Elektro Erezyon ile İşleme
- YP : Yüzey Pürüzlülüğu
- T/M : Toz Metalurjisi
- TGK : Termal Genleşme Katsayısı
- TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bilim ve teknoloji ilerledikçe insanlık yaşamın devamı için her alanda sürdürülebilirliği aramaya başlamış ve bu arayış onu enerji ve yenilenemeyen kaynakların tüketimini azaltmaya itmiştir. Enerji insanlığın yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmesi için gerekli olan en önemli kaynakların başında gelmektedir. Geçmişten bugüne yeryüzünde yaşayan insan toplulukları enerji kaynaklarına sahip olabilmek için birbirleri ile büyük savaşlar vermiş ve hala vermektedirler. Dünya genelinde, yakın geçmişte artan karbondioksit (sera gazı emisyonu) salınımı ve buna bağlı olarak küresel sıcaklıktaki artış, üreticiler arasında atmosfere fayda sağlamak için karbondioksit emisyonlarını azaltacak önlemler alma konusunda bir farkındalık duygusu meydana getirmiştir. Bu farkındalık neticesinde üreticiler hafif, dayanıklı ve enerji tasarrufu sağlayan malzemeler üretme konusunda global bir yarış içine girmiştir. Bu anlamda, bahsedilen özellikleri bünyesinde barındıran kompozit malzemelerin önemi daha belirgin hale gelmiştir. Kompozit malzemelerin üretimde yer alması, karbon salınımının azaltılmasında yeni bir devrim niteliğinde olmuştur.

Son zamanların en çok çalışılan kompozit malzemeleri arasında yer alan Magnezyum (Mg); doğada en çok bulunan elementler arasında 8. sırada yer almaktadır. Yapı metalleri arasında en hafif olan metal olmasının yanısıra geri dönüştürülebilir bir metal olması, dünyadaki araştırmacıların ilgisini kendi üzerine çekmesini sağlamıştır. Bu araştırmalar neticesinde Mg alaşımları ve kompozitler oldukça ilgi görmekte ve ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir [1]. Mg esaslı kompozitler, yüksek özgül mukavemeti, diğer metallere göre çok daha hafif olması ve enerjiyi daha verimli kullanma imkânı sağlaması nedeniyle sürdürülebilir bir yaşam için büyük umut vaat etmektedirler. Düşük yoğunluklu yapısal metaller olarak Mg kompozitler, havacılık sanayisi [2], savunma sanayisi [3] ve otomotiv sanayisinde [4] yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca hafifliği ile daha büyük rahatlık ve kullanılabilirlik sunması

sayesinde spor malzemelerinde [5], insan vücuduna uyum sağlama özelliği, kemik yapısına yakın dayanıklılık ve mukavemet sağlaması ile biyomedikal implantlarda [6] ve yine hafif ve mukavemeti yüksek olmasıyla elektronik endüstrisi [4] gibi alanlarda da Mg kullanımını giderek yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte, Mg ve kompozitlerin kullanımındaki artışın önünde hala önemli engeller bulunmaktadır. Mg kompozitleri, zayıf mekanik özellikleri, korozyon ve aşınma direnci nedeniyle alüminyum (Al) ve demir (Fe) kadar yaygın olarak kullanılamazlar [7]. Bu nedenle Mg kullanımını arttırmak için çeşitli takviye katkıları kullanılan yeni alaşımlar ve kompozitler keşfederek bu zayıf özelliklerin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda araştırmacılar, Mg'nin bu olumsuz özelliklerini iyileştirmek ve performansını artırmak için çeşitli takviyeler ile yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar. SiC [8–10], B₄C [11,12], TiC [13,14], Al₂O₃ [15], BN [16], TiB₂ [17,18], GNP'ler [19] ve CNT [20], Mg matrisli kompozit üretiminde en çok tercih edilen takviye malzemeleri arasındadır. Bu takviye elemanları arasında TiB₂, üstün özellikleri ve Mg ile oldukça uyumlu davranışı nedeniyle oldukça tercih edilmektedir.

Titanyum diborür (TiB₂), düşük yoğunluk oranı (4,5 g/cm³), yüksek sertlik (960 HV), yüksek mukavemet ve dayanıklılık, iyi aşınma direnci, yüksek erime sıcaklığı (2790°C) ve yüksek elastik modülü (565 GPa) gibi dikkat çekici özelliklere sahip, Mg kompozitlerde takviye olarak tercih edilen [21–23], iyi bilinen seramik bir malzemedir. TiB₂'nin bu olağanüstü özelliklerini kullanmak, kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini büyük ölçüde geliştirmiştir [17,24].

Grafen (GNP), son zamanlarda oldukça ilgi gören üstün özelliklere sahip karbon bazlı nano takviye malzemesi olarak kompozit üretiminde ön plana çıkan bir diğer nano takviye malzemesidir. GNP, geniş yüzey alanı, benzersiz termal ve mekanik performansı, katı yağlayıcı özellikleri sebebiyle son yılların ilgi çekici ve popüler takviye malzemesidir [25,26]. 2D yapıya ve 1 TPa elastisite (Young) modülüne sahiptir. Bazı çalışmalar, çok az miktarda grafenin bile metal matrisli kompozitlerde mekanik ve tribolojik performans üzerinde birçok olumlu özelliğe yol açtığını göstermiştir [25–27]. Dolayısıyla bu çalışmada, tüm bu yapısal özellikler göz önüne

alınmış ve GNP'nin bu üstün özelliklerini TiB_2 ile birleştirerek daha yüksek performansa sahip hibrit Mg kompozit malzemeler üretmek amaçlanmıştır.

Monolitik AZ61 ve ZK60 matrisli kompozitler üzerine çeşitli çalışmaların olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, AZ61 ve ZK60 matrisi üzerinde hibrit kompozitlerle ilgili gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışma tespit edilmiştir. Sonuç olarak sıcak presleme ile üretilen AZ61-ZK60 / TiB_2 / GNP hibrit kompozitler hakkında herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, mekanik alaşımlama ve sıcak presleme ile monolitik AZ61-ZK60 / TiB_2 ve hibrit AZ61-ZK60 / TiB_2 / GNP kompozitler üretilmiştir. Ayrıca, araştırmada üretilen numunelerin sertliği, basma ve aşınma davranışı, ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hata mekanizmalarını anlamak için aşınmış ve kırık yüzeylerde SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Araştırmacılar TKEEİ-EEİ konularını araştırmış, vuruş süresi (T_{on}) ve deşarj akımı (DA) artışının kompozit malzemelerin MRR, takım aşınma oranını (TAO) ve YP'yi (R_a , R_z) arttırdığını tespit etmişlerdir [28–36]. Ek olarak, birçok araştırmacı [29,33,37–39] MMK (Metal matris kompozit) malzemelerinin EEİ ve TKEEİ'sinin modellenmesini ve optimizasyonlarını incelemiştir. Ancak mikro TiB_2 -nano grafen takviyeli Mg alaşımı hibrit kompozit üzerine bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, TKEEİ ile AZ61 Mg alaşım kompozitin işlenmiş yüzey olgusu, özellikle bu çalışmada kullanılan takviye elemanları üzerine bir çalışma bulunmamaktadır. Esasen, kompozitin hibrit yapısı, güçlendirilmiş partiküllerin yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi ve kimyasal bileşimin değişmesi gibi yeni farklı malzeme sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, işlemeyi anlamak için birçok yeni yaklaşıma ihtiyaç duyulduğu açıktır. Sonuç olarak, bu çalışma, TiB_2 ve TiB_2 +nano grafen takviyeli AZ61 Mg bazlı alaşımın fabrikasyonu ve nano-grafit toz karışımında dalma TKEEİ prosesi ile işlenmesi üzerine organize edilmiştir. AZ61 ve AZ61 alaşım kompozit, mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yoluyla üretilmiştir. İşlenmiş yüzeylerde ileri karakterizasyon için YP ölçümü, SEM, EDS, XRD ve yüzey topoğrafyası incelemeleri yapılmıştır. Daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde grafit, bakır, krom ve alüminyum gibi birçok nano ve mikro boyutlu toz partiküllerin dielektrik sıvıya eklendiği görülmektedir [33,40–42]. EEİ işlemine nano grafit tozu

karışımının eklenmesinin daha geniş bir deşarj alanı ve daha iyi YP elde edilmesine yardımcı olabileceği sonucuna varılmıştır [36,42,43]. Ayrıca, bu çalışmada, YP ve MRR'yi etkileyen vurum süresi, akım ve malzemeler arasındaki temel kontrol faktörlerini bulmak için istatistiksel bir deney tasarımı (DOE) tekniği uygulanmıştır. İstatistiksel analizler, Taguchi L18 ortogonal tasarımı, ANOVA kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, tepkileri (YP ve MRR) tahmin etmek için regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Denklemlerin başarısı, belirleme katsayısı (R^2) hesaplanarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Mg, yeryüzünde en çok bulunan elementler arasında 8. sırada ve en çok bulunan metaller arasında 6. sıradadır [44]. Doğada element halde bulunmaz, manyezit ve dolomit gibi minerallerde büyük tortularda bulunur. Denizler, trilyonlarca ton Mg içerir ve bu, her yıl üretilen 850.000-ton Mg'nin çoğunluğunun kaynağıdır. Mg, yüksek özgül mukavemete ve düşük yoğunluğa sahip en hafif yapısal metal malzemedir. Bu benzersiz malzeme özelliği, endüstriyel sektör, otomobiller, havacılık ve biyomedikal ile ilgili çeşitli uygulamalarda Mg ve alaşımlarının kullanımında bir artışa neden olmuştur. Yeryüzünde yaşamın devamını tehdit eden sera gazı emisyonlarını azaltmak için devletlerin koymuş olduğu zorunlu yasalar, insanların en büyük zaruri ihtiyaçlarından olan otomobil ve çeşitli taşıtların hafifletilmesinin gerektiği sonucuna vardirmiştir. Bu emisyon değerlerinin düşürülmesi, otomotiv sanayinde kullanılan taşıt bileşenlerinin azaltılmasıyla büyük oranda gerçekleştirilmektedir. Hafifliği ve mekanik özellikleri ile Mg'nin en etkili yapı malzemeleri arasında olması; otomotiv, havacılık, elektronik gibi önemli sektörlerde Mg'yi en çok kullanılmak istenen malzeme konumuna yükseltmiştir. Dolayısıyla Mg, bu sektörlerde olabildiğince kullanıma uygun hale getirilmek için çalışılan ve araştırılan gözde malzemeler arasındadır [45–47].

Mg ve alaşımlarının öne çıkan avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yapısal metaller arasında en düşük yoğunluğa sahip olan metal olması
- Yüksek özgül mukavemet
- İyi döküm yeteneği, yüksek basınçlı kalıp dökümlerine uygun olması
- Yüksek hızlarda işlenebilirlik
- Kontrollü atmosfer altında kaynak edilebilirlik

- Yüksek titreşim sönümleyici özelliği
- Geri dönüşebilirlik
- Polimer malzemelere kıyasla daha iyi elektrik ve termal iletkenlik

Mg ve alaşımlarının dezavantajları, aşılmaya çalışılan ve yaygın kullanımını sınırlayan olumsuz özellikleri ise şunlardır:

- Düşük elastik modül
- Sınırlı soğuk işlenebilirlik ve tokluk
- Yüksek sıcaklıklarda sınırlı mukavemet ve sürünme dayanımı
- Katılma sırasında yüksek büzülme
- Zayıf korozyon ve aşınma direnci [45]

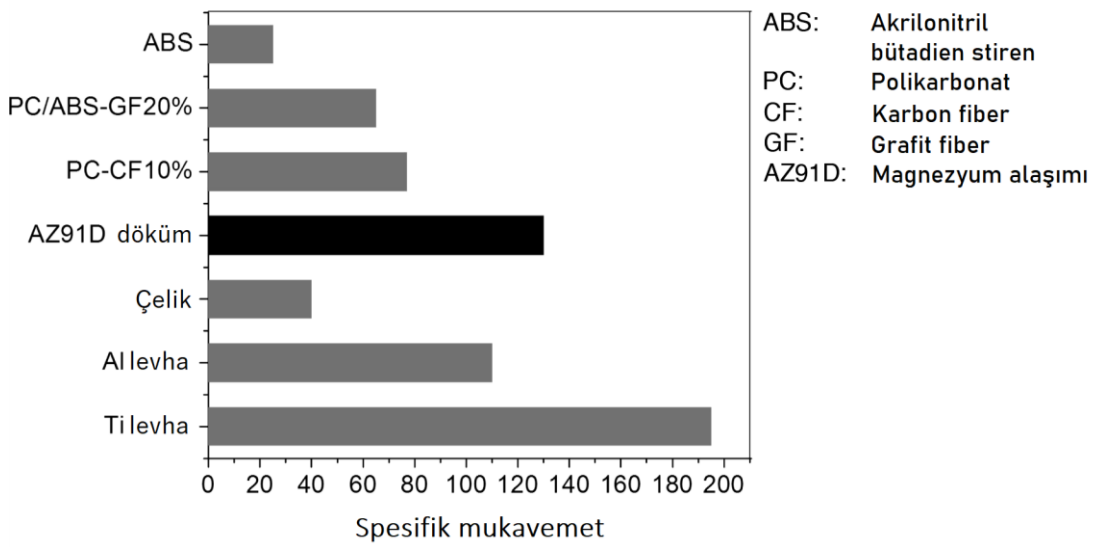
Mg'ye ait genel özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mg'nin genel özellikleri [48].

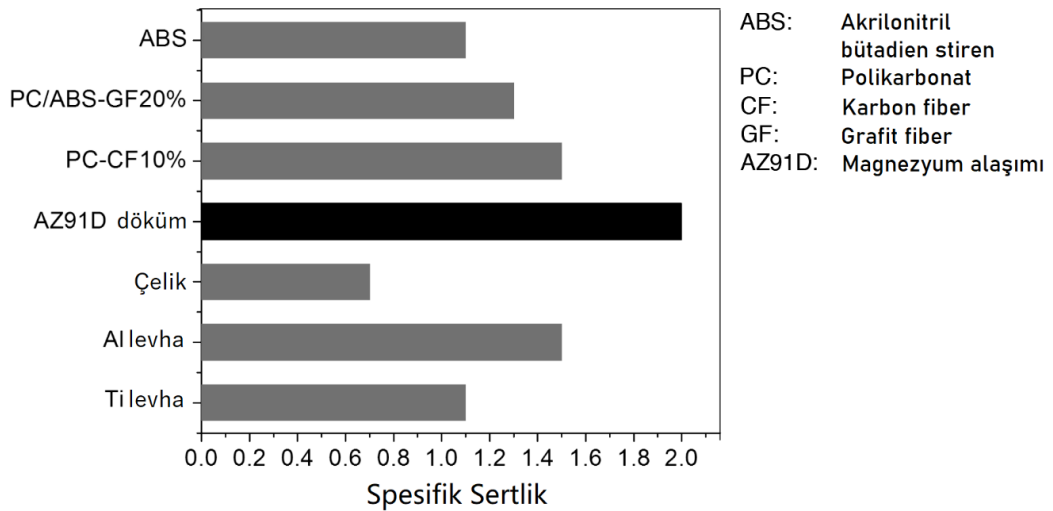
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.738
Sertlik (HB)	40-41
0.2 Akma Mukavemeti (MPa)	69-105
Çekme Mukavemeti (MPa)	165-205
0.2 Basma Mukavemeti (MPa)	80-104
Gerinim (%)	1-12
Elastisite Modülü (GPa)	45
Ergime Sıcaklığı (°C)	650
Elektrik İletkenliği (nΩ.m)	44.5
Elektrod Potansiyeli (V)	-2.37
Kristal Yapı	Hegzagonal sıkı paket

Mg, muazzam bir potansiyele sahip olsa da üretim sektörlerinde en çok tercih edilen alüminyumdan daha yumuşaktır, bu nedenle sertleştirici ve güçlendirici takviyelerin eklenmesi gerekmektedir. Mg'ye ve bazı yapısal materyallere ait spesifik mukavemet değerleri karşılaştırması

Şekil 2.1’de, spesifik sertlik değerleri ise Şekil 2.2’de verilmiştir. Mg üretimi esnasında, Mg’nin kullanımını sınırlayan etkenlerin üstesinden gelmek ve uygulama alanına göre istenen malzeme özelliklerini geliştirmek için, Mg alaşımlarının tasarımında ve geliştirilmesinde uygun bir süreç izlenmelidir. Tüm bu olumsuzluklar, Mg alaşımlarını aktif olarak kullanıma yakın hale getirmeyi göz korkutucu bir görev gibi göstermektedir. Ancak dünya çapındaki araştırmacılar, geleceğin arabalarına Mg alaşımlarının entegre edilmesinin en iyi hangi yol ve şekilde gerçekleştirilebileceğini bulmak için araştırmalar yapmaktadırlar [45].



Şekil 2.1. Bazı yapısal materyallerin spesifik mukavemet değerleri [45,49].



Şekil 2.2. Bazı yapısal materyallerin spesifik sertlik değerleri [45,49].

Mg'nin atomik özellikleri ve kristal yapısı Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Mg'nin atomik özellikleri ve kristal yapısı [45].

Sembol	Mg
Element sınıflandırması	Alkali toprak metali
Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24.3050(6)
Atom hacmi	14,0 cm ³ /mol
Atom yarıçapı	0,160 nm
İyon yarıçapı	0,072 nm
Yörünge elektron durumları	1s ² , 2s ² , 2p ⁶ , 3s ²
Yörünge başına elektron sayısı	2, 8, 2
En yaygın değer	2+
Kristal yapısı	Hegzagonal sıkı paket (HCP)

Mg'ye ait fiziksel özellikler detaylı olarak Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Mg'nin Fiziksel özellikleri [45].

Yoğunluk (20 °C'de)	1,738 g/cm ³
Erime noktası	(650 ± 1) °C
Kaynama noktası	1090 °C
Doğrusal termal genleşme katsayısı	
20–100 °C'de	26,1 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
20–200 °C'de	27,1 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
20–300 °C'de	28,0 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
20–400 °C'de	29,0 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
20–500 °C'de	29,9 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Termal iletkenlik (27 °C'de)	156 W m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül ısı kapasitesi (20 °C'de)	1,025 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
Gizli füzyon ısısı	360–377 kJ kg ⁻¹
Gizli buharlaşma ısısı	5150–5400 kJ kg ⁻¹
Gizli süblimleşme ısısı (25 °C'de)	6113–6238 kJ kg ⁻¹
Yanma ısısı	24,9–25,2 MJ kg ⁻¹
Difüzyon katsayısı	
468°C'de	4,4 × 10 ⁻¹⁰ cm ² s ⁻¹
551°C'de	3,6 × 10 ⁻⁹ cm ² s ⁻¹
627°C'de	2,1 × 10 ⁻⁸ cm ² s ⁻¹

Farklı yöntem ve teknikler ile üretilmiş saf Mg'nin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Saf Mg'nin 20⁰C'deki mekanik özellikleri [45].

Saf Mg	Tavlanmış Sac	Haddelenmiş Sac	Kum Dökümü	Ekstrüde	T/M- Ekstrüde	DMD- Ekstrüde
0.2% Basma Akma Dayanımı (MPa)	69–83	105–115	21	34–55	92 ± 12 ^a	74 ± 4 ^b
0.2% Çekme akma dayanımı (MPa)	90–105	115–140	21	69–105	132 ± 7 ^c	97 ± 2 ^d
Çekme dayanımı (MPa)	160–195	180–220	90	165–205	193 ± 2 ^c	173 ± 1 ^d
Sertlik HB ^e	40–41	45–47	30	35	–	–

^aT/M: Toz metalurji metodu, 350 ⁰C'de ekstrüzyon yapılmış.

^bDMD: Ergitme biriktirme, 350 ⁰C'de ekstrüzyon yapılmış.

^cT/M: Toz metalurji metodu, 250 ⁰C'de ekstrüzyon yapılmış.

^dDMD: Ergitme biriktirme, 250 ⁰C'de ekstrüzyon yapılmış.

^e500 kg yük altında, 10 mm çapında bilya.

2.1.1. Mg Alaşımları

Bilindiği üzere metaller saf halde yumuşak ve mekanik performansları düşüktür. Ayrıca korozyon direnci, aşınma direnci vb. özellikleride düşük olabilmektedir. Bilinen özellik ve dayanım geliştirici mekanizmalardan en önemlisi bir metali diğer metaller ile alaşımlandırarak özelliklerinin geliştirilmesidir. Mg metali de birçok metal ile alaşımlandırılarak özellikleri geliştirilebilmektedir. Bu alaşım elementlerine örnek olarak; Al, Zn, Cu, Se vb. alaşım elementleri gelmektedir. Alaşım elementleri ve Mg metali özelliklerine etkileri konunun devamında verilmiştir. Bu alaşım elementleri mikroyapı ve mekanik özellikleri geliştirmektedir ve temel olarak; katı eriyik, soğuk deformasyonda etki, ikincil faz oluşumu, yaşlandırma ile ince homojen dağılmış intermetalik yapısı gibi mekanizmalar ile Mg elementinin özelliklerini geliştirmektedir [45].

Alüminyum- Alüminyum, Mg için birinci öncelikli olarak kabul edilen ve en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Şöyleki; Mg üzerinde en olumlu etkiye sahip olan ve Mg'de en yaygın kullanılan alaşım elementidir. Alüminyumun eklenmesi sertlik ve mukavemetin artmasına neden olur. Aynı zamanda döküm yöntemi ile üretilebilirliği de geliştirmektedir [45].

Seryum- Seryum takviyesi (%0.2 Ce), Mg'nin gerinim değerlerinde önemli bir artışa yol açar. Mishra vd. [50], Mg'de seryum varlığının, yeniden kristalleştirme sırasında ekstrüde çubukların dokusunu, plastik deformasyon kabiliyetini artıracak şekilde değiştirdiğini bildirmiştir. Mg-Ce malzemesinde, Mg malzemesine kıyasla hem ikizlenme hem de kayma aktiviteleri meydana gelir, burada sadece ikizlenme baskındır. Ayrıca Ce ilavesinin akma dayanımını azalttığı ve kararsızlığın başlamasını geciktiren iş sertleşme oranını arttırdığı gözlenmiştir [45].

Bakır- Bakır, Mg'de sınırlı katı çözünebilirliğe sahiptir. Bakır, Mg₂Cu intermetaliklerini oluşturmak için Mg ile reaksiyona girmektedir. Çalışmalar, Mg'ye bakır ilavesinin oda sıcaklığını ve yüksek sıcaklık dayanımını artırmaya yardımcı olduğunu göstermiştir; ancak süneklik tehlikeye girmektedir. Bakır ilavesinin korozyon direncini olumsuz yönde etkileyebileceği de not edilebilir [45].

Mangan- Mangan ilavesi, Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının tuzlu su korozyon direncini artırmaktadır. Manganın Mg'deki düşük çözünebilirliği, Mg'deki mangan ilave miktarını sınırlar. Mangan genellikle alüminyum gibi diğer alaşım elementleriyle birleştirilir [45].

Nikel- Nikel, Mg'de sınırlı katı çözünebilirliğe sahiptir. Hasan vd. [51], nikelin Mg'ye dahil edilmesinin Mg₂Ni intermetaliklerinin oluşumuna ve oda sıcaklığı mukavemetinde bir artışa (%0.2 akma mukavemeti ve nihai gerilme mukavemetindeki artış açısından) yol açtığını bildirmiştir; ancak, süneklikte bir azalma gözlenmiştir. Mg alaşımlarına çok küçük miktarlarda bile nikel ilavesi korozyon direnci üzerinde olumsuz etkiye sahiptir [45].

Titanyum- Titanyum ve Mg'nin birbiri içinde çok sınırlı karşılıklı çözünürlüğü vardır. Hasan vd. [52], Mg'ye hacimce %2,2 ve %4 oranında titanyum ilavesinin, %0.2'lik akma mukavemeti ve süneklikte bir artışa yol açtığını bildirmişlerdir. Ayrıca intermetalik bileşik oluşmadığını tespit etmişlerdir.

Çinko- Çinko, Mg'de en yaygın kullanılan ve etkili alaşım elementlerinden biridir. Sünekliği azaltmadan mukavemeti arttırmak için genellikle alüminyum ile birlikte kullanılır. Mukavemetin karşılaştırılabilir seviyelere yükselmesi, sadece alüminyum içeriği arttırıldığında elde edilemez. Ayrıca, nikel ve demir safsızlıkları ile Mg alaşımına dahil edilen çinko da korozyon direncini arttırmaya yardımcı olabilir [45].

Zirkonyum- Zirkonyum, çinko, toryum, nadir toprak elementleri veya bu elementlerin bir kombinasyonunu içeren alaşımlara dahil edildiğinde mükemmel bir tane inceltici işlevi görebilir. Ancak alüminyum veya manganez ile kararlı bileşikler oluşturduğundan bu alaşım elementleri ile kullanılamaz. Ayrıca eriyikte bulunan demir, karbon, oksijen ve hidrojen ile kararlı bileşikler oluşturur [45].

2.1.1.1. Mg Alaşımlarının Sınıflandırılması

Her alaşım, ana alaşım elementlerini gösteren harflerle ve ardından bu elementlerin yüzdelerini temsil eden rakamlarla etiketlenmiştir. Mg alaşımlarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerin temsili harfi, Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM B275) tarafından verilmiştir ve bu harfler alaşımları tanımlamak için kullanılmaktadır [45].

AZ61- Bu alaşımda **A**; Alüminyum, **Z**; Çinko elementini temsil etmektedir. **61** ise birinci elementin (Alüminyum) ağırlıkça yüzdesinin 6, ve ikinci elementin (Çinko) ağırlıkça yüzdesinin 1 olduğunu ifade etmektedir.

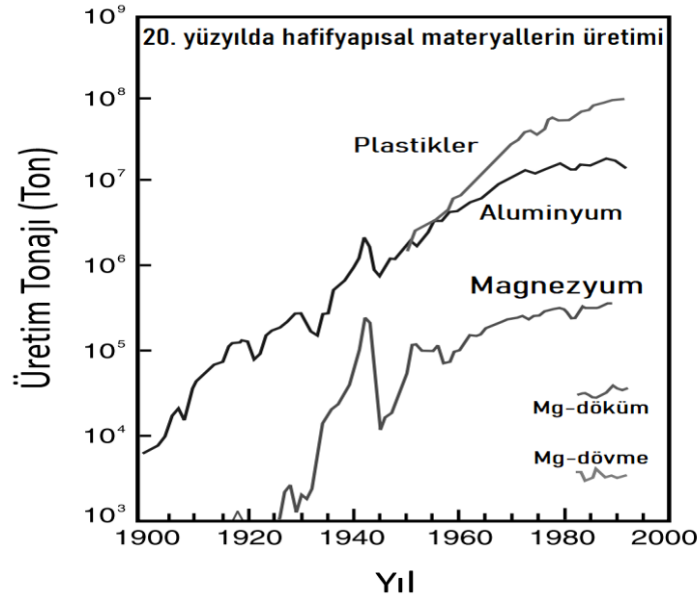
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI

Mg'nin yoğunluğu (1.74 g/cm^3), alüminyumun yoğunluğundan (2.7 g/cm^3) %36, çeliğin yoğunluğundan (7.9 g/cm^3) %78, titanyumun yoğunluğundan (4.5 g/cm^3)

%61,3 daha hafiftir. Mg, alaşım maddesi olarak kullanıldığında alüminyumun mekanik, imalat ve kaynak özelliklerini iyileştirmektedir. Mg ve alaşımları enerji verimliliği sağlayan malzemeler olarak uçak ve araba yapımında oldukça işlevseldirler. Savunma [3], havacılık [2], otomotiv [4,8] gibi yüksek yakıt tasarrufu, daha yüksek menzil kat edebilme kabiliyeti ve zararlı gaz salınımının düşürülmesi gereken alanlarda, son yılların en çok tercih edilen, vazgeçilmez yapı malzemeleri arasında yerini almıştır [8,26,53].

Yapısal uygulamalar için malzeme seçimi oldukça karmaşık bir iştir. Bileşen geometrileri, yükleme koşulları, imalat süreci, malzeme özellikleri ve maliyeti dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Eğme gerilmesi, otomotiv yapılarında birincil yükleme koşuludur. Bu nedenle, hesaplamalar eğme mukavemetine dayanmalıdır. Mg alaşımının (AZ91) kalınlık ve kütle oranı, benzer eğilme mukavemeti elde etmek için çeliğin 1,67 ve 0,39 katı olmalıdır. AZ91, AZ31 ve AZ61, otomobillerde en çok kullanılan Mg alaşımlarıdır. Mg alaşımlarının AZ serisine uygun takviyenin eklenmesi, mukavemeti ve sünekliği geliştirmiştir. AZ61 ve AZ80 daha yüksek mukavemete ancak daha az ekstrüde edilebilirliğe sahiptir. Daha yüksek mukavemetli alaşım ZK60, yarış arabaları, bisiklet parçaları için tasarlanmıştır, ancak ekstrüzyon hızı çok düşüktür. Mg alaşımları üzerinde şiddetli plastik deformasyonun uygulanması, mekanik mukavemeti büyük ölçüde iyileştirmiştir. Al₂O₃, WS₂, TiC ve SiC ile takviye edilmiş AM30 (daha yüksek dayanımlı uygulamalar) ve ZE20 (daha yüksek süneklik uygulamaları) gibi yeni Mg kompozitler daha yüksek bir ekstrüzyon hızı ve iyi mekanik özelliklerini koruyarak geliştirilmektedirler. Mg bazlı kompozitlerde alüminyum içeriğinin varlığı, mukavemeti, sertliği ve korozyon direncini artırır ancak sünekliği azaltır. %5-6 civarında takviye edilen alüminyum içerikleri, optimum mukavemet ve süneklik sağlar. Çinko, alüminyum alaşım elementi gibi korozyon direncini artırmaktadır ancak diğer taraftan sünekliği azaltmaktadır. Manganez çekme dayanımını etkilemez ancak akma dayanımını artırır [46,54].

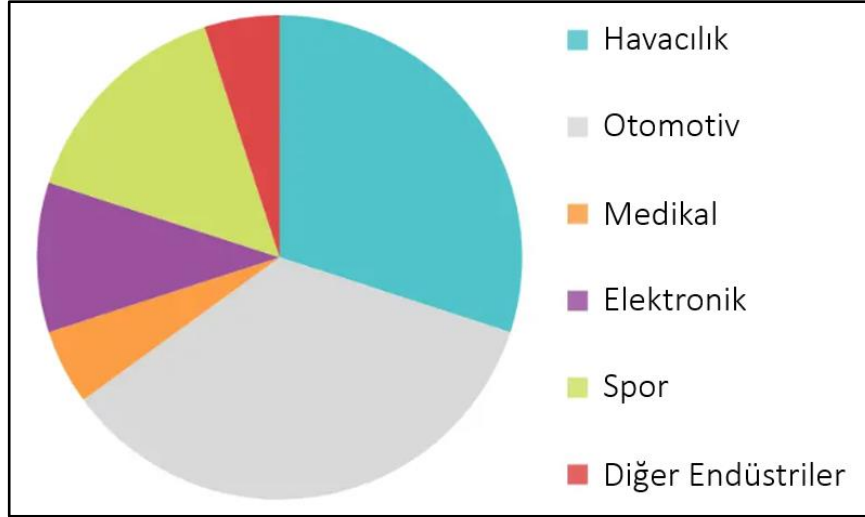
Mg'nin yıllara göre diğer endüstriyel olarak kullanılan hafif ve yapısal elementlerle birlikte üretim miktarlarındaki değişim Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Endüstriyel olarak kullanılan hafif ve yapısal elementlerin yıllara göre üretim miktarları [55].

Mg; araba koltukları, bagaj, dizüstü bilgisayarlar, kameralar ve elektrikli el aletleri gibi hafif olmasının avantajından yararlanan ürünlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Mg alaşımlarının yaygın kullanıldığı Endüstriyel alanlar aşağıda verilen beş grup altında toplanabilir;

1. Otomotiv Endüstrisi
2. Havacılık ve Uzay Endüstrisi
3. Tıp Endüstrisi
4. Spor Endüstrisi
5. Elektronik Endüstrisi [56].



Şekil 2.4. Mg'nin yaygın olarak kullanıldığı sektörler [56].

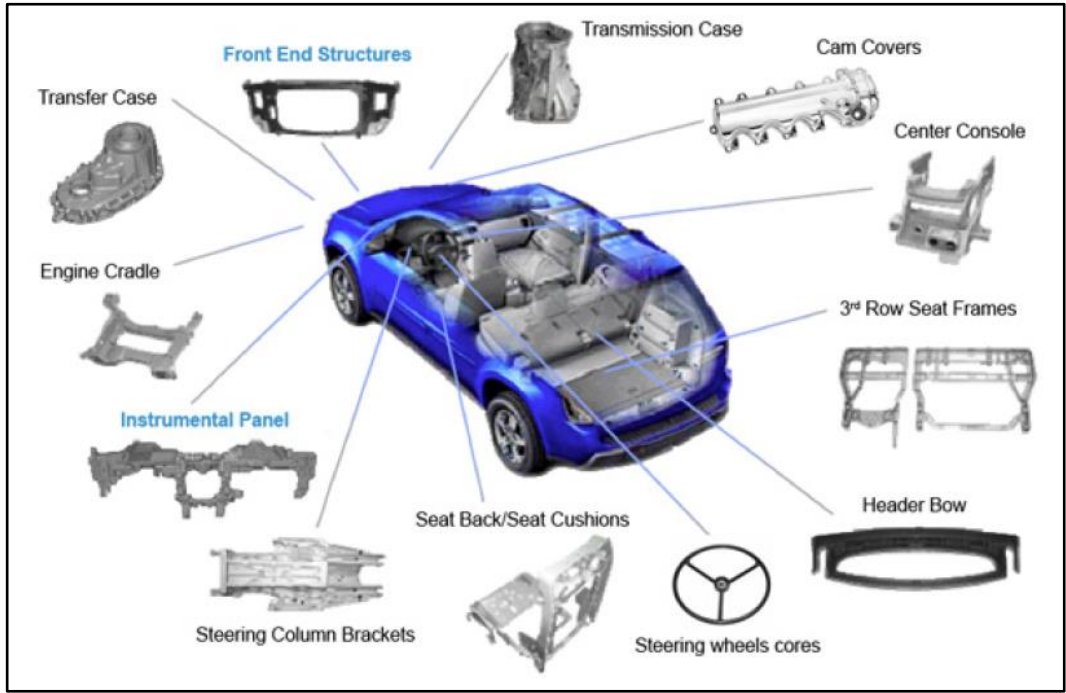
Şekil 2.4'te Mg'nin yaygın olarak kullanıldığı sektörlerin kullanım oranları verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, Mg ve alaşımları hafifliğin büyük önem arz ettiği özellikle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları sektöründe oldukça büyük bir paya sahiptir [56].

2.2.1. Otomotiv Endüstrisi

Araçlarda yapısal hafiflik, yakıt tasarrufunu etkileyen en önemli kriterdir. Bu nedenle araç ağırlıklarının azaltılması, otomotiv üreticilerinin en temel hedeflerinden birisidir. Mg'nin mekanik özelliklerinin otomotiv sektöründeki ihtiyacı karşılayacak nitelikte olması, son yıllarda tercih edilen bir üretim malzemesi olmasına neden olmaktadır. Yüksek dayanımı ve hafifliği ile tarihte ilk olarak özellikle yarış arabalarında kullanılmaya başlanmıştır. 1920'li yıllardan bu yana, otomotiv üretiminde Mg ve alaşımlarının kullanımı, birçok otomobil komponentinde varlığını artırmıştır. Bir metal seçerken enerji verimliliği, artan performans ve dayanıklılık da önemli kilometre taşlarındandır. Mg ve alaşımları, yapısal ve işlevsel özelliklerden taviz vermeden otomobil ve çeşitli taşıtların ağırlıklarını önemli ölçüde azaltabilmektedirler. Otomobilin toplam ağırlığındaki azalma, enerji ve yakıt tüketimini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda aracın performansını artırmakta ve zararlı sera gazı emisyonlarını da düşürmektedir. Otomobil ağırlığının 100 kg azaltılması, 100 km'de

0,4 litreye kadar yakıt tasarrufu yapmayı ve atmosfere daha az miktarda zararlı gaz salınımı yapmayı sağlamaktadır [57].

Audi, Jaguar, Mercedes-Benz, Ford, Fiat ve Kia gibi birçok büyük otomotiv üreticisi, araçlarında çelik ve alüminyumu, Mg alaşımlarıyla değiştirmiştir [58]. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.5) otomotivde Mg kullanımına ait örnekler verilmiştir.



Şekil 2.5. Bir otomobilde Mg kullanımına ait örnekler [59].

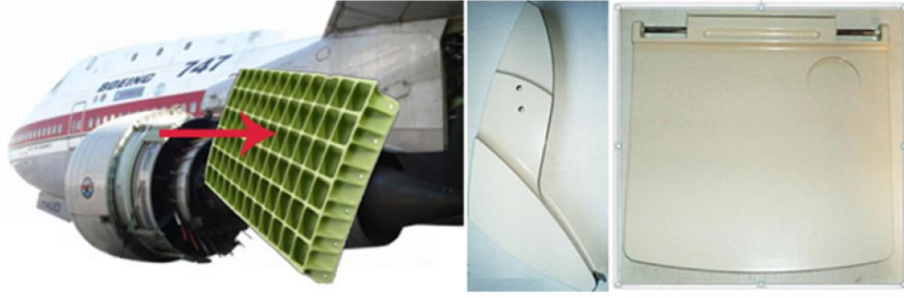
Dünya çapında tanınmış olan büyük otomotiv firmalarının ürettikleri araçlardaki Mg kullanımları Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Otomotiv endüstrisinde Mg alaşımı uygulamaları [58].

Komponent	Üreticiler
Şanzıman kutusu	Volkswagen Audi, Mercedes Benz, BMW, Ford, Jaguar, Daewoo, Volvo, Porsche
Ön panel	GM, Chrysler, Ford, Audi, Toyota, Hyundai, Honda
Silindir üst kapağı	Dodge, Honda, Alfa Romeo, Daewoo, BMW, Ford, Isuzu, Volvo, Hyundai, Kia
Direksiyon sistemi	Ford, Chrysler, Toyota, BMW, Lexus, GM, Hyundai, Kia
Koltuk bileşenleri	GM, Mercedes Benz, Lexus, Hyundai, Kia
Motor Bloğu	BMW
Jantlar	GM, Toyota, Alfa Romeo, Porsche

2.2.2. Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Havacılık endüstrisinde de otomotiv endüstrisinde olduğu gibi yakıt kullanım verimi ve artan emisyon değerlerini azaltma ihtiyacı sebebi ile ağırlık azaltmak, en kritik amaçlardan biridir. Bir uçağın toplam ağırlığının azaltılması, yakıt tüketimini azaltılmasını sağlayacak ve uçağa daha düşük operasyon maliyeti ile daha uzun mesafe görevi yerine getirebilme kabiliyeti verecektir. Mg ve alaşımlarının havacılık sanayisindeki kullanımı bu sanayide uzun bir geçmişe sahiptir. Yıllar boyunca Mg esaslı malzemeler sivil ve askeri uçaklarda oldukça yaygın olarak kullanılmışlardır. Uçaklarda, gövde kaplaması ve motor bileşenleri, kapı, kanatlar, şanzıman, şanzıman kalıpları, tekerlekler ve alt takımdan ön panellerine ve koltuk bileşenlerine kadar çok çeşitli Mg alaşımı parçalar kullanır [60]. Örneğin, Boeing 747 uçağı yaklaşık olarak 1200 Mg parçadan oluşur. Uçak endüstrisindeki Mg alaşımlarının uygulamaları Şekil 2.6'de ve Şekil 2.7'da sunulmaktadır.

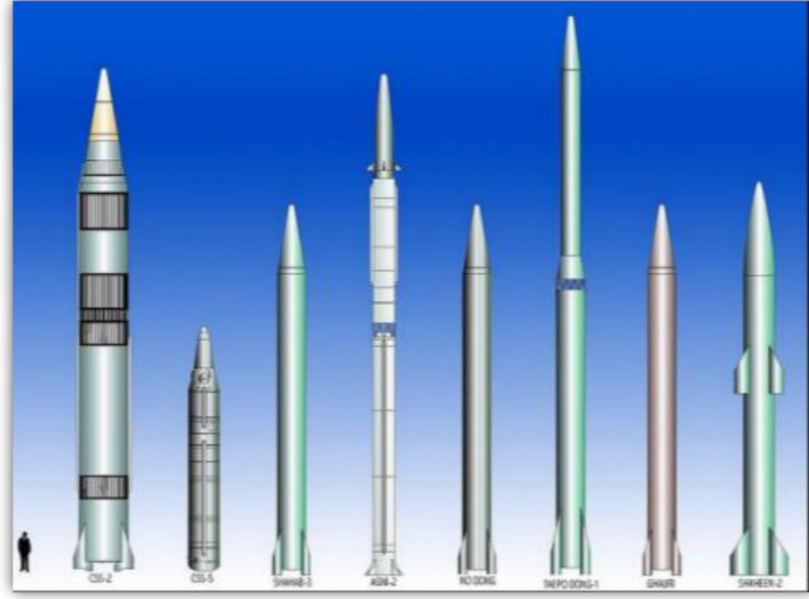


Şekil 2.6. Mg alaşımları için uygulama örnekleri, Boeing 747'de: Kanat ve koltuk bileşenleri [60].



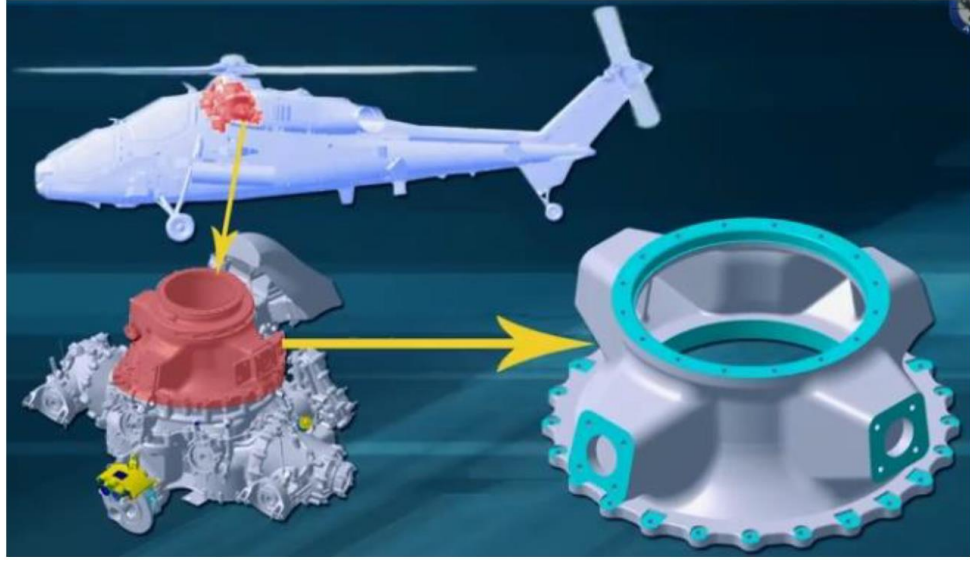
Şekil 2.7. Mg alaşımlarının uçak yapımında kullanımı [60].

Askeri havacılıkta Mg ve alaşımları, hafifliği ve yüksek sıcaklığa dayanabilirliği ile Mg uygulamalarının öncelikli olarak uygulandığı alanlar olmuştur. Askeri havacılıkta kullanılan uçakların ve füzelerin en önemli rekabet özelliğinden birisi, azami menzilleridir. En hafif yapısal metal olan Mg, özellikle savaş uçakları ve uzun menzilli balistik füzelerin üretiminde kullanılmıştır [61]. Şekil 2.8'da, üretiminde Mg alaşımı kullanılan orta menzilli balistik füzeler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Üretiminde Mg alaşımı kullanılan balistik füzeler (En solda, bir insanın füzelere kıyasla boyutu gösterilmiştir) [61].

Kalkış ağırlığını azaltmak için hafif malzemelerin gerekliliği nedeniyle uzay araçlarında ve füzelerde Mg yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu, yüksek spesifik mekanik özellikleri, imalat kolaylığı ve (i) yüksek sıcaklıklara, (ii) ozona maruz kalmaya ve (iii) yüksek enerjili parçacıkların ve küçük meteorların bombardımanına dayanma kabiliyeti gibi diğer çekici özelliklerle birleştirilebilmektedir. Bunun örneği olarak Titan, Agena ve Atlas kıtalararası balistik füzelerinde büyük miktarda Mg (levha şeklinde) kullanılmış olması gösterilebilir [62]. Şekil 2.9'de milli olarak üretilmiş olan T-129 ATAK helikopterine ait Mg alaşımdan üretilmiş şanzıman dişli kutusu üst gövdesi verilmiştir.



Şekil 2.9. Atak helikopterine ait dişli kutusu gövdesi [61].

2.2.3. Tıp Endüstrisi

İnsan vücudu mineral olarak bir miktar Mg mineraline ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında kırıkları iyileştirmek için biyolojik olarak insan vücudunda çözülebilen metal implantlarda bir diğer Mg alaşımı kullanılan sektördür. İnsan vücudunda bulunan eser elementlerden (kalsiyum, çinko ve silikon gibi) birisi olan Mg'nin alaşımlarından yapılan implantlar ile kemik kırığı iyileşene kadar implant yerinde kalmakta, iyileşme tamamlandıktan sonra doğal olarak çözünebilmekte ve kan dolaşımınca emilebilmektedir. Mg alaşımları, ortopedik implantlardan veterinerlik uygulamalarına kadar tıbbi cihaz sektöründe fırsatlar sunmaktadır. Son zamanlarda alaşımlar, iskele olarak bilinen kardiyovasküler stentlerde kullanılmaya başlanmıştır [63]. Aşağıdaki Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'te Mg alaşımından üretilmiş olan, insanda damar tıkanıklıklarını açmak için kullanılan stent ve ortopedik implantlara ait örnekler verilmiştir.



Şekil 2.10. Mg alaşımından üretilmiş stent [63].

Polimer malzemeler birkaç yıldır biyolojik olarak emilebilir bir seçenek olarak kullanılmaktadır; ancak Mg alaşımları artık daha gelişmiş bir alternatif sunmaktadır. Polimerlerin nispeten düşük mukavemeti ile karşılaştırıldığında, Mg, doğal kemiğe çok daha yakın bir gerilme mukavemeti göstermektedir [64].



Şekil 2.11. a) Damar tıkanıklığı tedavisinde kullanılan stentler ve b) ortopedik implantlar [65].

2.2.4. Spor Endüstrisi

Mg, hafifliğinin yanı sıra titreşimi iyi sönümleyebilmesi, spesifik mukavemeti ve karmaşık şekillerde üretilebilmesi nedeniyle, son yıllarda spor ve eğlence endüstrisinde uygulanan başlıca malzemelerden biri haline gelmiştir. Özellikle bisiklet parçalarından ön maşa, pedal, kadro, fren ekipmanları, tekerlek veya dişli plakası Mg alaşımlarından üretilmekte ve aynı zamanda üretimleri geliştirme sürecindedir. Mg alaşımı veya kompozitlerinden üretilen bisikletler, şok ve titreşimleri absorbe edebilme kabiliyetleri sayesinde, kullanıcılara daha az enerji harcayabilecekleri, daha konforlu, daha eğlenceli bir sürüş sunmaktadırlar. Mg'li spor ekipmanlarının son zamanlardaki uygulamaları arasında bisiklet parçalarının yanı sıra patenci altlığı, beyzbol sopası, ok yayı gövdesi, golf topu, snowboard, kayak botlarının kemer kancaları, kano ve rafting küreği, olta kasnak mekanizması, scooter ve masa tenisi raketi, vb. yer almaktadır [66]. Spor ekipmanlarında Mg kullanımına ait örnekler aşağıdaki Şekil 2.12'te verilmiştir.



Şekil 2.12. Spor ve eğlence ekipmanlarında Mg alaşımı uygulaması [66].

2.2.5. Elektronik Endüstrisi

Mg, özellikle cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tabletler vb. gibi iletişim cihazları ve elektronik bileşenler için çok uygundur. Mg alaşımları ve kompozitleri, hafifliği (ağırlık azaltımı sağlaması sayesinde) ile taşınabilir cihazların kullanılabilirliğini ve konforunu artırmakla kalmaz, yerini aldığı plastiklere nazaran çok daha güçlü ve dayanıklıdır. Mg, hafif ve dayanıklılığının yanı sıra, ısı transferi ve dağılımı açısından da daha iyidir. Elektronik cihazların birçoğu, karmaşık şekillere sahip parçalara veya kasalara ihtiyaç duyar. Bu talebi Mg ile karşılamak mümkündür [45]. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’da elektronik alanındaki Mg’nin uygulama örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.13. Mg’nin elektronik alanındaki kullanımları [45].



Şekil 2.14. Nikon D4 (2012) Mg alaşımı fotoğraf makinesi kasası [67].

Mg, bu son derece hassas olan teknolojik cihazları korumak için yüksek mukavemet ve dayanıklılık kabiliyetleri sayesinde elektronik endüstrisini daha kullanışlı ve hafif hale getirebilmektedir. Mg esaslı malzemelerin gelecekteki uygulama alanları tamamen bu alanda çalışan araştırmacı mühendis ve bilim insanlarının vizyonuna ve hayal gücüne bağlıdır ve sınırsızdır.

BÖLÜM 3

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT YAPISI

Kompozit malzemeler, bir malzemedeki bulunmayan özellikleri üreten iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulur ve bunlar, mukavemet ve sertlik gibi daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir ürün üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitler matris ve takviye olmak üzere iki malzeme ile elde edilir. İyi işlenebilirlik, tokluk, yüksek sertlik ve aşınma direncinden oluşan bir kompozit malzeme üretmek için iki malzeme birbirine bağlanır. Matris malzemesi, gerilimi dağıtmak ve takviye malzemesini korumak için kullanılır. Takviye malzemesinin rolü ise, kompozit malzeme için yüksek mekanik özellikler sağlamak ve matrisi uygun yönlerde güçlendirmektir. Kompozit malzemenin özellikleri, takviye ve matris davranışına, takviye yapısına (lifler, parçacıklar) ve kullanılan matris ve takviye miktarına bağlıdır [68].

Kompozit malzemeler, hafiflik, esneklik, yüksek korozyon direnci, darbe dayanımı gibi avantajlı ve iyi özelliklere sahiptir. Bu özellikler, kullanılacağı sektörün ihtiyaç duyduğu malzemelere göre gerekli özelliklere sahip matris ve takviyeler seçilerek özelleştirilebilir. Kompozit malzemelerin sağladığı bu avantajlar; otomotiv, havacılık, uzay vb. gibi çeşitli alanlardaki uygulamalarda geleneksel malzemelerin yerini alan bir seçenek olarak değerlendirilmelerinin ana nedenidir [69–71].

Matris, bileşimin %50'den fazlasına sahip ana bileşendir ve takviye, matris malzemesinde olmayan özelliklere sahip olması gereken malzemedir. Takviyeli malzemeler, partikül veya fiber olmak üzere iki ana formda olabilir, bu nedenle kompozitler takviye tipine göre adlandırılır, yani partikül kompozitler ve lifli kompozitler. Kompozitlerde, matris en yüksek ağırlık yüzdesine sahiptir; bu nedenle,

sürekli olarak adlandırılırken, takviye malzemelerinin süreksiz bir fazda olduğu bilinmektedir.

Matris ve takviye malzemesi arasındaki arayüzey sınırı, iyi mekanik özelliklerin elde edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Daha iyi bir arayüz, matris ve takviye arasındaki ayrışmayı önleyerek bağlanma gücünü artırabilir. Örneğin, iki fazın termal genleşmesi arasındaki fark, tercih edilmeyen bir şekilde çatlak oluşumunun artmasına neden oluşturur. Kompozitlerin ıslatılabilirliğini artırmak için iyi bir arayüzey oluşturmak gerekmektedir ve bunu oluşturmanın üç yolu vardır; takviye malzemesinin bileşimi, metal matrise dahil edilen ek metal alaşım elemanları ve seramiğin yüzeyini değiştirmek. Ayrıca matris ile takviye arasındaki temas alanında artış sağladığından, takviye boyutlarını küçültülerek güçlü bir arayüzey elde etmek mümkün olabilmektedir [68].

3.1.1. Matris Yapısı

Matrisin anlamı içinde barındıran, çevreleyen veya miktarca fazla olan anlamlamalarına gelebilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde de kuşatan, çevreleyen ana yapı olarak matrisin birincil amacı, kohezyonlu ve yapışkan doğası sayesinde takviyeyi bir arada tutmaktır. Matris kompozite, süreksiz takviyeli kompozitler için gerekli olan sağlam bir yapı sağlar. Çoğu zaman, takviye lifleri yapısal açıdan daha güçlü ve sert olduğundan, matris kompozitte zayıf bir halkadır. Ayrıca matris, kompozitin enine özelliklerini, katmanlar arası mukavemetini ve yüksek sıcaklıklardaki davranışını kontrol eder. Matris, dış yükten takviye malzemesine etkili bir şekilde yük aktarımı sağlayarak takviye dayanım özelliğinin kullanılmasını sağlar [68]. Kompozitler matris cinsine bağlı olarak 3 sınıfa ayrılırlar: Polimer, metal ve seramik matrisli kompozitler.

3.1.2. Takviye Elemanı

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının aşağıdaki özellikleri göstermesi beklenir [68]:

- Düşük yoğunluk

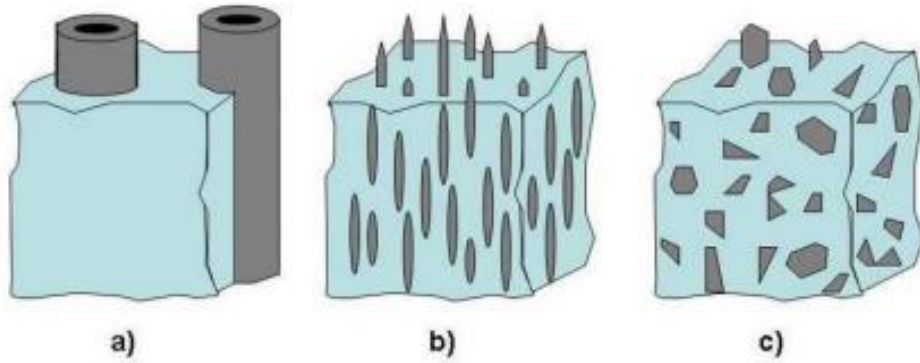
- İyi mekanik ve kimyasal özellikler
- İyi termal kararlılık
- Yüksek basma ve çekme dayanımı
- Yüksek Young modülü
- Ekonomik verimlilik

Optimum mekanik özellikler için bir kompozitte arayüzün sağlam olması ve uygun kalınlıkta bir arayüz tabakası oluşması gerekir. Genel olarak takviyeler, sürekli takviye ve aralıklı takviye (parçacıklı) olarak sınıflandırılırlar.

Farklı takviye türleri:

- 1) Sürekli fiber takviye
- 2) Süreksiz kısa elyaf takviyesi
- 3) Parçacık takviyesi

Şekil 3.1’de Kompozitlere ait farklı takviye çeşitleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozitlerdeki takviye çeşitleri: a) sürekli fiber takviye, b) Süreksiz kısa elyaf takviyesi, c) Parçacık takviyesi [72].

Metal matrisli kompozitler, bir element veya alaşım matrisinden oluşan modern ve iyi geliştirilmiş hafif malzemelerdir. Bu matris iki fazdan oluşur; ikincisi yüzeye sabitlenir ve daha sonra bazı geliştirmeler sağlamak için dağıtılır. İkinci fazın boyutuna, şekline ve miktarına bağlı olarak kompozit özelliği değişir. Kompozit, birleşik metalik ve seramik özelliklerinden dolayı mükemmel faydalara sahiptir ve buna bağlı olarak,

iyileştirilmiş fiziksel ve mekanik özellikler sağlar. Spesifik bir mukavemet, spesifik sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci ve elastik modül gibi özelliklerini geliştirmek için güçlü seramik alımının metal bir matrise entegre edildiği yeni nesil mühendislik malzemelerini temsil eder. Burada kompozitler, matris alaşımlarının süneklik ve tokluk gibi metalik özellikleri, takviyelerin yüksek mukavemet ve yüksek modül gibi seramik özellikleriyle birleştirilir, böylece kesme ve basmada daha fazla mukavemet ve daha yüksek servis sıcaklığı yetenekleri sağlar. Bu özellikler, kompozitlerin bilimsel, teknolojik ve ticari öneminin anlaşılmasına yardımcı olur [69].

MMK arasında Mg Matrisli Kompozitler son yıllarda havacılıktan uzaya, elektronikten spora birçok alanda giderek artan bir talep görmektedir ve gelecekte bu malzemeyi büyük oranda kullanımlarına dahil etmek için sektörler birbirleriyle yarışmaktadırlar. Günümüzde Mg matrisli kompozitler alanında çalışan araştırmacı sayısı ciddi anlamda artmış ve gün geçtikçe de artmaya devam etmektedir.

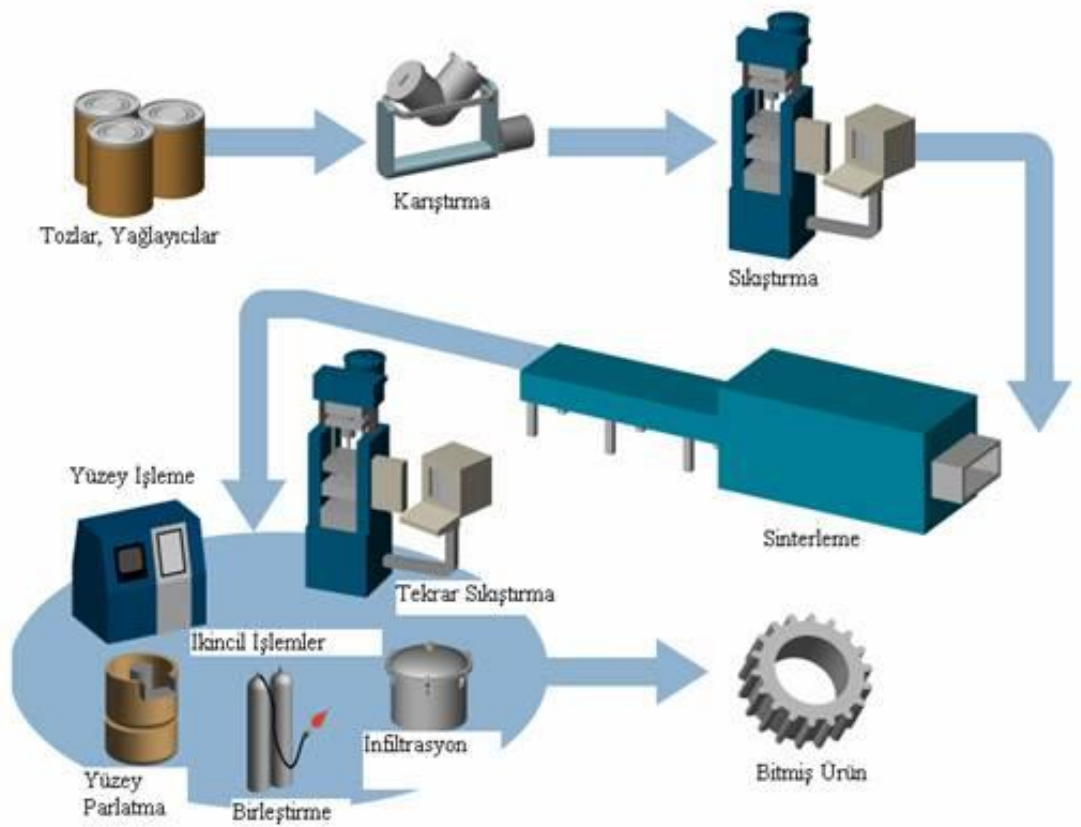
3.2. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Mg kompozitlerini başarılı bir şekilde üretmek için çok çeşitli üretim yöntemleri denenmiştir. Mg kompozitlerin üretiminde, seçilen üretim tekniği oldukça büyük önem arz etmektedir. Üretim yöntemi, elde edilen nihai ürünün mikroyapı özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Mg matris kompozitlerin üretim teknikleri, katı faz ve sıvı faz tekniği olarak kategorize edilebilir. En yaygın kullanılan katı faz üretim teknikleri; toz metalurjisi ve sürtünmeli karıştırma, sıvı faz teknikleri ise; difüzyonla bağlama, sıvı-metal infiltrasyonu, püskürtme, karıştırma döküm, ergitme biriktirme, reaktif yöntemi (In-situ), kum döküm, sıkıştırılmalı döküm olarak sıralanabilir [45].

3.2.1. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, alüminyum ve Mg metal matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olan bir katı faz üretim tekniğidir. Çok çeşitli karmaşık yapı ve farklı geometrilere sahip parçalar kolaylıkla üretilebilmektedir. Bu özelliği geleneksel üretim yöntemlerine üstünlük sağlamaktadır. Toz metalurjisinde daha az sıcaklık gereklidir ve bu durum maliyeti bir miktar düşürmektedir. Diğer yöntemlere nazaran

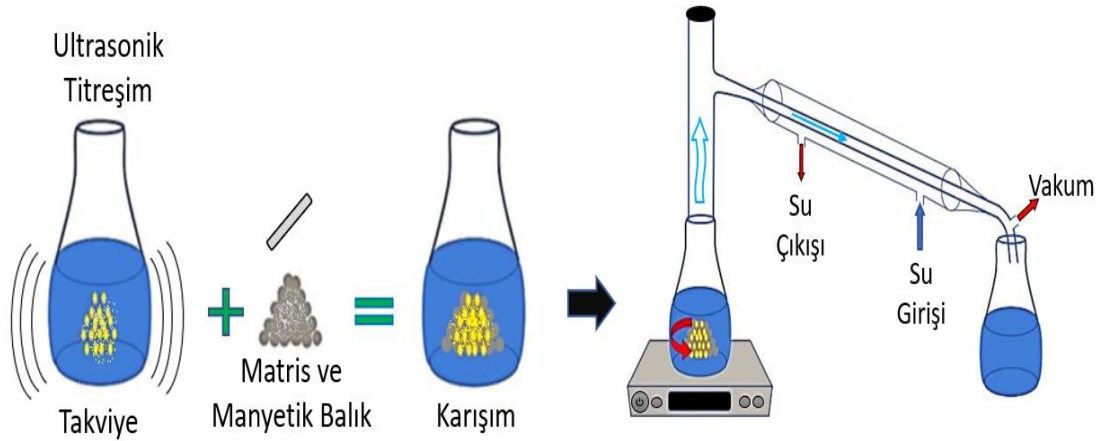
erime noktasının altındaki sıcaklıklarda üretim sağlanabilmesinin getirdiği faydalardan bir diğer önemli olanı ise, Mg ve takviye elemanı arasında oluşabilecek muhtemel reaksiyonları azaltmasıdır. Toz metalürjisindeki üretim adımları şu şekildedir; tozların homojen olarak karıştırılması, tozların kalıp içerisinde sıkıştırılması ve devamında fırında veya tercihen koruyucu gaz atmosferi altında sinterlenmesidir. Sinterleme sonrası soğumaya bırakılan ürün, soğuduktan sonra kalıptan çıkarılır. İkincil işlemler daha hassas ölçülü parça elde etmek için veya son ürünün şeklinde değişiklik yapmak için kullanılabilir. Toz metalürjisi üretim aşamaları aşağıdaki Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu üretim şekli geleneksel toz metalürjisi aşamalarını göstermektedir. Soğuk pres ve sinterleme işlemleri, aynı anda ve tek aşamada sıcak pres cihazı ile de gerçekleştirilebilmektedir [17,73].



Şekil 3.2. Toz metalürjisi üretim aşamaları [74].

3.2.1.1. Karıştırma Yöntemleri:

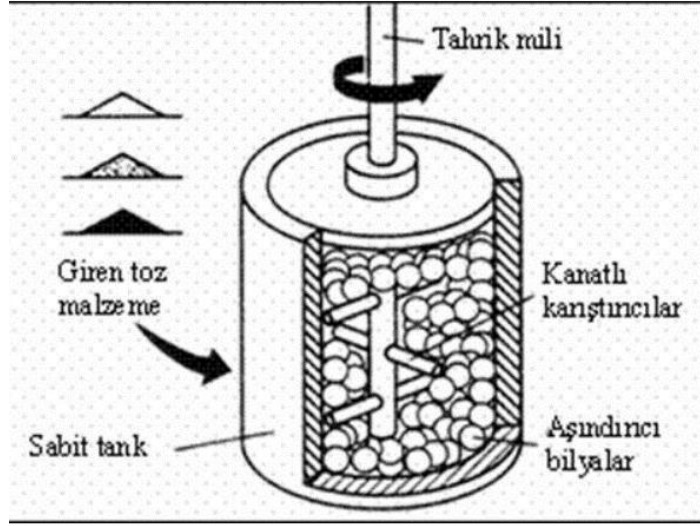
Toz metalurjisi ile üretimde vakum destilasyon yöntemi, homojen toz karışımı elde etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir [75,76]. Bu yöntem ile belirli bir devirde ve hızda karıştırma işlemi yapılır. Karışımın bulunduğu kap içerisine manyetik metal malzemeden üretilmiş karıştırıcı eleman (manyetik balık) bulunur. Bu eleman cihaz tarafından oluşturulan manyetik dönme etkisi ile sürekli karışım içerisinde döner ve tozların karıştırılmasını sağlar. Aynı zamanda etanolü buharlaştırmak için sisteme cihaz tarafından ısı verilir ve sıcaklık artırılır. İşlem sırasında buharlaşıp soğutma tübünden geçen etanol, yoğunlaşarak tekrar diğer kaptaki sıvı halde toplanır. Toz karışımı homojen ve kuru halde elde edilir. Vakum destilasyon düzeneği Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Vakum destilasyon yöntemi ile karıştırma yöntemi [75].

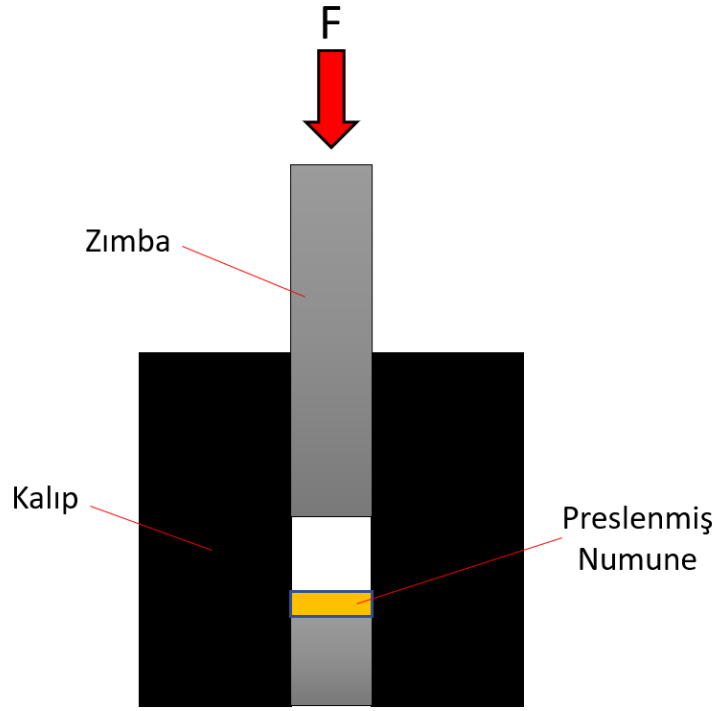
Presleme öncesi yaygın olarak kullanılan karıştırma yöntemlerinden biri de mekanik alaşımlamadır. Mekanik alaşımlama, tekrarlanan soğuk kaynak ve yüksek enerjili metal bilyelerle parçacıkların kırılmasını içeren bir katı hal yöntemidir [77]. Bu yöntem yüksek takviye içeriğine sahip Mg matrisli kompozitler üretir ve mekanik enerji uygulayarak faz dönüşümüne yol açar [78,79]. Mekanik alaşımlama yöntemi, matris ve takviye tozlarının mekanik alaşımlama cihazı içerisindeki kaba yerleştirilmesi ile başlar. Cihazın dakikada belirli bir devirde ve hızda dönmesi için gerekli ayarlamalar yapılır ve cihaz çalıştırılır. Cihazın toplam çalışma süresi, karışımı

yapılacak tozların cinsine, miktarına ve bazı çalışma durumlarına göre değişkenlik gösterebilir. Bu parametreler araştırmacılar tarafından belirlenir. Mekanik alaşımlama yöntemini gösteren Şema Şekil 3.4'te verilmiştir.



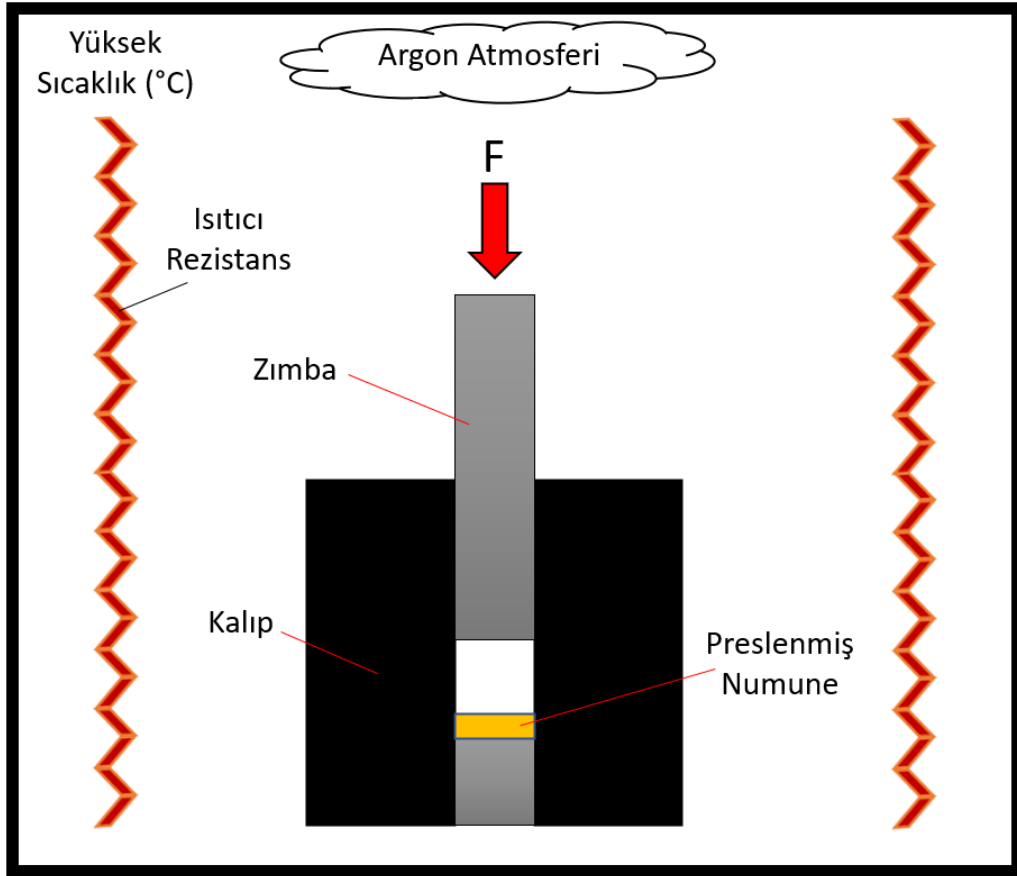
Şekil 3.4. Mekanik Alaşımlama yöntemi [80].

Metal matris ve takviye malzemesi mekanik olarak harmanlanır ve bunu yüksek basınçlar altında gerçekteştirilen soğuk presleme takip eder. Sonraki katı halde atomların difüzyonunu indükleyen sinterleme işlemidir. Bu, kompozit içinde daha az gözeneklilik ve mekanik entegrasyonu sağlar. Zaman (işlem süresi), sinterleme sıcaklığı, ısıtma hızı ve çevre koşulları gibi faktörler, sinterlemenin verimliliğini etkiler. Şekil 3.5'te soğuk presleme Şeması gösterilmiştir. Toz karışımı, soğuk pres ile yüksek basınç kuvveti uygulanarak preslenip yekpare hale getirildikten sonra, koruyucu gaz atmosferi özelliğine sahip fırında sinterlenir. Sinterleme işlemi yapıldıktan sonra ürün soğumaya bırakılır ve soğutma işlemi sonrası nihai ürün elde edilir. Bu ürün doğrudan kullanıma hazırdır. İstenirse ikincil işlemlere tabi tutularak kullanım alanına göre farklı işlemler yapılabilir.



Şekil 3.5. Soğuk pres tekniğinin gösterimi.

Oldukça yaygın olarak kullanılan bir diğer üretim tekniği ise sıcak pres ile üretim tekniğidir. Bu sistemde sinterleme ve presleme aşamaları eş zamanlı olarak uygulanır. Bu tekniğin üretilen numune özelliklerindeki avantajları oldukça etkilidir. Bu avantajlardan en önemli olanları; porozitenin azalması ve nihai ürün yoğunluğunun artması, dolayısıyla mekanik özelliklerinin de artmasıdır [81,82]. Şekil 3.6'da sıcak presleme tekniğinin şeması verilmiştir.

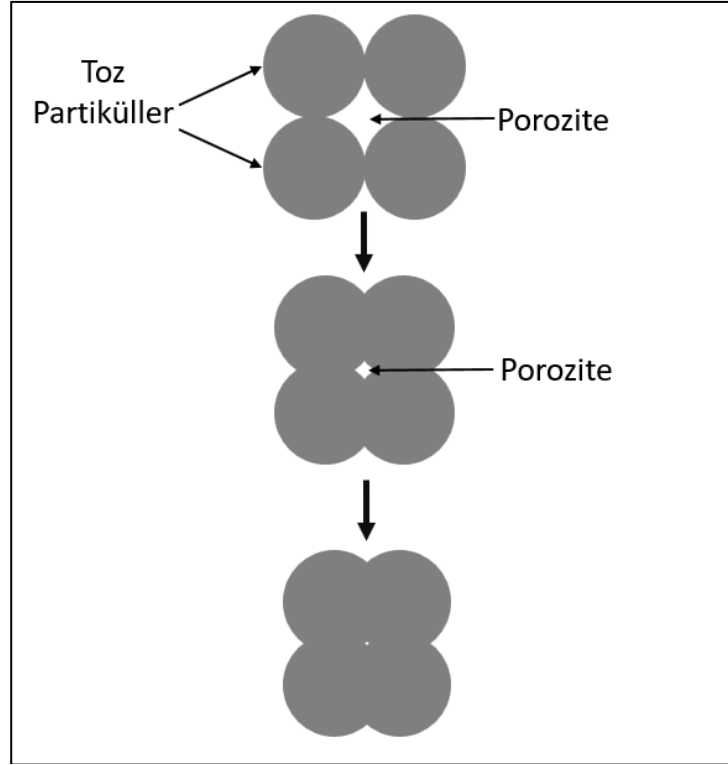


Şekil 3.6. Sıcak pres tekniğinin gösterimi.

Sıcak pres tekniği geleneksel sinterlemeye kıyasla önemli bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlarını kısaca şu şekilde sıralayabiliriz: İnce taneli bir yapı korunurken yoğun numunelerin üretilmesini sağlar. Yoğun, ince taneli bir malzemenin üretimi, geleneksel sinterlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında sıcak preslenmiş malzemenin fiziksel özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağlar. Bu, özellikle geleneksel sinterleme ile yüksek yoğunluklar elde etmek için saflığı ve tane büyümesini azaltan ilaveler yapmanın gerekli olduğu saf malzemeler için geçerlidir. Ayrıca, sinterleme büzülmeleri için izin verilmesi gerekmeden nihai şekle yakın presler yapılabilir ve çok sayıda pahalı ve zaman alan ikincil işlemler önlenir. Bu faktörler, yüksek saflıktaki maddelere uygulanabilen ve yakın toleranslarda numuneler üretebilen bir işlemlerle, sinterlenmiş malzemenin daha üstün fiziksel özelliklere sahip bileşenlerin üretilmesi olanağını sağlar [83].

Dezavantajları ise, kullanılacak olan kalıp malzemesi çok sınırlıdır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olabilmesi için genellikle grafit kalıp tercih edilmektedir. Grafit kalıbın mukavemeti düşük olduğu için yüksek basınçlara çıkmanıza olanak yoktur ve kullanılabilen basınçlar normalde 1-2 ton/inç² ile sınırlıdır [83,84]. Kalıp aşınması sorunu sıklıkla karşılaşılan oldukça önemli bir sorundur ve yüksek oranda zımba ve kalıp değişiminin gerekli olmasıyla sonuçlanır. Bu aşınma aynı zamanda, normalde makineyle işlenerek yakın toleranslara indirgenen zımba ve kalıp duvarı arasında eriyik malzemenin sızma sorununu da artırabilir. Sıklıkla karşılaşılan diğer bir sorun da imal edilen malzemenin zımbalara ve kalıp duvarına yapışmasıdır. Bu şekilde üstesinden gelinmezse, adhezyon, soğuma sırasındaki diferansiyel büzölmeler nedeniyle numunenin çatlamasına neden olabilir. Ayrıca çeşitli uygulamalarda numune, presleme işlemi sırasında meydana gelen reaksiyonların bir sonucu olarak karbon ile kirlenmiş olabilmektedir [84].

Yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle sinterleme işlemi altındaki toz partiköller birbirlerine yapışıp kaynaşarak bütün ve tek bir parça halini alırlar. Sıcak pres cihazı ile sinterleme işlemi sırasında kompozit toz partiköllerinin temsili gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Sıcak pres cihazında eş zamanlı sinterleme ve presleme işlemi esnasında kompozit toz partikül tanelerinin temsili gösterimi [68].

3.2.1.2. Toz Metalurjisinin Avantajları

1. Toz yapım fiyatının yüksek olmasının yanı sıra teknik olarak malzeme kaybı da yoktur. Oluşturulan bileşenlerin tümü üretimlerde kullanılabilir.
2. Ürün bileşiminin kontrolü ve yönetimi daha kolaydır.
3. Üretim hızı yüksektir.
4. Karmaşık şekilde ürünler üretilebilir.
5. Yoğunluk, gözeneklilik ve parçacık boyutu gibi çok çeşitli özellikler, bazı özel işlevler aracılığıyla elde edilebilir.
6. Sonraki işleme veya bitirme işlemleri için genellikle herhangi bir gereklilik yoktur.
7. Bu işlem, ürünlere belirli özellikler kazandırmak için hem metalik hem de metalik olmayan tozların karıştırılmasına yardımcı olur.
8. Gözenekli kısımlar, başka araç veya tekniklerle elde edilemeyecek şekilde imal edilebilir [85].

3.2.1.3. Toz Metalurjisinin Dezavantajları

1. Uygulanan ve kullanılan metal tozları ve ekipmanların fiyatları oldukça yüksektir.
2. Tozların depolanması, yangın ve patlama tehlikesi nedeniyle yüksek zorluklara ve tedirginliklere yol açmaktadır.
3. Bu teknikle üretilen parçalar zayıf sünekliğe sahiptirler.
4. Bazı düşük erime noktalı tozların sinterlenmesi; kurşun, çinko, kalay vb. gibi, bunlar çok derin zorluklar ve sorunlar oluşturabilir [74].

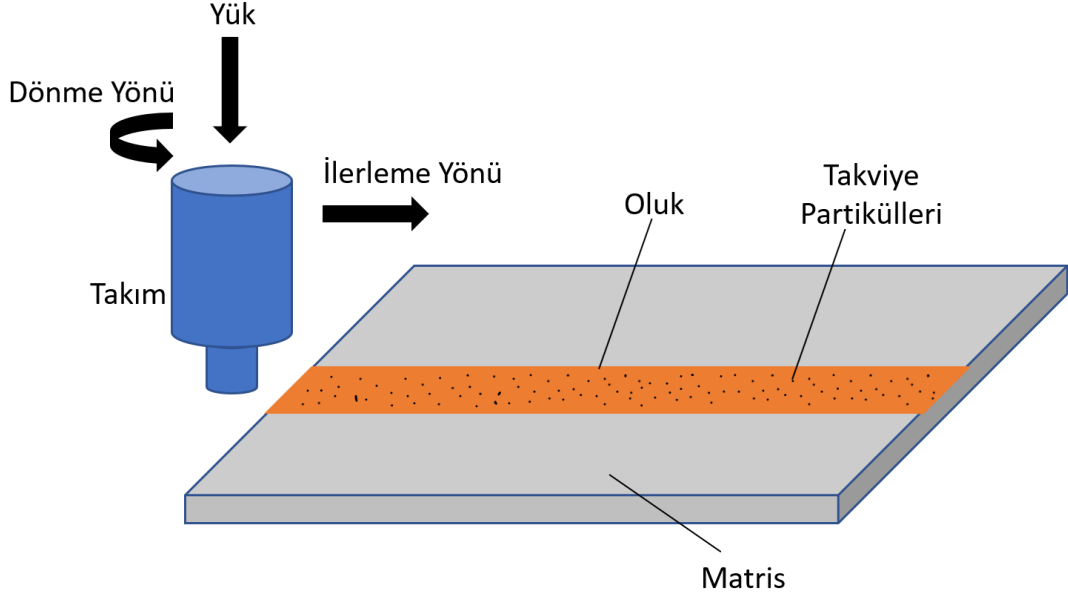
3.2.2. Difüzyonla Bağlama

İki metali birleştirmek çok önemli bir katı hal işlem tekniğidir. Temizlenen yüzeyler, metallerin bağlanması için yüksek sıcaklıkta preslenir ve metallerin kaynaklanması sağlanır. İlk adım, iki yüzeyi yüksek bir sıcaklık ve basınçta birbirine zorlar, yüzeyi düzleştirir, safsızlıkları parçalar ve atomdan atoma yüksek bir temas alanı üretir. Yüzeyler yüksek sıcaklıklarda birbirine preslenmiş durumda kaldıkça, atomlar tane sınırları boyunca kalan boşluklara dağılır; atomlar yoğunlaşır ve arayüzeydeki herhangi bir boşluğun hacmini küçültür. Tane sınırı difüzyonu hızlı olduğundan, bu ikinci adım çok hızlı gerçekleşebilir. Bununla birlikte, sonunda tane büyümesi, kalan boşlukları tane sınırlarından izole eder. Üçüncü adım da boşlukların nihai olarak ortadan kaldırılması, nispeten yavaş olan hacim difüzyonu meydana gelir. Bu işlem yöntemiyle üretime difüzyonla bağlama adı verilmektedir [68].

3.2.3. Sürtünme Karıştırma

Sürtünme karıştırma işlemi (FSP), yüzeyleri tekrardan düzenler ve homojen mikro yapıya ve ince tane boyutuna sahip yüzey kompozitleri üretir. FSP yönteminin TM ve KD'ye göre avantajları vardır. TM ve KD'nin kompozitlerin mukavemetini arttırdığı ancak tokluğu ve sünekliği azalttığı bildirilmektedir. FSP, diğer tekniklere kıyasla daha yüksek yüzey sertliğine sahip kompozitler üretebilir. Ayrıca FSP, takviye parçacıklarının homojen dağılımını sağlar. Son yıllarda, bu yöntem metalik

malzemeler üzerinde kompozit yüzeyler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.8’de, FSP yönteminin şematik uygulaması gösterilmektedir [86].

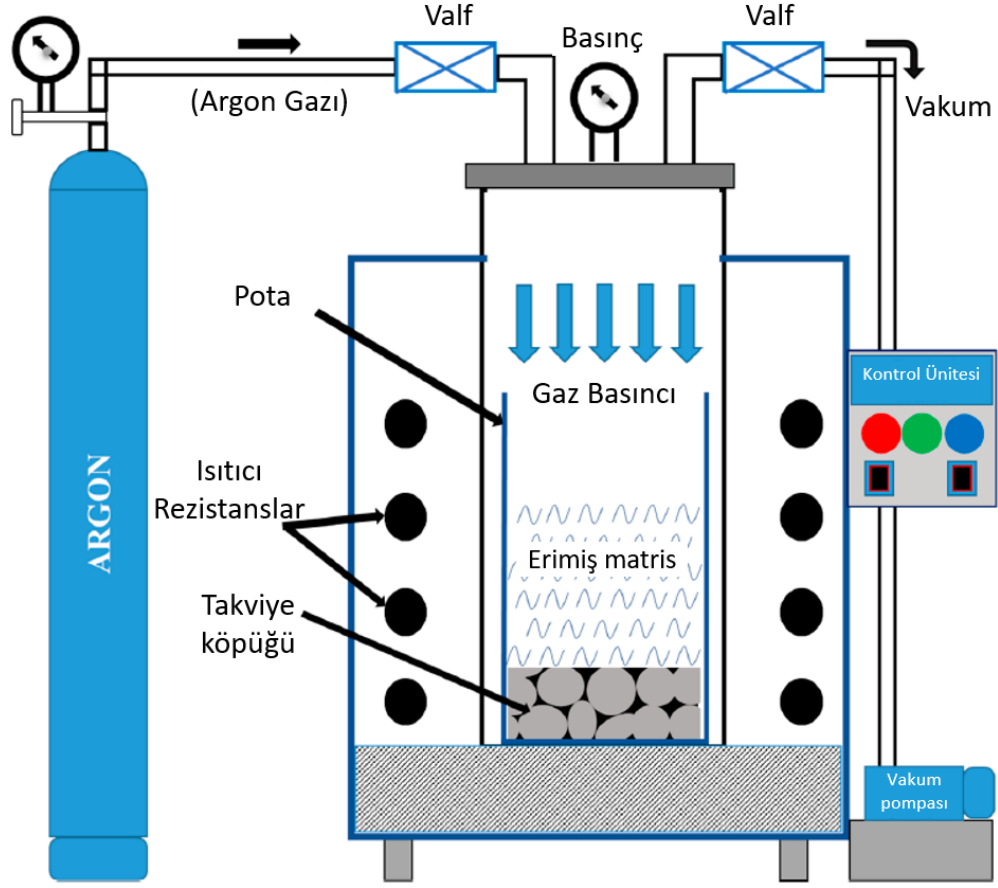


Şekil 3.8. Sürtülmeli karıştırma yöntemi ile üretim şeması.

3.2.4. Sıvı-Metal İnfiltrasyonu

Düşük basınçlı infiltrasyonu gerçekleştirmek için Şekil 3.9’da gösterildiği gibi Argon gazı koruyucu atmosferine sahip üretim sistemi kullanılmıştır. Kurulum, ısıtılabilen ve düşük miktarda basınca dayanabilen bir basınç odasından oluşur. Basınç odası, eritme ve sızma görevini yerine getirebilecek bir pota şeklinde tasarlanmıştır. Boşluklu takviye malzemesi içeren pota önceden matris fazının erimesi için ısıtılır ve ölçülü miktarda matris külçe dilimler eklenir. Takviye elementini önceden yerleştirmiş olmak, oda sıcaklığı ile fırın atmosferi arasındaki fark nedeniyle takviye malzemesi üzerinde oluşan termal şoku azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu durum ayrıca erimiş matris fazının daha kolay bir şekilde takviye malzemesinin boşluklarına sızarak dolmasını kolaylaştırmaktadır. Daha sonra eriyik, infiltrasyonu hızlandırmak ve kolaylaştırmak için biraz daha fazla ısıtılır. Basınç infiltrasyonunu kolaylaştırmak için sistem içinde bulunan atmosferik hava, vakum pompası yardımıyla boşaltılır. Ardından yüksek basınçlı Argon gazı sisteme pompalanır ve içeride basınç arttırılır. Kompozit eriyik, tam olarak sızmanın gerçekleşmesi için bu ortamda yaklaşık olarak

bir saat tutulur. Bu aşamadan sonra kompozit soğumaya bırakılır ve nihai ürün elde edilir. Sıvı-metal infiltrasyonu yöntemi ile üretim işleminin şematik gösterimi Şekil 3.9'da verilmiştir [87].



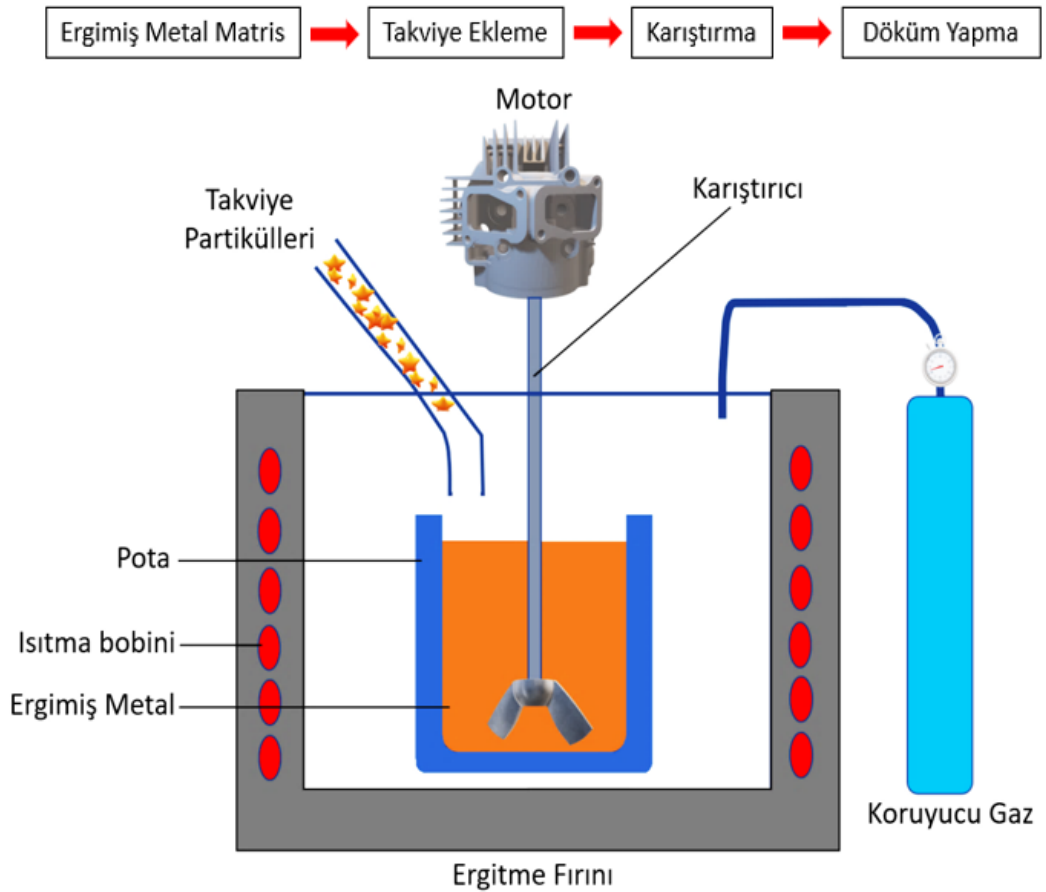
Şekil 3.9. Sıvı-metal infiltrasyonu yöntemi şematik gösterimi [87].

3.2.5. Sprey döküm ile üretim

Püskürtme ile üretim yöntemi, erimiş metal damlacıklarının veya sürekli soğuk metal beslemesinin hızlı ısı enjeksiyon bölgesi üzerine püskürtülerek yayıldığı bir tekniktir [88]. Proses, atomize damlacık akışını takviye üzerine veya matris üzerine yönlendirerek katı numune üretimi için kullanılabilir. Sprey içine seramik tozu enjekte ederek MMK'lerin oluşturulması ve üretilmesi için bu tekniğin uyarlanması ticari olarak başarılı olmuştur.

3.2.6. Karıştırma Döküm

Karıştırma döküm, mekanik bir karıştırıcı yardımıyla takviye fazlarının eriyiğe dağıtılmasını içerir. Karıştırma döküm işleminde, sürekli karıştırma yoluyla erimiş halde metal matrise takviyeler eklenir. Sürekli karıştırma işlemi, erimiş metal matrisinde takviye partiküllerinin düzgün dağılımını sağlar. Yüksek sıcaklık ve hızlarda, mekanik karıştırma yapıldığında, partikül topaklanması önlenmiş olur. Karıştırma işlemi sonrası elde edilen karışım, geleneksel döküm yöntemi ile dökülür ve katı duruma soğutulur [45,89]. Karıştırmalı döküm işlemi, düşük maliyeti ve toplu kompozit üretimine uygunluğu nedeniyle son derece popülerdir. Şekil 3.10'da karıştırmalı döküm sisteminin şeması gösterilmiştir.



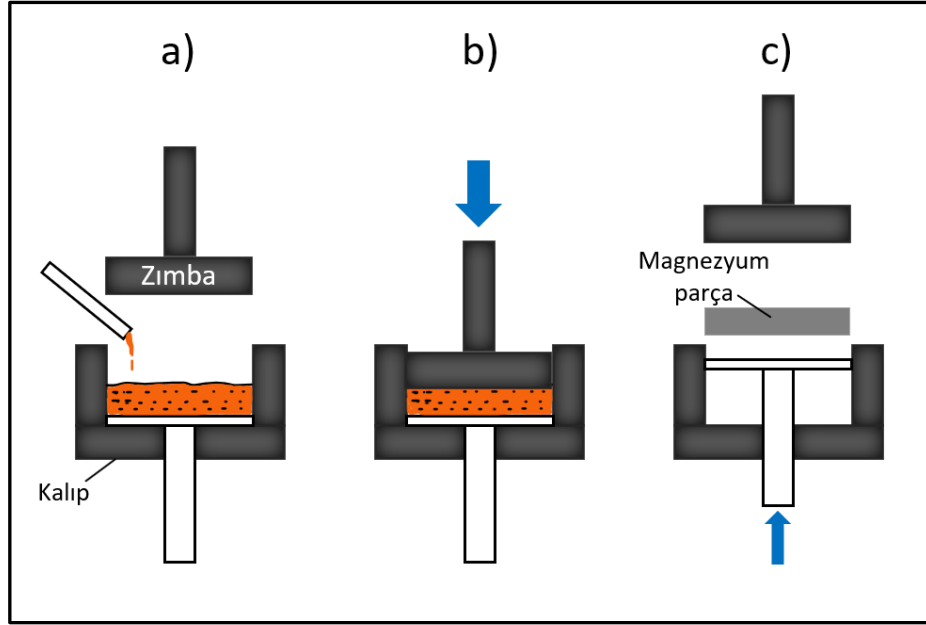
Şekil 3.10. Karıştırmalı döküm sistemi.

3.2.5. In-situ (Reaktif) Yöntemi

In-situ üretim yöntemi, nispeten yeni bir yöntemdir. Burada takviyeler, elementler arasındaki veya elementler ile bileşikler arasındaki kimyasal reaksiyonlarla doğrudan metalik matriste sentezlenmektedir. Ayrıca, oluşturulan takviyenin boyutu, alaşım elementleri eklenerek değiştirilebilir. Bu yöntemle üretilen Mg matrisli kompozitler, temiz takviye matrisi arayüzlerine sahip ultra ince, düzgün dağılmış ve termodinamik olarak kararlı seramik takviyelerin oluşumu nedeniyle mükemmel mekanik özellikler sergileyebilmektedirler [90,91]. Ayrıca imalat sürecini pratik hale getirmek için oldukça hızlı reaksiyon kinetiği gereklidir.

3.2.6. Sıkıştırma Döküm

Sıkıştırılmalı döküm işleminde takviyeler belirli bir forma dönüştürülür ve kalıba yerleştirilir. Daha sonra ergitilmiş metal matrisi kalıba dökülür ve karışıma yüksek basınç uygulanır. Bu yüksek basınç altında matris ve takviye elemanlarının iç içe geçmesi, homojen bir şekilde bütünleşmesi sağlanmış olur ve bu basınç altında soğumaya bırakılır. Bu yöntem ile karmaşık şekilli ve yüklü miktarda kompozit üretilenmektedir ve son ürün işleme maliyeti düşürülebilmektedir. Karıştırılmalı döküm işlemi ile kıyaslandığında sıkıştırılmalı döküm daima Mg alaşımı içerisine daha yüksek hacimlerde takviye elemanı entegre etmeye imkân sağlar. Kullanılan basıncın büyüklüğü, döküm kompozitinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini en çok etkileyen birincil değişkendir [68,92].



Şekil 3.11. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi aşamaları; a) Ergimiş metal Mg matris kalıba dökülür, b) yüksek basınç uygulanır, c) kompozit malzeme çıkarılır.

Sıkıştırılmalı döküm yönteminin kendi içinde doğrudan ve dolaylı sıkıştırma yöntemi olmak üzere iki uygulama metodu vardır. Şekil 3.11’de doğrudan sıkıştırılmalı döküm yönteminin aşamaları verilmiştir. Bu yöntem Mg matrisli kompozit üretiminde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Dolaylı sıkıştırılmalı döküm yönteminde ise dışarıdan tüp yardımı ile ergimiş metal takviye malzemesinin yerleştirilmiş olduğu kalıba basınç ile gönderilir ve soğuyana kadar basınç uygulanmaya devam eder. Dolaylı sıkıştırılmalı döküm yönteminde matris malzemesi israf olmaktadır, ancak doğrudan sıkıştırılmalı yöntemde bu israf oluşmamaktadır.

Bu bölümde metal matrisli kompozitlerin üretimlerinde genel olarak kullanılan yöntemler kısaca anlatılmıştır. Bu tez çalışmasında üretim yöntemi olarak toz metalurjisi ve sıcak presleme tekniği tercih edilmiştir.

BÖLÜM 4

MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Metal matrisli kompozitler, daha yüksek özgül dayanımları ve düşük termal genleşme katsayıları sayesinde havacılık, otomobil, savunma ve diğer sektörlere adım atmıştır. Şiddetli çevresel vakum etkileri nedeniyle, çelik gibi geleneksel inşaat malzemeleri, ileri uzay teknolojisinde yapısal gövdede kullanıldığında gerekli gücü, dayanıklılığı ve güvenlik ihtiyacını karşılayamaz [93]. Son zamanlarda çeşitli hafif ve özgül mukavemeti yüksek MMK üzerine çalışmalar ve yüksek önem ve hassasiyete sahip alanlarda kullanımları artmıştır. Mg matrisli MMK'ler bu kapsamda son zamanların en dikkat çeken kompozit malzemeleri arasındadır. Mg matrisli kompozitlerin çeşitli takviyelerle güçlendirilmesi ve performansının artırılması otomotiv, havacılık ve uzay sanayisi gibi alanlarda büyük önem taşımaktadır [3,16].

Mg mühendislik uygulamaları yarış arabalarında Mg parçalarının kullanıldığı 1920'lere kadar gitmektedir ve ticari olarak ilk uygulamalarından biri 1930'larda 20 kg'dan fazla Mg alaşımının kullanıldığı Volkswagen Beetle'da olmuştur [3]. İlk uygulamalarından bu yana neredeyse bir asır geçmesine rağmen Mg, yaklaşık yirmi yıl öncesine kadar yüksek maliyeti nedeniyle pek çok uygulamada tercih edilen bir malzeme değildi. Bununla birlikte, özellikle enerji tüketimini azaltmak için birçok üründe ağırlığın azaltılmasına yönelik talepler artmakta, endüstriler sürekli olarak yeni, daha hafif ve gelişmiş malzemeler aramaktadırlar.

Mg alaşımları, diğer yapısal metallere kıyasla nispeten düşük elastik modüle, dayanım ve sertlik değerine sahiptir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmenin en çok tercih edilen bir yöntemi, Mg matrisli kompozitleri imal etmektir. Farklı takviye malzemeleri arasında Mg esaslı kompozitlerde en yaygın olarak seramik takviyeler kullanılmaktadır. Tüm seramik takviyeler arasında TiB_2 partikülleri, birçok Mg alaşımındaki termodinamik kararlılığı ve Mg ile iyi ıslatılabilirliği nedeniyle Mg ve

Mg alaşımlarında en yaygın kullanılan takviyelerden biridir [94]. TiB₂, yüksek sertliği (960 HV), düşük yoğunluğu (4,5 g/cm³), yüksek elastik modülü (565 GPa), yüksek erime sıcaklığı (2790°C) ve iyi aşınma direnci nedeniyle kompozit sistemlerde takviye elemanı olarak yaygın olarak tercih edilegelen bir malzemedir [23,24,95]. Bu üstün özelliklerin birleştirilmesi, TiB₂'yi özellikle aşınma ve yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılan malzemelerdeki en önemli takviyelerden biri haline getirmiştir [17,23,96].

Grafen benzersiz mekanik, elektriksel ve termal özellikler sergiler. Grafenin 1 TPa elastik modülü, 5000 W m⁻¹ K⁻¹ termal iletkenliği ve 130 GPa içsel gerilme mukavemeti vardır. Ayrıca, yağlayıcı yapısı nedeniyle araştırmacılar, üstün tribolojik ve mekanik performansa sahip kendinden yağlamalı metal matrisli kompozitlerin üretimi için havacılık ve otomotiv endüstrisi uygulamalarında yaygın olarak grafeni tercih etmişlerdir [25,26,97–99]. TiB₂ ve grafen yukarıda belirtilen üstün özelliklerinden dolayı bu çalışmada takviye elemanı olarak seçilmiştir.

4.1. TAKVİYE ELEMANLARI

4.1.1. Mikro Takviye

Thakur vd. [100], Alümina (Al₂O₃) ve çok duvarlı Karbon-nanotüp takviyeli Mg matris kompozitlerini imal etmek için toz metalurjisi işlemi kullanmışlardır. Daha sonra Mg-%1 CNT, Mg-%0.7 CNT + %0.3 Al₂O₃, Mg-%0.5 CNT + %0.5 Al₂O₃, Mg-%0.3 CNT + %0.7 Al₂O₃ kombinasyonları ile üretimler yapılmıştır. Takviyede Al₂O₃ içeriği arttıkça makrosertlik, mikrosertlik ve çekme dayanımı arttığını rapor etmişlerdir. Mg-0.3% CNT + %0.7 Al₂O₃ numunesi için optimum makrosertlik, mikrosertlik ve çekme dayanımı değerleri gözlenmiştir. Kompozitlerin kırılma analizinden sonra kırılmanın temel olarak gevrek kırılma olduğu bulunmuştur. Yarıлма benzeri özelliklerin varlığı, kırılma yüzeyleri yüksek büyütmede incelendiğinde keşfedilmiştir.

Bir diğer çalışmada, Mg MMK içine takviye olarak ağırlıkça %10, %20 ve %30 SiC parçacıkları takviye edilmiştir. Kompozitlerin yoğunluğu önemli ölçüde değişmese de

gözeneklilik değişmiştir. Mg/ağırlıkça %30 SiC parçacık takviyeli kompozitte sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı önemli ölçüde iyileştirilmiştir [101].

B₄C takviyeli Mg matrisli kompozit üzerine yapılan bir çalışmada ağırlıkça %10, 20 ve %30 oranında B₄C takviye olarak eklenmiş ve toz metalürjisi işlemi uygulanmıştır. Kompozitin yoğunluğu önemli ölçüde değişmemiş, ancak gözenekliliği (porozitesi) değişmiştir. Takviyeli Mg'nin sertliği takviyesiz Mg'ye göre daha yüksek olmuş ve en yüksek sertlik Mg + %30 B₄C takviyeli numunede görülmüştür. Saf Mg ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş kompozitlerde basma mukavemeti azalmıştır. Takviye içeriğinin artmasıyla aşınma direnci artmıştır [11].

Zhang Xiuqing vd. [102], TiC parçacıkları takviyeli Mg matris kompozitlerin mekanik özelliklerini ve sönümlenme davranışını araştırmıştır. Sonuçlar, TiC partiküllerinin kompozitlerin sönümlenme kapasitesi ve mekanik özellikleri üzerinde hayati bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Kompozitlerin çekme dayanımı ve sönümlenme kapasitesi AZ91 Mg alaşımına göre iyileştirilmiştir. Sönüm karakterizasyonu; ikizlenme, dislokasyon hareketi, tane sınırı kayması ve arayüzey kayması ile açıklanmıştır.

4.1.2. Nano Takviyeler

Du vd. [103], eriyik karıştırma ve sıcak ekstrüzyon ile üretilen ZK60 / GNP kompozitlerinin (ağırlıkça %0,05 ve %0,1) mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,1 GNP içeriği için güç ve tokluk arasında iyi bir dengenin elde edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca GNP'lerin eklenmesiyle çekme ve basma dayanımının arttığını bildirmişlerdir.

Ramezanzade vd. [104], Mg bazlı alaşımların mekanik özelliklerini güçlendirmek amacıyla homojenizasyon ve ekstrüzyon eşliğinde karıştırmalı döküm yöntemi aracılığıyla çeşitli GNP içeriklerini (ağırlıkça %0,1, 0,2 ve 0,4) katkı maddesi olarak kullanarak Mg bazlı kompozitler üretmişlerdir. Sonuç olarak, ağırlıkça %0,2 GNP'lerin Mg bazlı alaşıma takviyesinin, tane incelmeye (%36), anizotropinin azalmasına (%14) ve ayrıca ikiz oluşumunun azalmasına neden olduğunu

göstermişlerdir. Gelişmiş bazal olmayan kayma ve tane inceltme ile birlikte GNP'lerin homojen dağılımı, çekme kırılma gerilmesini arttırmıştır.

Bir diğer çalışmada Singh vd. [105] grafen nanoplaka takviyeli Mg metal matris kompozit oluşturmak için toz metalurjisi kullanılmıştır ve ardından takviye olarak ağırlıkça %0.1, %0.2 ve %0.3 GNP'ler eklenmiştir. Üretilen kompozitin toksik olmadığı ve biyolojik olarak parçalanabilir olduğu ortaya çıkmıştır. Korozyon direnci ve basınç dayanımı, GNP yüzdesindeki artışla birlikte artmıştır. Mg/ağırlıkça %0,3 GNP takviye içerikli kompozitinde basınç dayanımı önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Yuan vd. [106], çok duvarlı karbon-nanotüpler (ağırlıkça %0.06, 0.18 ve %0.3) ile güçlendirilmiş Mg matris kompozitleri üretmek için toz metalurjisi kullanmışlardır. Kompozitlerin yoğunluğu biraz azalmış, ancak CNT içeriği arttıkça gözeneklilik artmıştır. Termal genleşme katsayısının sonuçları, Mg-CNT nanokompozitlerinin termal olarak monolitik saf Mg'den daha kararlı olduğunu göstermektedir. Kompozitlerin sertliklerinde gözle görülür bir değişiklik olmamış ve sadece çekme gerilmelerinde küçük bir artış olmuştur.

Ayrı bir araştırmada Xue vd. [107], MMK'leri geliştirmek için çok duvarlı kısa karbon nanotüplerle güçlendirilmiş Mg matris (AZ91D alaşımı) kompozitleri kullanmışlardır. Takviye olarak ağırlıkça %0.5, 1, 3 ve %5 CNT'ler uygulanmıştır. Çekme mukavemeti başlangıçta artmış ve daha sonra CNT içeriğinin artmasıyla azalmıştır. En yüksek gerilme mukavemeti AZ91D/CNT %1 numunesi için gözlemlenmiştir.

Parande vd. [108] toz metalurjisi ile üretmiş oldukları Mg_{2.5}Zn/ES kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Maksimum akma mukavemeti ve basma mukavemeti, ağırlıkça %3 ES içeriği ile elde edilmiştir. Bu içeriğin üzerine çıkıldığında, mekanik özellikler azalma eğilimine girmektedir. Mukavemetteki artış, ES'nin varlığına bağlı olarak deformasyon ikizlenmesinin ve doku randomizasyonlarının etkisine bağlanmıştır.

Wang vd. [109] toz metalurjisi ile üretilen ZK60 matris kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerinde nano-elmas içeriğinin (ağırlıkça %0,1, 0,15 ve 0,2) etkisini

araştırmıştır. Nano-elmas parçacıklarının eklenmesiyle numunelerin tane boyutunun azaldığını bildirdiler. En iyi mekanik özellikler ağırlıkça %0,1 nano-elmas içeriği için elde edilmiştir.

Hibrit takviyeler, son yıllarda gelişmiş kompozitler üretmek için kullanılan temel stratejik planlar arasındadır. Bu strateji, metal matrise hibrit takviyeler eklemek, avantajları ortaya çıkarmak ve sinerjistik bir etki sağlayarak yüksek performans elde etmeyi amaçlamaktadır [110]. Literatür çalışmaları, ZK60 matrisli hibrit kompozitler üzerine az sayıda çalışma olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalardan birinde Gu vd. [111], basınçlı infiltrasyonla üretilen ZK60 / B₄C (%12 hacim) / SiC (%12 hacim) hibrit kompozitinin yaşlanma davranışını araştırmışlardır. Ayrıca monolitik alaşıma kıyasla hibrit kompozitin önemli ölçüde dislokasyon sertliği oluşturduğunu vurgulamışlardır. Behnamian vd. [112], karıştırmalı döküm ile üretilen ZK60 / MWCNT'ler (%0-1 ağırlık) / B₄C (%5-20 ağırlık) hibrit kompozitlerin aşınma performansını incelemişlerdir. Numuneler arasında en iyi aşınma performansını ZK60 / MWCNT (%0,5) / B₄C'nin (%10) gösterdiğini bildirmişlerdir.

4.2. BASMA DAYANIMI

Metal matrisli kompozitler, monolitik malzemelere göre önemli ölçüde gelişmiş mekanik özellikler gösterir. Farklı takviye türleri ile güçlendirilmiş MMK'ler arasında, partikül takviyeli MMK'ler, basit imalat yöntemleri, izotropik özellikleri ve maliyet etkinliği nedeniyle daha ilgi çekicidir [1].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerde iki tür güçlendirme mekanizmasının meydana gelmektedir: doğrudan ve dolaylı. Doğrudan güçlendirme, matristen takviye partiküllerine yük transferinin bir sonucu olarak, dolaylı güçlendirme ise partiküllerin matrisin mikroyapısı ve deformasyon davranışı üzerindeki etkileri nedeniyle gerçekleşir. Akma dayanımındaki ve pekleşmedeki artış, yük aktarımı güçlendirme süreçleriyle doğrudan ilgili, dislokasyon yoğunluğunun artması, partiküllerin neden olduğu dislokasyon hareketlerinin engellenmesi, sertliğin artması, ayrıca akma ve nihai çekme dayanımlarından dolayı olarak ilgilidir [113].

Diğer yandan literatürde, kompozit numune üretimlerinde daha yüksek takviye içeriği nedeniyle basma ve çekme dayanımındaki düşüşün şu nedenlere dayandırıldığı belirtilmiştir: 1) tane sınırı ayrışmasındaki artış, 2) takviye parçacıklarının aglomerasyonu ve 3) yüksek düzeyde gözeneklilik [114].

4.2.1. Mukavemet artış mekanizmaları

Genel olarak metal matrisli kompozitler için tane inceltme, Orowan güçlendirmesi, Taylor güçlendirmesi ve yük aktarma mekanizması gibi farklı güçlendirme mekanizmaları mevcuttur [86]. Mg matrisli kompozitler için takviye tipi ne olursa olsun Hall petch güçlendirme mekanizması en önemli faktördür. Ayrıca, bu etki daha çok takviyelerin parçacık boyutuna göre hacim oranlarına bağlıdır. Orowan güçlendirmesinin, mikro parçacıklarla güçlendirilmiş Mg matrisli kompozitler için önemli bir faktör olmadığı bildirilmiştir [45].

Genellikle, HSP kristal yapısı nedeniyle, yeterli kayma aktivitesinin olmaması, Mg'deki plastik deformasyonu sınırlandırmaktadır. Mg'de üniform deformasyonun mümkün olmadığı literatürde detaylı olarak ifade edilmiştir [45].

Pérez vd. [115], toz metalurjisi yolu ve ardından sıcak ekstrüzyon yoluyla Mg-10% (hacim) Ti ürettir. Ekstrüde Mg-10% (hacim) Ti, saf Mg tozlarına kıyasla nispeten büyük bir tane boyutu (~40 µm) gösterse de, mukavemeti, seramik partiküllerle güçlendirilmiş saf Mg kompozitlerindeki (160 MPa) daha yüksek süneklik ile birlikte daha ince tane boyutlarıyla karşılaştırılabilir. Ti parçacıklarından yük transferi, mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkıda bulunan birincil mekanizma olarak tanımlanmıştır.

Hwang ve Nishimura [116] ayrıca Ti ilavesinin saf Mg'de sünekliği arttırmak için faydalı olduğunu bildirmiştir. Ti takviyesi ile Mg kompozitlerde mükemmel bir süneklik elde edilmiştir.

Nano boyutlu takviyeler, Orowan denkleminde ve yük aktarımı güçlendirme mekanizmalarına göre metal matrislerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için büyük

olanaklar sunmaktadır [45]. Nano boyutlu takviyeler arasında grafen, mükemmel mekanik dayanım özelliklerine sahip son zamanların en çok çalışılan güncel malzemelerinden birisidir. Örneğin kırılma mukavemeti çelikten 200 kat daha yükseğe ulaşabilmektedir. Bu da onu metal kompozitler için aranan bir takviye malzemesi yapmaktadır. GNP takviyeli MMK'lerin performansı, GNP'nin hacim fraksiyonundan, dağılımından, arayüzey bağından, alaşım tipinden ve şekillendirme yönteminden etkilenir. Mekanik özellikleri iyileştirmek için Al alaşımına, Mg alaşımına, Ni alaşımına, Ti alaşımına veya Cu alaşımına farklı imalat yöntemleriyle GNP ilave edilmiştir. Yüksek rijitlik ve mukavemete sahip GNP takviyeli MMK'ler havacılık ve uzay alanlarında uygulanabilir [117].

Grafenin güçlendirme mekanizmalarındaki etkisi temel olarak şunları içerir: tane inceltme, dislokasyon güçlendirme ve yük transferi. Al kaplı grafenin, AlSi10Mg alaşımının tanelerini incelttiği bildirilmiştir. Alaşımın mekanik performansını iyileştiren deformasyon işlemi sırasında dislokasyonları ve tane sınırlarını sabitleyebilmektedirler [118].

Grafen, alaşımın mekanik özelliklerini etkili bir şekilde geliştirebilir, ancak Grafen MMK'nin kopma gerinimini genellikle azaltmaktadır. Geliştirilmiş bir gerilme mukavemetini korurken gerinimin nasıl artırılacağı, gelecek için ana araştırma geliştirme konularından biri konumundadır.

Metal matris nanokompozitlerin (MMK'ler) üretilmesi, saf matris malzemesine göre mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozit özellikler, çalışma yükünü matris malzemesinden takviye edici maddelere etkili bir şekilde aktararak gerçekleştirilmektedir. Mg matrisi için yaygın olarak tanınan bu güçlendirme sistemlerinin başlıcaları; yük transferi, termal uyumsuzluk, tane küçültme ve Orowan mekanizmalarıdır.

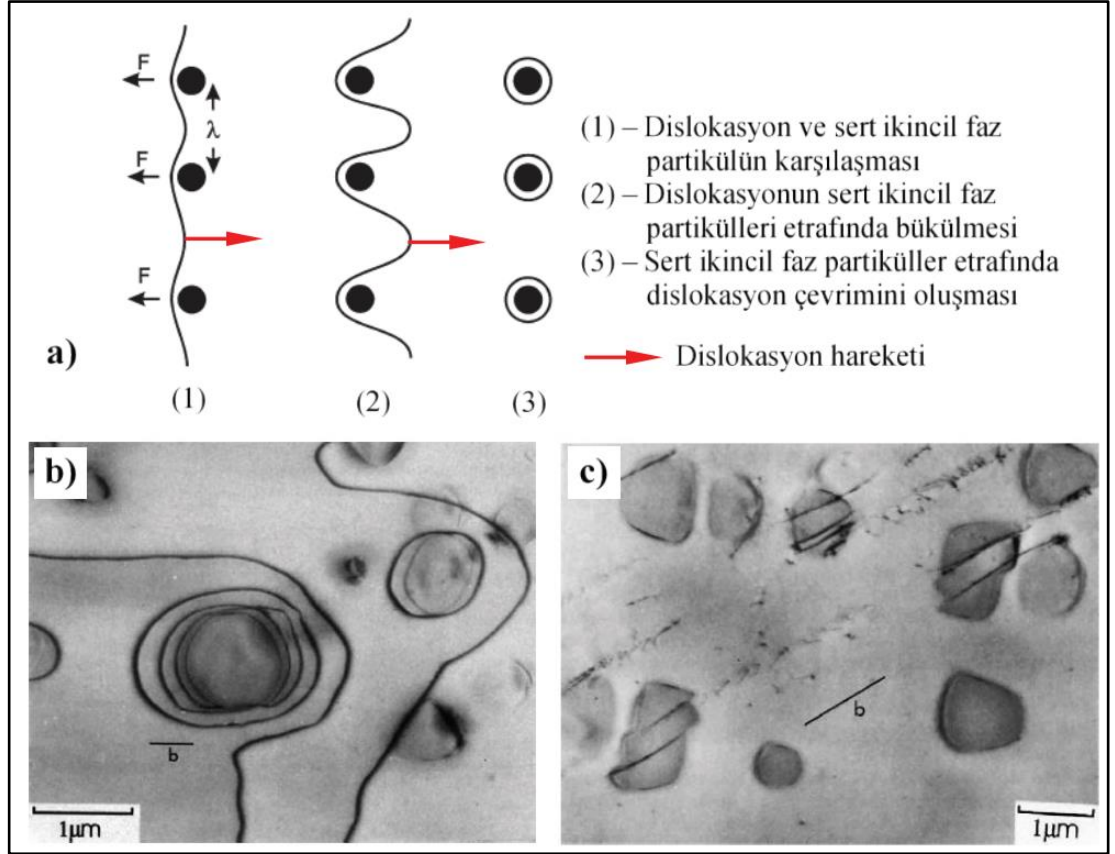
4.2.1.1. Yük Transferi

Nardon ve Prewo [119] mikro partikül takviyeli kompozitlerde yük aktarımı mekanizmasının en kabul edilebilir mekanizma olduğunu belirtmişlerdir. Bu

mekanizma ayrıca, yük taşıma etkisi olarak da bilinen önemli bir güçlendirme mekanizmasıdır. Bu mekanizma da, kompozitte oluşturulan ara yüzey bağı, matris malzemesine uygulanan gerilimleri kendi üzerinden takviye malzemesine aktarılmasını sağlamaktadır. Güçlü bir ara yüzey bağlanma kuvveti olmadan, uygun parçacık boyutu ve içeriği ile dahi yük transfer kuvvetlendirmesi oluşturmak zordur [86].

4.2.1.2. Orowan

Orowan mekanizması, partikül ve nanoparçacık takviyeli Mg matris kompozitlerde önemli bir güçlendirme mekanizmasıdır. Dislokasyon gelişimi ve ilerlemesi sırasında matris fazında bulunan farklı yapıya, daha sert ve yüksek dayanıma sahip takviye partiküllerinin varlığı, dislokasyonların ilerleyişini engeller (Şekil 4.1 (a)-(b)) ve böylece mukavemetin artmasını sağlar. Matris içerisindeki ikincil faz partiküllerin dislokasyon hareketine karşı tepkileri; sertliklerine, özgül mukavemetlerine, matristeki dağılımlarına, boyutlarına ve şekillerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Eğer takviye partikülleri yeterli dayanıma ve özelliklere sahip değilse hareket eden dislokasyon tarafından kesilerek parçalanırlar (Şekil 4.1 (c)) [120]. Gupta vd. [108], yumurta kabuğu partiküllerinin varlığının (mikron boyutunda) dislokasyon hareketine engel olduğunu ve Orowan'ın güçlenmesine yardımcı olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 4.1. Orowan mekanizması; a) Orowan dislokasyon çevrimi oluşumunun şematik gösterimi, b) Orowan takviye çevrimine ait mikroyapı görüntüsü, c) Takviye partiküllerinin dislokasyon hareketi tarafından kesilerek parçalanmasına ait görüntü [120].

4.2.1.3. Termal Uyumsuzluk

Bu mekanizma termal ve Taylor güçlendirme mekanizması olarak da bilinmektedir. Üretim işlemi sonrası soğutma sırasında, takviye fazı ile matris arasındaki termal genişleme katsayısındaki fark nedeniyle artık plastik gerinim gelişir ve sonuç olarak termal genişleme katsayısındaki farklılıkları karşılamak için parçacıkların etrafında dislokasyonlar oluşacaktır. Metal matris ile takviye parçacıkları arasındaki termal genişleme katsayısı ve elastik modül farkı çok büyük olduğu durumlarda, kompozit malzemelerde yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşur [86]. Daha sert ve deforme olmayan takviye parçacıklarını barındıran yumuşak bir Mg matrisinin varlığı, geometrik olarak gerekli dislokasyonların üretilmesini sağlar. Belirli bir bölgedeki dislokasyon yoğunluğunun artması ile yeni dislokasyonların oluşumuna karşı direnç

artmaktadır [68]. Bu şekilde oluşan artış mekanizması termal uyumsuzluk mekanizması olarak bilinmektedir.

4.2.1.4. Tane Küçültme

Bu mekanizma diğer adı ile Hall-Petch mekanizması olarakta bilinmektedir. Mg matris kompozitler için en önemli güçlendirme mekanizmalarından bir tanesidir. Literatür için Mg'nin (HCP metal) kayma sistemlerinin az olduğu iyi bilinmektedir; bu nedenle tane inceltme, Mg matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri için büyük öneme sahiptir. Mg matrisli kompozitler için takviye parçacıkları, matrisin tane boyutunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Tane inceltme, Mg fazının ve takviye parçacıklarının heterojen çekirdeklenmesi ile ilgilidir. Mg kristallerinin büyümesi seramik parçacıklar tarafından kısıtlanmaktadır [121].

4.3. AŞINMA

Baskın aşınma mekanizmalarının anlaşılması, bileşenlerin ömürlerinin veya performanstaki değişikliklerin belirlenmesi açısından önemli bir faktördür. Bu amaçla, hedeflenen karşı önlemleri başlatabilmek için öncelikle mekanizmayı belirlemek gerekir. Uzmanlar tarafından mesleki bilgi birikimi ile değerlendirilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri çoğu zaman tanımlama için bir temel oluşturur. Aşınma testi uygulanan numunelere, her bir aşınma koşulunda meydana gelen aşınma mekanizmalarını belirleyebilmek için, aşınan yüzey, enine kesiti, aşındırıcı karşıt yüzey ve aşınma sonucu oluşan kalıntıların SEM ve EDS teknikleri ile analiz edilmesi gerekmektedir. Taltavull vd. [122], yaptıkları araştırmalar sonucunda Mg alaşımlarındaki ana aşınma mekanizmalarının abrasif aşınma, yapışma, oksidasyon, delaminasyon ve plastik deformasyon aşınma mekanizmaları olduğu sonucuna varmışlardır.

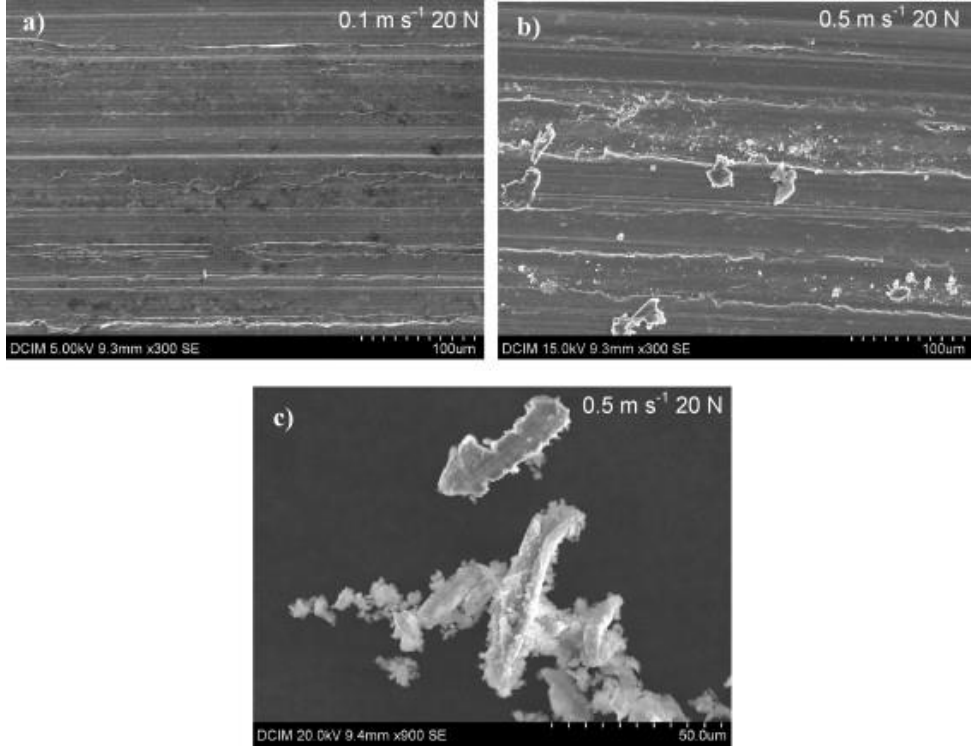
4.3.1. Aşınma Mekanizmaları

Literatürde kompozitlerin tribolojik performansının artması aşağıdaki nedenlere bağlanmıştır: 1) takviye parçacıkları, matris ile karşı yüzey arasındaki teması azaltır, 2) takviye partiküllerinin mevcudiyeti ile kompozitlerin geliştirilmiş sertliği, 3) tribo-çifti arasındaki sürtünmeyi azaltan mekanik olarak karıştırılmış bir tabakanın oluşumu, 4) takviye partikülleri bir yük taşıyıcı eleman görevi görür ve 5) plastik deformasyona karşı gösterilen direnç [86].

Aşınmış yüzey incelemelerinin tribolojik çalışmalar için büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Bu kapsamda aşınmış yüzey incelemelerinde en çok karşılaşılan ve analiz esnasında değerlendirilen aşınma mekanizmaları aşağıda kısaca verilmiştir.

4.3.1.1. Abrasif Aşınma

Sert, pürüzlü bir yüzey pürüzsüz bir yüzey üzerinde kayarken, pürüzsüz yüzeyden malzeme kaldırması ile abrasif aşınma gerçekleşir. Şekil 4.2 (a), $0,1 \text{ m s}^{-1}$ kayma hızında ve 20 N uygulanan yükte test edilen bir numunenin yüzeyini göstermektedir ve Şekil 4.2 (b), $0,5 \text{ m s}^{-1}$ kayma hızında ve 20 N'de test edilen bir pimin yüzeyini göstermektedir. Her iki durumda da aşınma yüzeyinde, aşınmanın kanıtı olan hizalanmış birçok ince oluğun varlığı gözlemlenebilir. Bu çizgilere genellikle aşınan yüzeyin içine giren sert parçacıkların varlığı neden olur. Bu parçacıkların yüzey üzerinde hareketi, Mg alaşımının yüzeyindeki aşınma yolu boyunca malzemenin kaldırılmasına neden olur. Bu aşınma mekanizması, ara yük ve ara hız rejimlerinde baskındır, ancak diğer aşınma mekanizmalarıyla karışık test edilen hemen hemen tüm koşullarda da mevcuttur [123]. Aşınmanın etkileri, $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ve 20 N test koşulları altında gerçekleşen test sonrası toplanan talaşlarda (Şekil 4.2 (c)) gözlenmiştir.

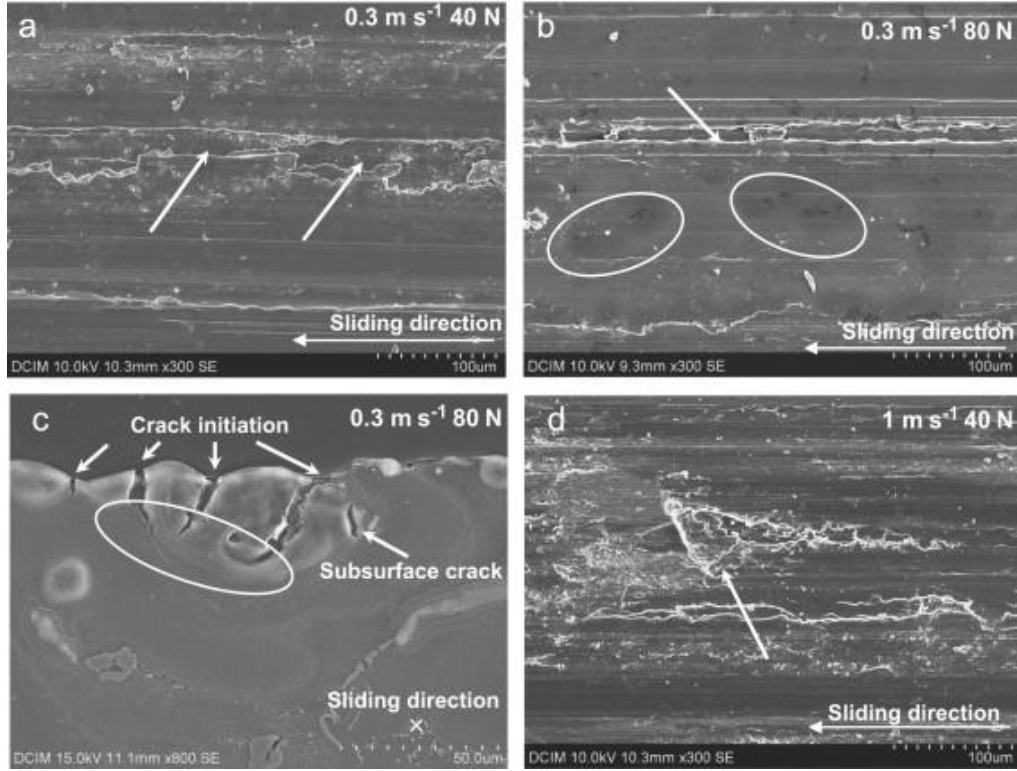


Şekil 4.2. 20 N'de test edilen ZE41A numunesinin aşınmış yüzeylerinin SEM mikrografları ve: (a) 0,1 m s⁻¹; (b) 0,5 m s⁻¹ ve (c) 0,5 m s⁻¹ için aşınma döküntüsü [123].

4.3.1.2. Delaminasyon Aşınması

Delaminasyon, aşınma yönüne dik çatlakların ve yüzey altı çatlakların oluşmasıyla karakterize edilir, bu da aşınmış malzemenin levha benzeri parçalarının ayrılmasına neden olur. 40 N (Şekil 4.3 (a)) ve 80 N (Şekil 4.3 (b)) yük uygulanarak 0,3 m/s kayma hızında test edilen farklı numunelerin aşınmış yüzeyini göstermektedir, burada delaminasyon mekanizması nedeniyle büyük boşluklar gözlenebilmektedir (oklu bölgeler). Uzunluğu 50 ila 300 μm arasında değişen delaminasyon boşluklarının boyutunda yüksek dağılım gözlenmiştir. Delaminasyon boyutundaki artışın hem uygulanan yük hem de kayma hızının artmasıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Boşlukların derinliği 10 ila 20 μm arasındadır ve altlarında deforme olmayan malzeme gözlenebilmektedir. (Şekil 4.3 (c)), delaminasyon aşınma mekanizmasının ana özelliklerini doğrulayan çatlakların ve yüzey altı çatlakların (oklarla gösterilen) gözlemlenebildiği 0,3 m/s ve 80 N yük altında test edilen bir numunenin enine kesitini göstermektedir. Alaşımın bir kısmının ayrılmasının, mevcut çatlakların (Şekil 4.3 (c)) birleşmesinden sonra meydana gelmesi beklenmektedir. Aşınmış yüzey görünümünde

(Şekil 4.3 (d)), oklu bölgede malzemenin kopması net bir şekilde görülmektedir. Bu gözlemler ayrıca, alaşımın oksidasyonu ile birlikte delaminasyonun mevcut olduğunu da kanıtlar.



Şekil 4.3. AM60B numunesinin aşınmış yüzeylerinin SEM mikro fotoğrafları (a) 0,3 m/s 40 N; (b) 0,3 m/s 80 N ve (c) enine kesit 0,3 m/s 80 N; (d) 1 m/s 40 N [122].

4.3.1.3. Plastik Deformasyon Aşınması

Bu aşınma mekanizmasında genellikle ezici yük altında şiddetli şekilde deforme olmuş metalik katmanlar, kayma yönü boyunca ve numunenin temas yüzeyinin dışına doğru ekstrüze edilirler. Taltavull vd. [122], plastik deformasyon mekanizmasının temel özelliğinin, yoğun yüzey hasarına neden olan, şiddetli yüzey deformasyonu ve malzemenin lokal olarak erimesi olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca uygulanan yük ve kayma hızındaki artışın plastik deformasyonda artışa neden olduğunu ve bunun da yüksek düzeyde yapısal bozulmaya ve alaşım için kapsamlı hasara yol açtığını bildirmişlerdir. Şiddetli plastik deformasyon, yük ve hızdaki artışla birlikte daha yüksek aşınma oranına yol açmaktadır. Chen ve Alpas [124] uygulanan daha yüksek

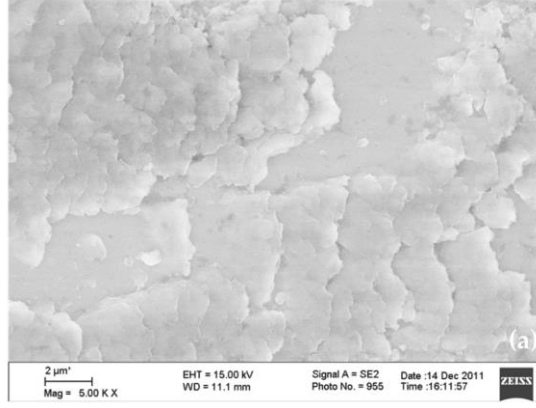
yüklerde, temas yüzeyine bitişik malzeme katmanlarının plastik deformasyonunun bir sonucu olarak geniş yüzey hasarının meydana geldiğini bildirmişlerdir. Sıcaklık arttıkça akma dayanımı keskin bir şekilde düşer ve alaşım yumuşar. Sonuç olarak, malzeme plastik deformasyona eğilimli hale gelir ve temas yüzeyinden kayma yönünde ve yanlara doğru hareket ederek yayılır. Daha düşük hızlarda veya yüklerde bu mekanizma baskın değildir [125].

4.3.1.4. Oksidatif Aşınma

Yüzeylerdeki kayma hızları arttıkça yüzeydeki sıcaklık da artmaktadır, bu durum atmosfer ile etkileşimde olan bu yüzeyde oksidatif film oluşumuna neden olmakta ve oksidasyon sürecini hızlandırmaktadır. Kayma sırasında bir süre sonra yüzeydeki yorulma nedeniyle oksitlenme ile dayanım gücünü kaybetmiş oksit tabakaları aşınmaya başlamakta ve dağılmaktadır [122]. Mg alaşımları, agresif koşulların yokluğunda bile güçlü bir şekilde oksidasyona eğilimlidirler. Bu nedenle, oksidatif aşınmanın Mg aşınmasında önemli bir rol oynaması olasıdır. Oksijenin EDS analizinde pik yapması her numune için görüldüğünden, tüm numunelerde oksidasyon kanıtı ile karşılaşılmaktadır. En küçük kayma hızlarında ve yüklerde dahi aşınmış numuneler için maksimum oksijen pikleri elde edilmiştir [126].

4.3.1.5. Adhesif Aşınma

Yapışma aşınma mekanizması, alüminyum ve titanyum gibi hafif alaşımlarda gözlenen bir aşınma mekanizmasıdır, genellikle Mg alaşımlarında fazla karşılaşılmaz [127]. Yapışma mekanizması, incelenen yüzey ile aşındırıcı yüzey arasında mikro kaynak meydana geldiği için oluşur. Temas yüzeyinde iki malzeme arasındaki nispi hareket nedeniyle mikro bağlantıda kayma gerilimi oluşur ve daha yumuşak olan malzeme kırılır. Mg malzemelerin aşınmalarında ise Mg alaşımı çelik karşıt yüzeye göre daha yumuşaktır ve çelik yüzeye malzemenin yapışması ve çıkarılması sonucunda Mg alaşımının yüzeyinde küçük bir boşluk oluşur. Yüzey pürüzlülüğü ve temas sıcaklığı, yapışma aşınma mekanizmasının anahtar etken parametreleridir [127]. Şekil 4.4' te yapışma aşınmasına ait SEM mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4. Yapışma ile malzeme transferi [128].

4.3.1.6. Aşınma Sonrası Kalıntı (Artık) Malzeme

Genel olarak aşınmış yüzeyler, aşındırıcı karşıt malzemenin yüzeyi ve aşınma kalıntıları bize aşınma mekanizması hakkında bazı ipuçları verebilir. Test edilen hemen hemen tüm koşullar altında, kayma yönüne paralel ince oluklara sahip ortak bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu oluklar, karşıt gövdenin sert yüzeyinin Mg malzemenin yumuşak yüzeyine sürtünmesiyle oluşur. Özellikle düşük sertlikteki Mg alaşımlarında, aşınma mekanizması öncelikle yüzeyde abrasif aşınma ile malzemenin çıkarılmasından kaynaklanır [75]. Aşınma sonrası kalıntı malzemelerinin oluşum şekilleri, aşınmanın ne çeşit bir aşınma çeşidi olarak gerçekleştiği hakkında ipuçları verebilmektedir

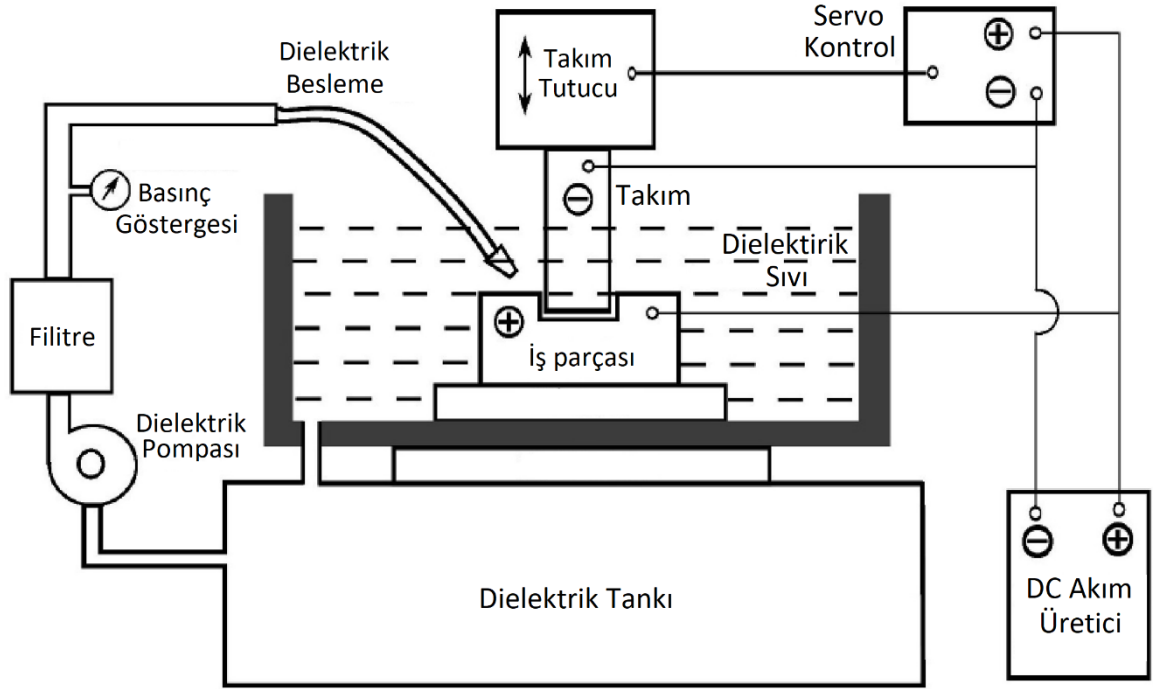
BÖLÜM 5

ELEKTRO EREZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ VE METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN İŞLENMESİ

5.1. EEİ SİSTEMİ

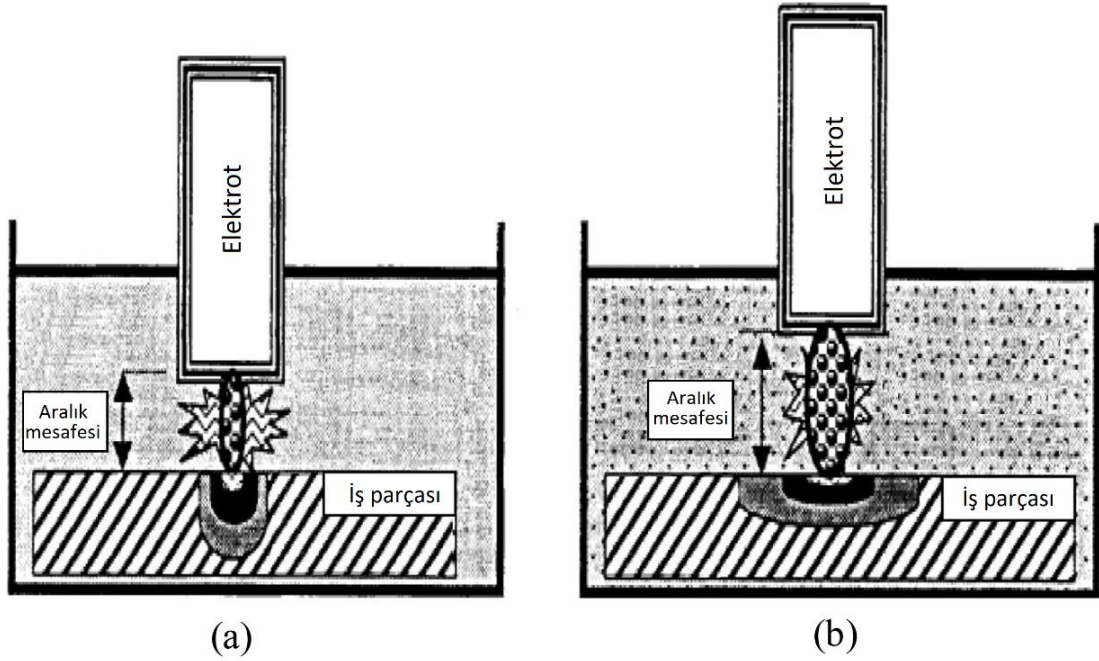
Elektro erezyonla işleme (EEİ), bir malzemeden istenmeyen kısmı çıkarmak için mekanik kuvvet yerine termal enerji kullanan, geleneksel olmayan bir hassas işleme tekniğidir. EEİ işlemi yüksek hassasiyetli işleme kabiliyeti sağladığı ve herhangi bir iletken malzemeye uygulanabilir olduğu için oldukça tercih edilen güvenilir bir yöntemdir. Bu işlem genellikle kör boşlukların oluşturulmasında, kalıpların arzu edilen karmaşık şekil ve ebatlarda üretilmesinde kullanılır. Bu, özellikle hassasiyetin çok önemli olduğu havacılık ve enerji üretim türbinleri gibi yüksek riskli ve hassas endüstriler için uygundur. Bu işlem sırasında elektrot ve malzeme, dielektrik sıvı olarak bilinen yalıtkan bir sıvıya daldırılır. EEİ'nin farklı takımlar ve taşlama makineleri kullanılarak istenmeyen talaş kaldırma gibi geleneksel işleme süreçlerine göre temel farkı ve arzu edilirliliği, bu tekniğin malzeme ile elektrot takım arasında bir dizi elektrik kıvılcımı ile malzemeden istenmeyen malzemeleri aşındırmak için termo-elektrik işlemi kullanmasıdır [129]. Bunun yanında diğer bir yöntem ise toz katkılı elektro erezyon ile işleme yöntemidir. Belirli özelliklere sahip elektrik iletkenliği bulunan toz malzemelerin dielektrik sıvı içerisine karıştırılması ile işleme yöntemi, getirdiği önemli avantajlar sayesinde araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmekte ve çalışılmaktadır [130].

Operasyon esnasında hem elektrot hem işlenecek olan malzeme yalıtkan bir sıvı içerisine daldırılmıştır. TKEEİ sisteminin şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. TKEEİ sisteminin şeması [131].

Şekil 5.2’de (a) EEİ ile işleme yöntemine ait ve TKEEİ ile işleme yöntemine ait şematik gösterim verilmiştir. EEİ ile gerçekleştirilen işlemlerde daha yakın mesafede elektrik arkı oluşmakta ve daha küçük bir alan yüksek yoğunluklu termal enerjiye maruz kalmaktadır. TKEEİ ile gerçekleştirilen işlemde ise nispeten uzak mesafeden ve daha geniş alana termal enerji verilmektedir. Bu sayede daha kontrollü ve daha iyi yüzey kalitesine sahip homojen bir işleme yüzeyi elde edilebilmektedir [130,132].



Şekil 5.2. a) EEİ ve b) TKEEİ işlemlerinde elektrik deşarjı ile oluşturulan ark şeması [132].

Elektro deşarj ile işleme yöntemine ait bazı uygulama örnekleri aşağıda verilmiştir:

- Mikro delik delme
- Keskin iç köşelerin kesilmesi
- Enjeksiyon kalıplama araçları oluşturma
- Döner formların kesilmesi
- Kavisli deliklerin delinmesi
- Sert malzemeleri işlemek
- Kırık takımları iş parçalarından çıkarmak [133].

5.1.1. EEİ Bileşenleri

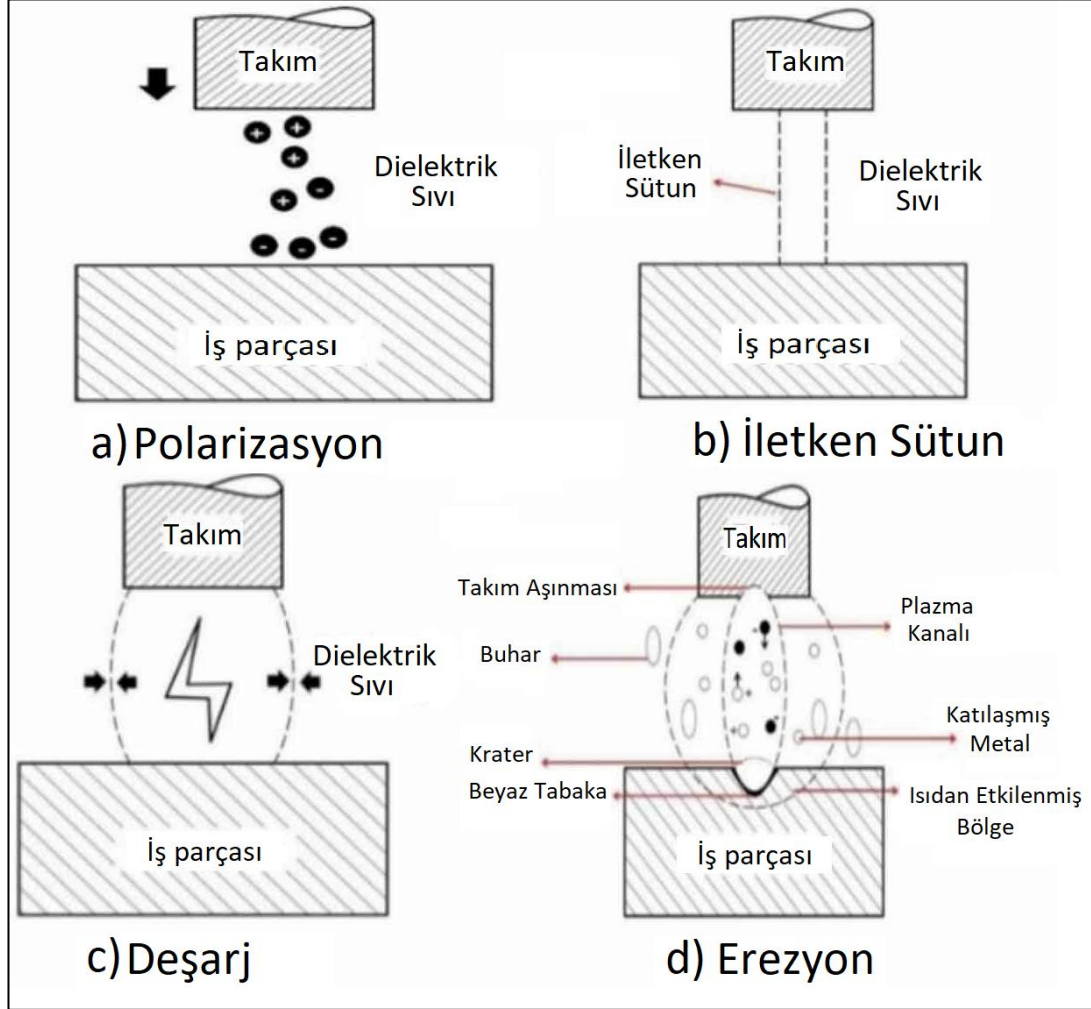
1. **Malzeme-** iletken/yarı iletken malzemelerin her türlü EEİ ile işlenebilir.
2. **Takım Elektrodu-** EEİ elektrodu arzu edilen deliğin şeklini belirleyen araçtır, boşluk ve kontur üretilecek. Takım elektrodu elektrik iletken malzeme kullanılarak yapılmalıdır.
3. **Servo sistem-** Takım arasındaki önceden belirlenmiş boşluğu korumak için kullanılan bu sistem elektrot ve malzeme arasındaki mesafeyi sabit tutar.

4. **Güç kaynağı-** Herhangi bir EEİ sisteminin önemli bir parçasıdır. Ana şebeke kaynağından gelen alternatif akımı, işleme boşluğunda kıvılcım deşarjını üretmek için gereken vuru doğru akımına (DC) dönüştürür. EEİ sisteminin güç kaynağı, vuru voltajını, akımı, vuru süresini, görev döngüsünü, vuru frekansını ve elektrot polaritesini kontrol edebilmelidir.
5. **DC vuru üretici-** Belirli bir süre boyunca belirli bir voltaj ve akımda vuru sağlamakla sorumludur [131].

5.1.2. EEİ Yönteminin Talaş Kaldırma Mekanizması ve EEİ Prensibi

EEİ ile malzeme yüzeyi işleme esnasında işleme tekniği şu şekilde gerçekleşir: Bu işlemde çalışma elektrodu ile malzeme arasında meydana gelen elektrik deşarjının neden olduğu aşınma ile istenmeyen kütle malzemedan ayrılır. Şekil 5.3'te gösterildiği üzere bir servo mekanizma ile malzeme ve takım elektrodu arasında önceden belirlenmiş bir kıvılcım aralığı korunur. Malzeme ve takım elektrodu dielektrik sıvı içerisindeyken elektrot negatif terminale, malzeme pozitif terminale bağlanır. İletken takım elektrodu ve iletken malzeme arasında voltaj uygulandığında her iki elektrot arasında yeterli ateşleme ve kıvılcımlanma gerçekleşir. Pozitif iyonlar ve elektronlar, elektriği ileten bir deşarj kanalı meydana getirir. Bu noktada, iyonlar ve elektronlar arasında çarpışmaya neden olan kıvılcım sıçraması bir plazma kanalı ürettiğinde, önceki kanalın elektrik direncinin hızlı bir şekilde düşmesi, akım yoğunluğunun çok yüksek bir yüke ulaşmasına izin verir, bu da iyonizasyonun artmasına ve baskın bir manyetik alanın oluşmasına neden olur. Bu noktada kıvılcım oluşur, takım elektrodu ile malzeme arasında yeterli basınç oluşur ve bunun sonucunda aşırı yüksek bir sıcaklık elde edilir. Bu yüksek basınç ve sıcaklıkta bir miktar metal erir ve aşınır. Sıcaklıktaki bu tür bölgesel aşırı artış, erime nedeniyle olduğu kadar iletken ve sert malzemenin anında buharlaşmasından dolayı da malzeme kaldırmasını sağlamaktadır. Eriyik metal tamamen değil, sadece kısmen çıkarılır. Potansiyel varyasyon durağan olduğunda, plazma kanalı reddi daha uzun süre devam eder. Plazma kanalı çöktüğü için, erimiş malzemeyi terk eden bir basınç üretir ve bu nedenle bu kadar yüksek sıcaklık ve basınçta bir miktar metal erir ve aşınır. Sıcaklıktaki bu tür bölgesel aşırı artış, malzemedan istenmeyen kütle çıkarılmasını sağlar. Yüzeyden malzeme

uzaklaştırılması olayı, erime nedeniyle olduğu kadar malzemenin anında buharlaşması nedeniyle de meydana gelir [131,134].



Şekil 5.3 EEİ prensibinin şematik diyagramı [135].

İşleme sırasında EEİ dielektrik sıvısına tozların eklenmesi ve karıştırılması; toz parçacıklarına voltaj uygulandığında, bunlar iletken görevi görerek malzeme ile elektrot arasındaki boşluğu iyileştirir. Bu parçacıklar kıvılcım bölgesinin altında birleşir ve zincir benzeri yapılar oluşturacak şekilde düzenlenir. Mevcut akış yönünde, tozlar kilitlebilir. Böylece elektrot ve malzeme arasındaki mesafenin kapanmasına izin verir ve dielektrik sıvının yalıtkan yoğunluğu azalır, bu da basit bir kısa devreye neden olur. Bu, seri deşarj boşluk alanının içinde ve altında hızlı patlama yaratır. Böylece, hızlı kıvılcım üretimi, malzeme yüzeyinde daha hızlı erizyon oluşturarak MRR'yi iyileştirir. Genel olarak TKEEİ ile karşılaştırılabilir işlenmiş kaliteli YP elde

edilmesinin yanısıra, EEİ'ye göre işleme hızı verimliliğinde %70'lik bir gelişme sağlanmıştır [28,29].

5.2. MALZEME

5.2.1. EEİ Elektrotu

EEİ ile işleme yönteminde kullanılacak olan elektrodun malzemesi, istenilen özellik ve kalitede ürün elde edilebilmesi için önemlidir Elektrot malzemesi seçimini etkileyen öncelikli ana faktörler, elektrotun iletkenliği ve erozyona karşı direncidir. Tipik bir Konvansiyonel EEİ uygulamasında kullanılmak üzere, geleneksel işleme yöntemleriyle bir grafit veya bakır elektrot işlenerek önceden belirlenen boyutlarda hazırlanmaktadır. İşleme esnasında özel olarak şekillendirilmiş elektrot, güç kaynağına bağlanır, bir hidrolik veya servo-elektrik şahmerdanına takılır ve yavaşça belirlenen periyotlarla işleme yapılan parçaya beslenir [136].

5.2.2. Dielektrik Sıvı

Kerosen kullanımı EEİ ile işleme için yaygın olarak kullanılmaktadır ve düşük viskozite ve yüksek püskürtme kalitesi elde edilebilmektedir [137]. EEİ uygulamalarında parça ile elektrot arasında dielektrik sıvının iyi derecede akışı sağlanmalıdır. Yeterli ve düzenli akış sağlanmadığı takdirde, aşınmış parçacıkların işleme bölgesinde birikmesi ile işleme kararlılığı ve performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca işleme performansının yüksek olması için dielektrik sıvının düşük viskoziteye, dolayısıyla yüksek akıcılığa sahip olması istenir. Dielektrik sıvı esasen malzemeden ayrılan parçaları ortamdan uzaklaştırmak, ısınan yüzeyleri soğutmak ve kararlı deşarj oluşturmak için kullanılmaktadır [137]. TKEEİ'de yaygın olarak kullanılan dielektriklerin özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu tez çalışmasında TKEEİ ile işleme deneylerinde dielektrik sıvı olarak kerosen (gaz yağı) kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. TKEEİ'de kullanılan dielektrik sıvıların özellikleri [138].

Dielektrik Adı	Özgül ısı (J/kg-K)	Termal iletkenlik (W/m-K)	Bozulma dayanımı (kV/mm)	Parlama noktası (°C)
Deiyonize su	4200	0.62	65-70	-
Kerosen (Gazyağı)	2100	0.14	24	37-65
Madeni yağ	1860	0.13	10-15	160
Silikon yağı	1510	0.15	10-15	300

5.2.3. İşlenebilen Malzemeler

Genel olarak, tüm iletken malzemeler elektro erozyon işleme ile işlenebilir. EEİ ile işlenecek malzemelerin elektrik direncinin düşük olması gerekmektedir. Havacılık sınıfı yüksek nikel alaşımları gibi belirli malzemeler bazı işleme zorlukları ortaya çıkarabilir. Bununla birlikte genellikle çözüm, elektrot malzemesinin veya işleme hızının değiştirilmesinde yatmaktadır [133].

5.2.4. İşleme Tozları

Son yıllarda, uygun bir toz malzemenin dielektrik sıvıya karıştırılması, etkili bir EEİ ile işleme türü olarak geliştirilmiştir. Dielektrik sıvıya farklı toz ilavelerinin TKEEİ performans parametreleri üzerindeki etkilerini incelenmiş araştırmalar bulunmaktadır.

Yapılan bu araştırmacılar incelendiğinde, dielektrik sıvıya grafit, bakır, krom, alüminyum gibi birçok nano ve mikro boyutlu toz parçacıklarının eklendiği görülmektedir [33,40–42]. Bu araştırmacılar EEİ prosesine nano grafit tozu ilavesinin daha geniş bir deşarj alanı ve daha iyi YP elde edilmesine yardımcı olabileceği sonucuna varmışlardır [36,42,43].

Bu işlemede, dielektrik sıvıya karışan elektriksel olarak iletken toz parçacıkları dielektrik sıvının yalıtım gücünü azaltır ve takım ile malzeme arasındaki kıvılcım aralığını artırmaktadır [28,29,139].

Bu çalışmada yapmış olduğumuz tüm işleme deneylerinde dielektrik sıvıya karıştırılan toz katkısı olarak, parçacık boyutu 50 nm'den küçük (elektrik direnci: 11-13 $\mu\Omega\cdot\text{m}$) ve elektriksel iletkenliği yüksek olan nano grafit tozu kullanılmıştır [140,141]. Çizelge 5.2'de literatürde yaygın olarak kullanılan TKEEİ tozları ve fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Yaygın olarak kullanılan TKEEİ tozları ve fiziksel özellikleri [138].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elektriksel direnc (μΩ/cm)	Termal iletkenlik (W/m-K)
Alüminyum (Al)	2.70	2.89	236
Grafit C	1.26	103	3000
Krom (Cr)	7.16	2.6	95
Bakır (Cu)	8.96	1.71	401
Silisyum (Si)	2.33	2325	168
Nikel (Ni)	8.91	9.5	94
Silisyum karbür (SiC)	3.22	1013	300
Titanyum (Ti)	4.72	47	22
Tungsten (W)	19.25	5.3	182
Alümina Al ₂ O ₃	3.98	103	25.1
Bor karbür B ₄ C	2.52	5.5 x 10 ⁵	27.9
Karbon nanotüp (CNTs)	2.0	50	4000
Molibden disülfür (MoS ₂)	5.06	106	138

5.2.5. TKEEİ Yönteminin Elektriksel Parametreleri

Deşarj Akımı (I)

Deşarj akımı I, deşarj aralığına uygulanan enerji yoğunluğu (güç) olarak tanımlanır. Akım değerindeki artış ile doğru orantılı olarak işleme yüzeyine uygulanan enerji yoğunluğu da artmaktadır. Bu nedenle işleme hızı, yani MRR artarken yüksek yoğunluklu enerji daha derin kraterler oluşturduğu için YP değeri de artmaktadır [136].

Vurum Süresi (T_{on})

EEİ ile işlemede vurum süresi esnasında işlenen malzemenin yüzeyinden çıkarılmak istenen kütle, elektrik arkı oluşturularak kaldırılmaktadır. Vurum süresi yüzeye uygulanan elektrik ark süresinin uzunluğudur. Bu esnada yüksek elektrik voltajı ile yüzey, elektron bombardımana maruz bırakılarak yüksek ısı ve sıcaklık oluşturulur. Yüksek termal enerji ile çıkarılmak istenen malzeme kütlesi erime ve buharlaştırma yoluyla yapıdan uzaklaştırılır. Bu süredeki bir artış yapıdan daha fazla malzeme kaldırılmasını sağlar [136].

Vurum Ara Süresi (T_{off})

İki vurum arasındaki duraklama süresidir. Bu sürede, akım kesilir ve dielektrik sıvısı ara bölgeye yüksek bir basınçla gönderilir. İşlenen malzeme ve takım elektrotu soğutulur. Malzeme ile elektrot arasındaki bölgedeki artık malzemeler dielektrik sıvının taşıma etkisiyle bölgeden temizlenir ve uzaklaştırılır [136].

Vurum Çevrim Süresi

Vurum süresi ile vurum ara süresinin toplamına ($T_{on} + T_{off}$), vurum çevrim süresi denmektedir [131].

Kutuplama (Polarite)

Kutuplama; vurum süresi esnasında deşarj akımının akış yönünü belirleyen, MRR'yi ve YP etkileyen önemli bir parametredir. Elektrot ve işlenecek malzemenin kutuplama seçimi; işleme koşullarına, elektrot ve işlenecek parçanın malzemesine ve uygulama yöntemine göre tercih edilebilir. Genellikle elektrot kutuplaması negatif (-), işlenecek malzemenin kutuplaması ise pozitif (+) seçilir. İşlenecek malzemenin pozitif kutuplanması daha iyi MRR değeri sağlarken, negatif kutuplanması TAO değerinin daha düşük olmasını sağlamaktadır [131].

5.3. TKEEİ İŞLEME YÖNTEMİ İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ho ve Newman [142], dalma EEİ ile işleme yönteminin başlangıcından geliştirilmesine kadar yürütülen araştırma çalışmalarını incelemişlerdir. Performans ölçümlerini iyileştirme, süreç değişkenlerini optimize etme, ark oluşturma süreçlerini izleme ve kontrol etme, elektrot tasarımını ve üretimini basitleştirme ile ilgili EEİ işlemleri hakkında geniş rapor vermişlerdir.

Ranjith vd. [143], AZ91/5B₄C kompozitinin EEİ davranışını araştırdı. Bakır, 6061/20Grafite (GRAL-20), pirinç ve alüminyum gibi elektrot malzemelerinin SR ve MRR üzerindeki etkisini araştırdılar. GRAL-20 elektrodunun daha iyi MRR gösterdiğini ve ardından bakır elektrotun geldiğini bildirmişlerdir.

Ayrıca Jahan vd. [36], Marinho vd. [144] yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle TKEEİ için grafit tozunun eklenmesini önermişlerdir. Sonuç olarak, TKEEİ çalışmalarında, iş parçalarında daha yüksek işleme kalitesi elde etmek için toz karışımı dielektrik sıvı kullanılmıştır. Ayrıca, TKEEİ yüzeyinde bu durumun meydana gelmesi, muhtemelen işleme sırasında daha az kontrolsüz kıvılcım deşarjlarının bir göstergesidir [145,146]. Jeswani [137] kerosene 4g/L grafit tozu eklemenin MRR'yi %60 ve TAO'yu %15 iyileştirdiğini buldu. Kansal vd. [147], dielektrik içine uygun miktarda grafit tozu eklenmesinin MRR'yi artırdığını ve SR ve TAO'yu azalttığını bildirmiştir. Çalışmalar, grafit tozlu TKEEİ'nin iyi işleme performansı ve finiş sonuçları verdiğini göstermiştir.

Benzer şekilde birçok araştırmacı TKEEİ-EEİ kompozit malzemelerin vurum süresi (T_{on}) artışı, deşarj akımının (DA)) MRR'yi arttırması, takım aşınma oranı (TA) ve YP (Ra, Rz) gibi konuları araştırmışlardır [28–36]. Ayrıca, birçok araştırmacı, MMK malzemelerin TKEEİ'sinin modellenmesi ve optimizasyonları üzerinde de çalışmıştır [29,33,37–39]. Ancak mikro TiB₂-nano grafen takviyeli Mg alaşımı hibrit kompozit üzerine bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, AZ61 Mg alaşım kompozitinin TKEEİ ile işlenmesinde, özellikle bu çalışmada kullanılan takviye elemanlarının işlenmiş yüzey olgusu üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Esasen, kompozitin hibrit yapısı, güçlendirilmiş partiküllerin yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi ve kimyasal bileşimin değişmesi gibi yeni farklı malzeme sorunları getirir. Bu nedenle,

işlemeyi anlamak için birçok yeni yaklaşıma ihtiyaç duyulduğu açıktır. Sonuç olarak, bu çalışma TiB₂ ve TiB₂+nano grafen takviyeli AZ61 ve ZK60 Mg alaşımının fabrikasyonu ve nano-grafit karışık batan TKEEİ proses talaşlı imalatı üzerine organize edilmiştir. AZ61 ve AZ61 alaşımlı kompozit, mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yoluyla üretildi. İşlenmiş yüzeylerde ileri karakterizasyon için YP ölçümü, SEM, EDS, XRD ve yüzey topoğrafyası incelemeleri yapılmıştır.

5.4. OPTİMİZASYON

EEİ'nin zorluğu nedeniyle, kesme performansını iyileştirmek için optimum kesme parametrelerini belirlemek çok karmaşık ve zordur. Bu nedenle, çalışma parametrelerinin optimizasyonu, özellikle EEİ gibi geleneksel olmayan elektrikli tip işleme prosedürleri için önemli bir eylemdir. EEİ işlemi için uygun işleme parametreleri seçimi, çok sayıda ve çeşitli aralıkları nedeniyle büyük ölçüde operatörün bilgisine ve deneyimine bağlıdır. Makine üreticisi tarafından sağlanan işleme genel işleme parametreleri, operatörün gereksinimlerini karşılayamaz. Belirli özellikteki bir iş için isteğe bağlı olarak istenen işleme süresinin optimum koşullarını sağlamak oldukça zordur. Bu görevi çözmek için bu çalışmada, vuruş süresi, akım, YP ve MRR'yi etkileyen malzemeler arasındaki temel kontrol faktörlerini bulmak için istatistiksel bir deney tasarımı (DOE) tekniği geliştirilmiştir. İstatistiksel analizler, Taguchi L18 ortogonal tasarımı, ANOVA kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, tepkileri (YP ve MRR) tahmin etmek için regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Denklemlerin başarı oranı belirleme katsayısı "R²" hesaplanarak tespit edilmiştir.

Bu konuda birçok araştırmacı [29,33,37–39], MMK malzemelerinin TKEEİ-EEİ'sinin modellenmesini ve optimizasyonunu incelemiştir. Raghunath vd. [148], toz metalürjisi ile üretilen Mg/SiC kompozitlerinin EEİ özelliklerini araştırmışlardır. Optimum işlem parametrelerini bulmak için deney tasarımı ve yanıt yüzeyi metodolojisi kullanıldı. Araştırmacılar, MRR'nin artan akım ve vuruş süresinin artmasıyla arttığını bildirdiler. Aravindan vd. [146], Taguchi metodolojisi ile Mg/Al₂O₃ kompozitlerinin EEİ'si üzerindeki proses parametrelerinin (vuruş süresi, bekleme süresi) etkisini inceledi. Elektrot ve dielektrik sıvı olarak sırasıyla pirinç ve deiyonize su kullanılmıştır. Vuruş süresi ve servo hızının SR'ye katkıda bulunduğunu bildirdiler. Kavimani vd. [149],

işleme parametrelerinin Mg/r-GO kompozitlerinin TEEİ performansı üzerindeki etkisini araştırdılar. Proses parametrelerinin SR ve MRR üzerindeki etkisini belirlemek için Taguchi birleştirilmiş gri ilişki analizini kullanmışlardır. Vurum süresi ve takviyenin sırasıyla SR ve MRR'ye en yüksek katkıya sahip olduğunu bildirdiler. Oksit tabakasının oluşumu SEM ve XRD analizi ile kanıtlanmıştır. Gopal vd. [150], toz metalürjisi ile üretilen Mg/BN-Katot ışın tüpü hibrit kompozitlerinin TEEİ'sini inceledi. Optimum proses parametrelerini bulmak için proses parametrelerinin SR ve MRR üzerindeki etkisini anlamak için istatistiksel analizler (yani Taguchi ve ANOVA) gerçekleştirdiler. En iyi SR'nin düşük takviye içeriği, tel besleme ve vurum süresi için elde edildiğini bildirdiler. Ayrıca regresyon modellerinin SR ve MRR'yi doğru bir şekilde tahmin ettiğini belirtmişlerdir.

5.4.1. Deney Planlaması (DOE)

Bu çalışmada istatistiksel analizler Minitab yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Taguchi L18 dizisi, Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi üç giriş faktörü ile tasarlanmıştır: iki seviyeli vurum süresi ve üç seviyeli akım ve malzeme.

Çizelge 5.3. Kontrol faktörlerinin seviyeleri.

No	Kontrol faktörleri	Unit	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1	Vurum süresi	µs	6	400	-
2	Akım	A	4	8	16
3	Malzeme	-	A1	A2	A3
4	Malzeme	-	K1	K2	K3

Taguchi yönteminin az sayıda deneyle en iyi girdi koşulunu bulmak için önemli ve başarılı bir deneysel yöntem olduğu iyi bilinmektedir. Taguchi optimizasyonu iki önemli araç kullanır: sinyal-gürültü oranı (S/N) ve ortogonal diziler. Taguchi yönteminde S/N oranlarını kullanmak çok önemlidir ve tutarsızlığı belirlemek için genel bir S/N oranı seçilir [151]. Kullanılan en önemli üç S/N oranı, nominal iyidir, daha küçük daha iyidir ve daha büyük daha iyidir [81,152]. Bu çalışma da, MRR için "daha büyük olan daha iyidir" seçilmiştir. Daha büyük bir MRR, parçanın daha hızlı işlenmesi anlamına geldiğinden, işleme operasyonlarında daha büyük bir MRR tercih

edilir. YP için daha küçük daha iyidir seçilmiştir. Daha küçük YP'nin iyi yüzey kalitesi anlamına geldiği bildirilmektedir [150,153].

MRR için S/N oranı Denklem 1 ile hesaplanmıştır [153].

$$S / N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 / y_{ij}^2) \quad (1)$$

YP için S/N oranı Denklem 2 ile hesaplanmıştır [150].

$$S / N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}^2 \quad (2)$$

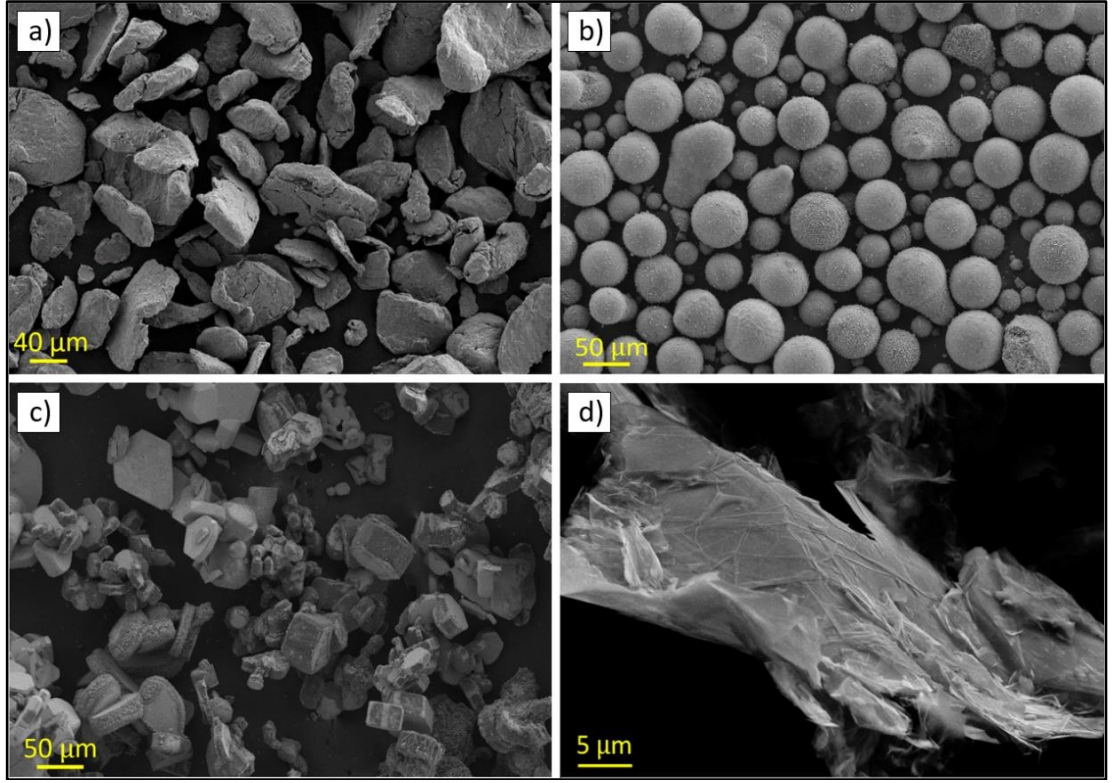
burada n tekrar sayısıdır, y_{ij} yanıttır, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, k$

BÖLÜM 6

TEORİK VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. MATRİS VE TAKVİYE MALZEMELERİ

Bu çalışmada kullanılan matris ve takviye tozları Türkiye'deki Nanografi firmasından temin edilmiştir. Matris olarak kullanılan AZ61 ve ZK60 Mg tozlarının kimyasal analiz sonuçları XRF (Rigaku ZSX Primus II) cihazı ile ölçülmüştür. XRF analiz sonuçlarına göre, AZ61 Mg alaşım tozunun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %): 5.81 Al, 0.84 Zn, 0.25 Mn ve 93.1 Mg. ZK60 Mg alaşım tozu ise birincil elementler olarak (ağırlıkça%) %93,3 Mg, %6 Zn, %0,4 Zr ve eser miktarda Al, Ti, Mn ve Si elementlerinden oluşmaktadır. AZ61 matris alaşım tozları partikül boyutu yaklaşık 36 mikron (μm), ZK60 matris alaşım tozları partikül boyutu yaklaşık 50 μm 'dir. TiB₂ toz partikül boyutu yaklaşık 40-50 μm , grafen partikül boyutu yaklaşık 5 nm ve saflık oranı %99.9'dur. Şekil 6.1, bu çalışmada kullanılan tozların SEM ile çekilmiş görüntüleridir.



Şekil 6.1. Tozların SEM resimleri: a) AZ91, b) ZK60, c) TiB₂, d) Grafen.

6.2. T/M METODU İLE KOMPOZİT ÜRETİMİ

Bu çalışmada, AZ61 ve ZK60 Mg matrisli kompozit numuneleri üç ayrı bileşimde: takviyesiz alaşım, mikropartikül-TiB₂ takviyeli ve mikro TiB₂ + nanografen takviyeli numuneler olarak, toz metalurjisi (sıcak presleme) yöntemiyle üretilmiştir. Numunelerin karışım oranları ve çalışma boyunca kullanılan, numuneleri temsil eden kodlamaları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Tozların ağırlıkları belirlenen bileşimde, 0.0001 g hassasiyete sahip Radwag marka elektronik terazi kullanılarak ölçülmüştür.

Çizelge 6.1. T/M sıcak presleme yöntemiyle üretilen AZ61 ve ZK60 matrisli, mikro-nano parçacık takviyeli kompozit numunelerin içeriği ve çalışma boyunca temsilen kullanılan kodları.

Numune Kodu	Matris	Takviye Partikülü (% ağırlıkça)	
		Mikro- TiB ₂	Nano-Grafen
A1	AZ61	-	-
A2		15	-
A3		15	0.5
K1	ZK60	-	-
K2		15	-
K3		15	0.5

Kompozit numunelerin üretim aşamalarını gösteren şema Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Kompozit numunelerin üretim şeması.

6.2.1. Mekanik Alaşımlama

Tartılan tozlar, homojen bir karışım elde etmek için, mekanik alaşımlama cihazı ile toplamda 1’er saat karıştırılmıştır. Mekanik alaşımlama saat yönünde 350 rpm’de 30 dakika ve 15 dakika beklendikten sonra saat yönünün tersi yönde 30 dakika daha karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik alaşımlama cihazının görseli aşağıdaki Şekil 6.3’te verilmiştir.



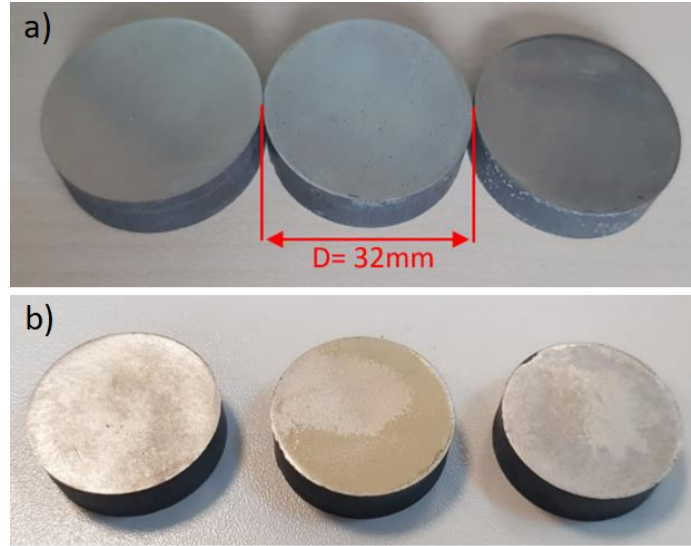
Şekil 6.3. Mekanik alaşımlama cihazı.

6.2.2. Sıcak Presleme

Son olarak, tozlar çalışma kapsamında ürettirmiş olduğumuz grafit kalıba dökülmüş ve sıcak pres cihazında (MSE HP_1200,) üretimler gerçekleştirilmiştir. Sıcak pres üretimleri, 12 dakika boyunca 45 MPa basınç altında ve 50 dakika boyunca 30 Mpa basınç altında, gerçekleştirilmiştir. Tüm üretimlerde sinterleme sıcaklığı 525 °C olarak uygulanmıştır. Üretim sırasında koruyucu gaz atmosferi olarak Argon gazı kullanılmıştır. Üretim çalışmalarında kullanılan sıcak pres cihazı Şekil 6.4'te verilmiştir. Üretilmiş olan, test ve analizlerde kullanılan numuneler Şekil 6.5'te görülmektedir. Boyutları 32 mm çapında ve yaklaşık olarak 9 mm yüksekliğindedir.

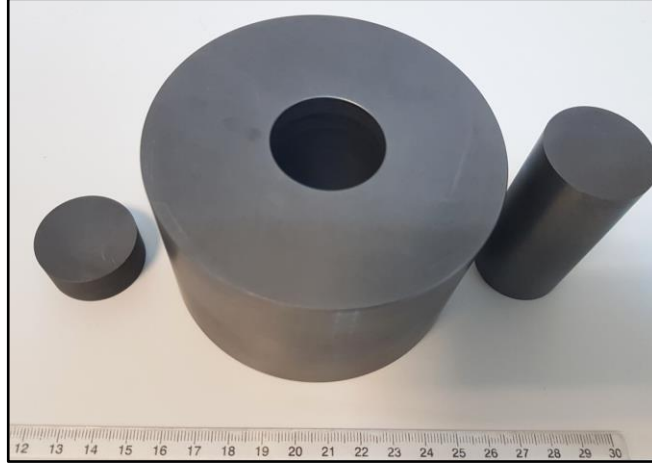


Şekil 6.4. Sıcak pres cihazı.



Şekil 6.5. Üretilen a) AZ61 matrisli (soldan sağa sırasıyla A1, A2 ve A3) ve b) ZK60 matrisli kompozit numuneler (soldan sağa sırasıyla K1, K2 ve K3).

Sıcak pres üretimlerinde kullanılan, proje kapsamında grafit malzemeden yapılmış olan kalıbın resmi Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Sıcak pres üretimlerinde kullanılan grafit kalıp.

Bu çalışmadaki üretimlerde kullanılan Sıcak pres-sinterleme parametreleri Çizelge 6.2.'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. T/M numunelerinin sinterleme parametreleri ve değerleri.

Parametreler	Değer
Uygulanan Presleme Basıncı	45 MPa
S. Basıncı Uygulama Süresi	12 dk
Sinterleme Sıcaklığı	525 °C
Toplam Sinterleme Süresi	62 dk
Sinterleme Sıcaklığı	525 °C
Kontrollü Atmosfer Gazı	Argon

6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Üretilen T/M numunelerinin yoğunluk ölçümü için $\pm 0,0001$ g hassasiyete sahip bir Radwag elektronik terazisi kullanılmıştır. Arşimet ilkesine göre, saf su ile doldurulmuş bir haznede her numune için üç başarılı deney yapılarak gerçek yoğunluklar bulunmuştur. Numunelerin havadaki ağırlıkları ve saf su içerisindeki ağırlıkları farkı hesaplanarak yoğunlukları elde edilmiştir. Numunelerin gözeneklilik oranları teorik

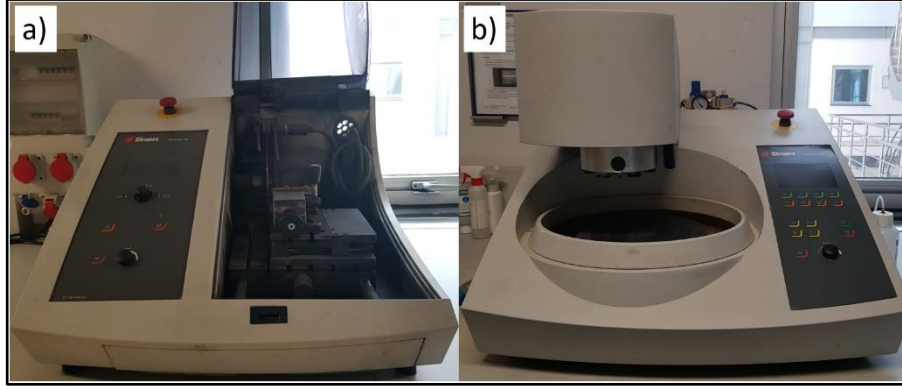
yoğunluklar kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.7’de yoğunluk ölçüm düzeneği verilmiştir.



Şekil 6.7. Elektronik terazi ve yoğunluk ölçüm düzeneği.

6.4. NUMUNE HAZIRLAMA VE MİKROYAPI TESTLERİ

Numunelerin mikroyapısal incelemesi için, taşlama, parlatma ve dağlama olarak bilinen standart metalografik yöntem izlenerek numuneler hazırlanmıştır. Numune zımparalama işlemleri 320-3000 arası SiC zımpara kâğıdı ile gerçekleştirilmiş, 3 ve 1 mikron elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Dağlama çözeltisi, 10 ml asetik asit, 5 g pikrik asit, 10 ml etanol ve 75 ml damıtılmış saf su içerir. Numune hazırlama işlemlerinde kullanılmış olan hassas kesme ve zımpara-parlatma cihazı Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. a) Hassas kesme cihazı, b) Zımparalama-parlatma cihazı.

Mikroyapısal karakterizasyon, EDS (Bruker X Flash 6/10) ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM, Carl Zeiss Ultra Plus) kullanılarak tamamlanmıştır. XRD cihazı (Rigaku Ultima IV), Cu-X ışın tüpü ($k: 1.54\text{\AA}$) ile faz tespiti için $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızında çalıştırılmıştır. Tetas (2θ) açıları (Bragg yasası) olarak kırınım desenleri 10° ile 90° arasında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı karakterizasyonlarında kullanılmış olan XRD cihazı Şekil 6.9’da ve SEM cihazı Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.9. XRD cihazı.



Şekil 6.10. SEM Cihazı.

6.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin sertlik değerleri, üniversal bir sertlik cihazı (Qness, Q10 A+ Micro Hardness) ile 15 saniye boyunca 1 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her numune için en az 7 farklı başarılı ölçümün ortalama değeri sertlik değeri olarak değerlendirilmiştir. Sertlik cihazı Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Sertlik ölçüm cihazı.

6.6. BASMA TESTLERİ

Basma test numuneleri her numune grubu için 8 mm kenar uzunluğuna sahip küpler halinde hazırlanmış olup, deneyler Zwick/Roell 600 kN basma cihazı ile ASTM E9 standardı kapsamında ve 0.03 mm.dk^{-1} hızında gerçekleştirilmiştir. Basma deneyi cihazı Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Basma test cihazı.

6.7. AŞINMA TESTLERİ

Aşınma testleri, Çizelge 6.3'te verilen parametrelerle ileri-geri aşınma testi uygulanarak UTS T10/20 aşınma test cihazında (Şekil 6.13) gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 10, 20 ve 40N olmak üzere üç farklı aşınma yükü, 200 metre sabit aşınma mesafesi ve aşındırma elemanı olarak AISI 420 çelik bilyalar kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranını hesaplamak için aşınma hacmi toplam kayma mesafesine (m) bölünmüştür. Aşınma hacmi: Aşınma derinliği, aşınma genişliği ve strok mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır. Aşınma bölgesi kesiti bir parabol olarak kabul edilmiştir. Aşınma hacmi kaybı aşağıdaki denklem (E.1.) ile hesaplanmıştır.

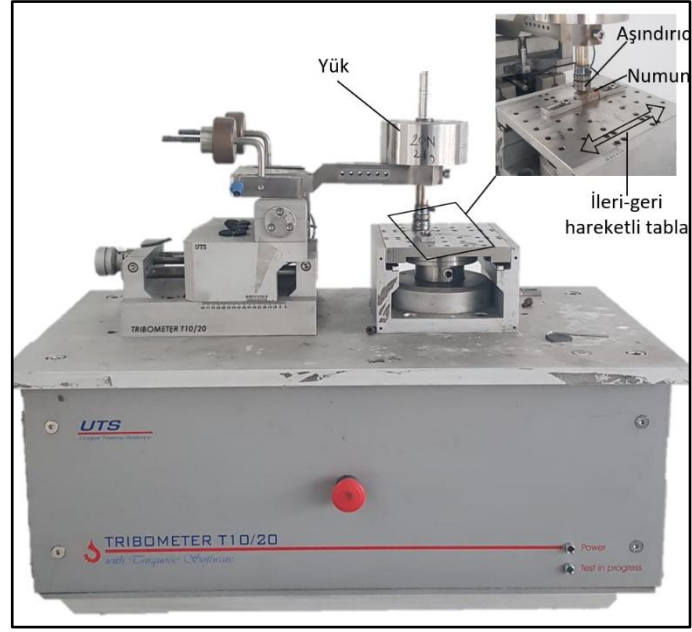
Aşınma hacim kaybı;

$$V_w(\text{mm}^3) = \frac{2ab}{3} c , \quad (\text{E.1.}) [73]$$

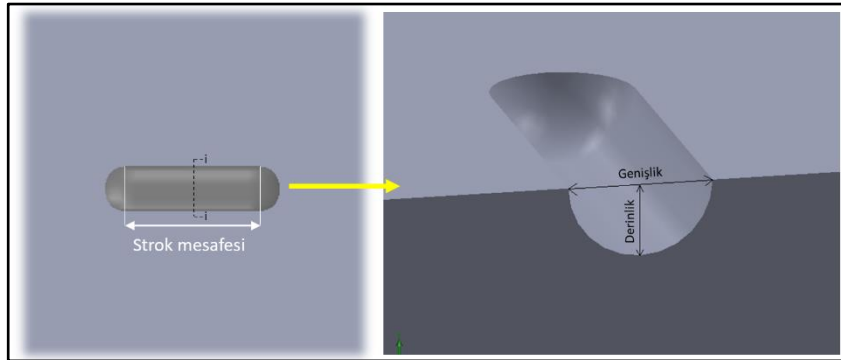
V_w , aşınma hacim kaybını (mm^3), c strok mesafesini, a aşınma genişliğini ve b aşınma derinliğini ifade eder (Şekil 6.14). Aşınmış yüzeyler, Elektron kırınım Spektroskopisi (EDS) ile donatılmış EDS Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

Çizelge 6.3. Aşınma testi parametreleri ve değerleri.

Parametreler	Değerler
Yük	10N, 20N, 40N
Strok	7 mm
Aşındırıcı materyal	AISI 420 çelik
Frekans	3 Hz
Aşınma mesafesi	200 m
Aşınma hızı	42 mm/s
Sıcaklık ve Nem	24 C, 27%



Şekil 6.13. Aşınma test cihazı.



Şekil 6.14. Aşınma hacim kaybı ölçümünün gösterimi.

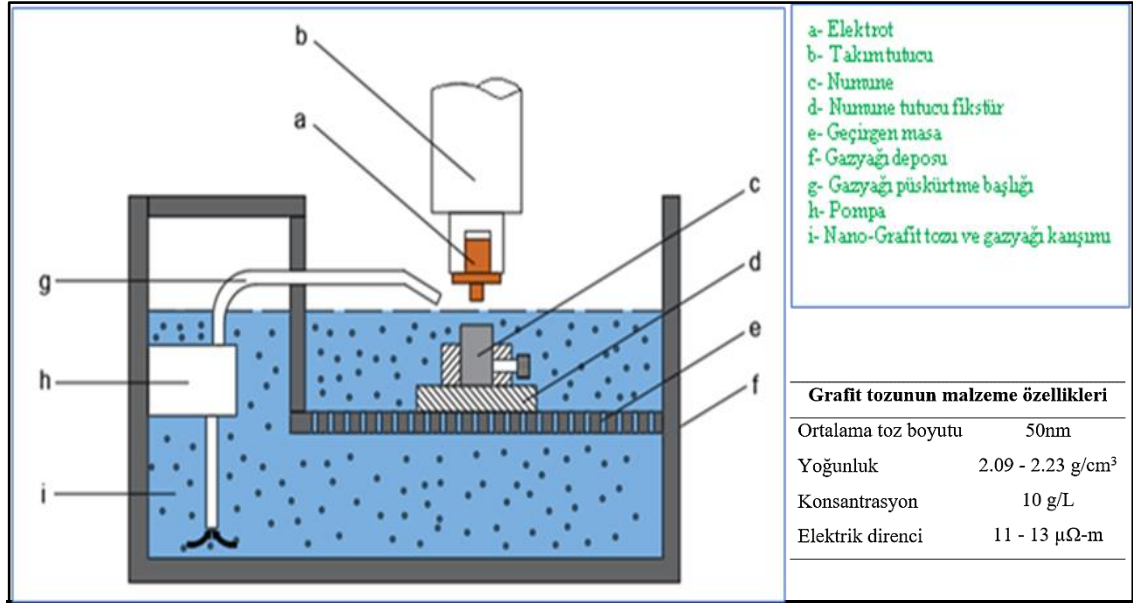
6.8. ELEKTRO EREZYON TESTLERİ

TKEEİ işleme sistemi ve nano grafit tozunun özellikleri Şekil 6.15'te gösterilmektedir. Çizelge 6.4 nano-grafit karışımlı TKEEİ'nin işleme parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 6.4. TKEEİ işlem parametreleri.

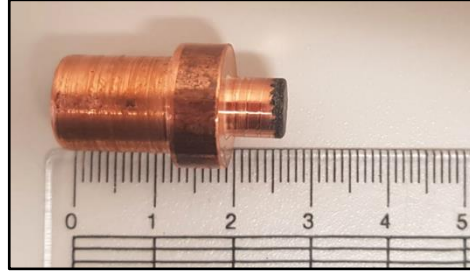
Parametre İsimleri ve Birimleri	Değerler
Deşarj Akımı (A)	4, 8, 16
Vurum Süresi (T_{on} , μs)	6, 400
Bekleme süresi (T_{off} , μs)	10
Elektrot Türü	Bakır (99,9% saflık)
Voltaj (V) kutupları	Elektrot (-), Malzeme (+)
Dielektrik sprey	Toz katkı ve konsantrasyonu
Dielektrik sıvı	Gazyağı
Dielektrik toz katkısı	Nano grafit toz (5 bar-10 g/L)

Kompozit numunelerin elektro dalma erozyon yöntemi ile işlemlerinde, Charmilles marka, “D20” tip endüstriyel elektro erozyon tezgâhı kullanılmıştır. Her işleme parametreleriyle 2 şer delme işlemi yapılmış ve sonuçlar değerlendirilirken her iki işleme bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması nihai sonuç değeri olarak alınmış ve kullanılmıştır.



Şekil 6.15. TKEEİ sistemin şeması.

EEİ işlemlerinde genellikle bakır malzemesinden üretilen elektrotlar tercih edilmektedir ve bakır elektrotlar yüksek elektriksel iletkenliği ile üstün yüzey kalitesi göstermektedirler. Şekil 6.16'da bu çalışma kapsamında üretilmiş ve deneylerde kullanılmış olan bakır elektrot verilmiştir. Bakır elektrot 7 mm çapa sahip olarak geleneksel işleme yöntemi ile üretilmiştir.

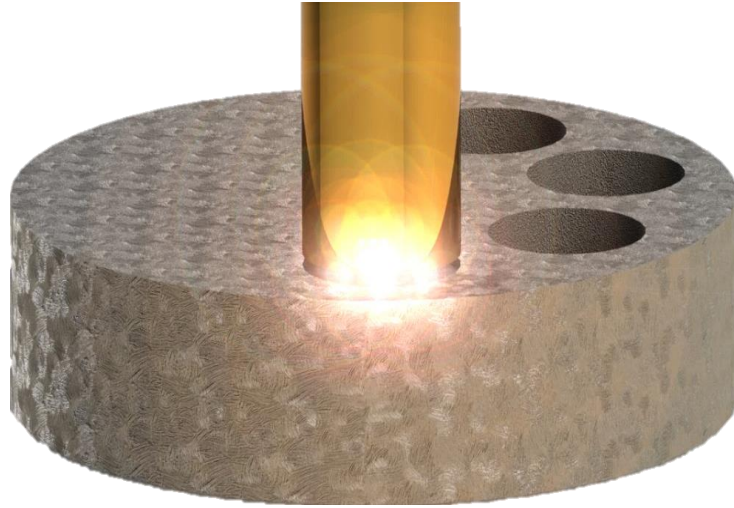


Şekil 6.16. Bu çalışma kapsamında üretilmiş ve deneylerde kullanılmış olan bakır elektrot

Dielektrik sıvı olarak gazyağı kullanımı yaygındır. Gaz yağı ile düşük viskozite ve yüksek püskürtme kalitesi elde edilir [137]. Dielektrik akışkan uygulaması yanıl püskürtme olarak gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, tüm işleme deneylerinde toz partikül boyutu 50 nm'den küçük (elektrik direnci: 11-13 $\mu\Omega\cdot\text{m}$) olan nano-grafit tozu kullanılmıştır [140,141]. TKEEİ testlerinde kullanılan işleme tezgahının görseli Şekil 6.17'de ve işleme esnasında oluşan arkın şematik gösterimi Şekil 6.18'de verilmiştir.



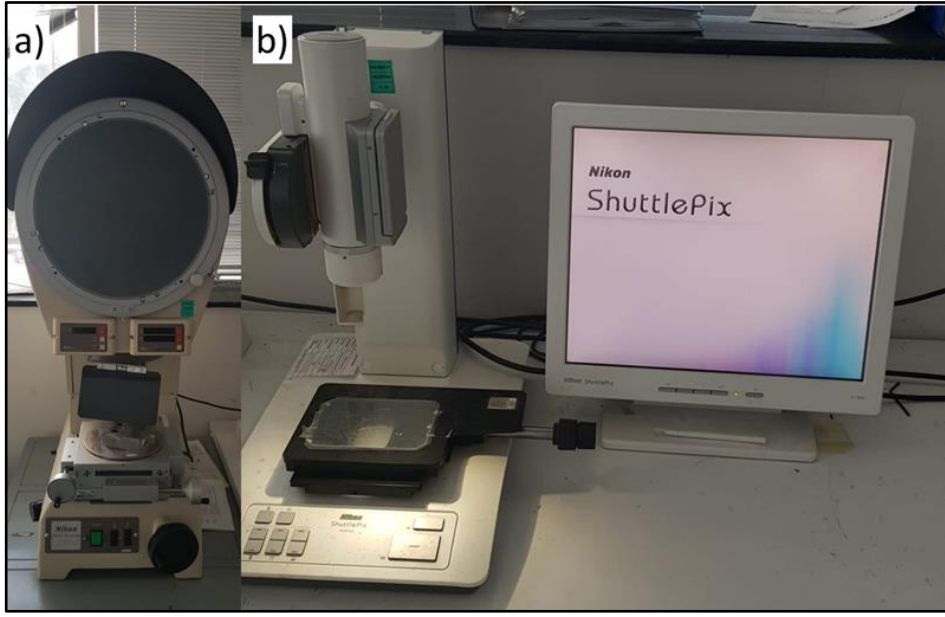
Şekil 6.17. TKEEİ testlerinde kullanılan işleme tezgahı.



Şekil 6.18. EEİ işleme esnasında ark oluşumuna ait bir gösterim.

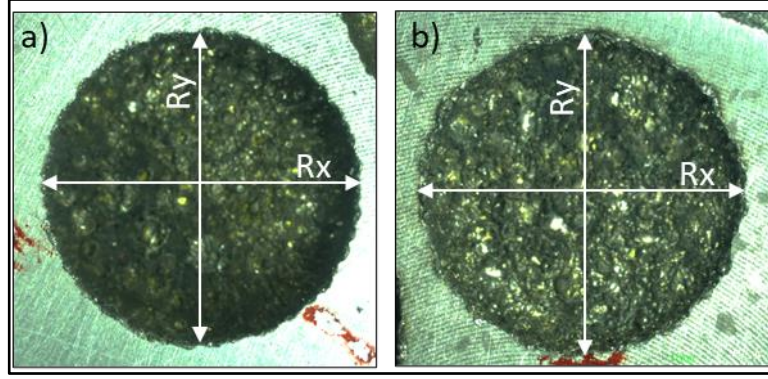
6.8.1. İşlenmiş Numunelerin Geometrik Ölçümleri

TKEEİ yöntemiyle işlenmiş numunelerin işleme bölgesindeki daireselliklerinin kıyaslanması ve işleme kalitesinin incelenmesi, çaplarının boyutsal-geometrik ölçümü için projeksiyona entegre edilmiş olan Nikon ShuttlePix stereo mikroskobu kullanılmıştır. Çapların ölçümünde kullanılan projektör ve işleme bölgelerinin görüntülerinin alınmasında kullanılan Nikon ShuttlePix stereo mikroskobu Şekil 6.19’da verilmiştir.



Şekil 6.19. a) Projektör, b) Nikon ShuttlePix stereo mikroskobu

Nikon ShuttlePix stereo mikroskobu ile alınmış olan A1 numunesinin minimum ve maksimum parametreler ile işlenmiş yüzeylerine ait görüntüler Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20. A1 numunesinin (a) minimum ve (b) maksimum parametreleri ile TKEEİ işlemleri yapılmış yüzeylere ait makro görüntüleri.

6.8.2. İşlenmiş Yüzeylerin Topografya ve YP Ölçümleri

TKEEİ işlenmiş parçaların YP'leri, 25-50 mm çapraz uzunlukta 0.3-0.5 μ m'lik yüksek düzlük özelliğine sahip Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Buna ek olarak, yüzey topografyaları Zee Scope 3D mikroskop (güvenilir, hızlı ve hassas bir 3D yüzey metroloji cihazı) kullanılarak ölçülmüş ve 3 boyutlu olarak işleme yüzeyleri haritalanmıştır.

BÖLÜM 7

DENEY VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. SERTLİK

Toz metalurjisi ile üretilen kompozit numunelerin sertlik sonuçları sırasıyla A1: 72.68 ± 2.25 , A2: 100.77 ± 3.15 ve A3: 91.17 ± 2.34 olarak Vickers (HV_1) sertlik ölçme yöntemi ile ölçülmüştür. Çizelge 7.1 de görüldüğü gibi, A2 numunesinin sertlik değeri A1 numunesine göre %38.65, A3 numunesinin ise %25,44 oranında artış göstermiştir. K1, K2 ve K3 numunelerinin sertlik değerleri ise sırasıyla 76.3 ± 2.7 , 87.1 ± 3.6 ve 82.1 ± 1.7 dir. Çizelge 7.1'te görüldüğü gibi, K2 numunesinin sertlik değeri K1 numunesine göre %14, K3 numunesinin sertlik değeri K1 numunesine göre %7.65 artmıştır. Öte yandan A3 hibrit kompozitin sertlik değeri A2 numunesinin sertliğine göre %9.5, K3 hibrit kompozitin sertlik değeri K2 numunesinin sertliğine göre %5.7 daha az sertlik değeri göstermiştir. Mikro TiB_2 ve nano grafen takviyeli AZ61 ve ZK60 Mg matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretildiği ve TiB_2 takviyesinin numunenin genel sertliğini önemli ölçüde arttırdığı açıkça görülmektedir. Kuşkusuz pek çok araştırmacının [154,155] belirttiği gibi sertlikteki bu artışın nedeni, matris (ZK60-76 HV) yapısından daha sert olan TiB_2 (1800 HV) eklenmesidir.

Araştırmacılar [156–158] sertlikteki bu artışı, takviye partikülünün sebep olduğu tane inceltme ve matris yapısındaki daha sert olan takviye elemanlarının batmaya karşı oluşturduğu daha yüksek direnç kuvveti ile açıklamışlardır. Bu elemanlar, sertlik ölçümü yapılırken batma esnasında lokalize matris deformasyonunu sınırlar. Diğer yandan, A2 ve K2 numunesine nanografen ilavesi (hibrit kompozit numune elde edilmesi) literatürde bildirilen genel beklentinin aksine [159–161], sertlik değerini düşürmüştür. Grafen nano partiküllerin (GNP) eklenmesiyle A3 numunesinde beklenen pozitif sertlik artışı gerçekleşmemiştir. Bu durum, GNP'lerin yapıda tam

olarak homojen bir şekilde dağılmamış olmalarına ve bazı GNP'lerin topaklanmış olmalarına bağlanılmaktadır [86,161].

Çizelge 7.1. Numunelerin sertlik değerleri.

Kod	Sertlik (HV ₁)	Sertlik Artışı (%)
A1	72.68±2.25	-
A2	100.77±3.15	38.65
A3	91.17±2.34	25.44
K1	76.3±2.7	-
K2	87.1±3.6	14
K3	82.1±1.7	7,65

HV₁ : Vickers sertlik ölçeği (1 kgf yük altında)

Birçok araştırmacı nano ve mikro takviyeli MMK üzerine yaptıkları çalışmalarda sertlik gelişimi hakkında bilgi vermişlerdir. Bu araştırmacılardan Kevorkijan vd. [162], Mg/B₄C%50 (hacimce) kompozit ve saf Mg numunelerini basınçsız infiltrasyon yöntemi ile üretmişlerdir. Kompozitin sertlik değerinin, saf Mg ile karşılaştırıldığında sırasıyla 80 ve 39 (HRC) olduğunu bildirmişlerdir. Jiang vd. [163], toz metalurjisi ile ürettikleri Mg-B₄C kompozitleri için artan partikül içeriği ile sertlikte önemli bir artış rapor etmişlerdir. Hacimce %10 ve %20 B₄C takviyesi ile ürettikleri kompozitlerde, sertlik değerlerini sırasıyla 44 ve 133 (HB) olarak bildirmişlerdir. Güteryüz vd. [12], toz metalurjisi ile üretilen Saf Mg ve Mg/B₄C %9 (ağ.) kompozit numunesinin sertlik değerlerini sırasıyla 38 ve 55 (HB) olarak bildirmişlerdir.

M. Rashad vd. [156], farklı oranlarda nanoparçacıkların eklenmesiyle elde edilen kompozitlerin sertlik gelişimlerini rapor etmişlerdir. Sonuç olarak Mg-1Al matrisine kıyasla sırasıyla %0,6 (ağ.) grafen ve ağırlıkça %0,6 (ağ.) karbon nanotüp takviyeleri ile 13 HV, 11 HV civarında bir artış sağlamışlardır. Araştırmacıların tespitlerine göre bu parçacık takviyeleri buldukları bölgelerde, Mg matrisinin sertlik değerlerini ve penetrasyona karşı dirençlerini arttırmaktadırlar.

7.2. YOĞUNLUK

Üretilen numunelerin teorik, deneysel ve bağıl yoğunluk değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Bu çizelgeye göre bağıl yoğunluklar sırasıyla A1-98.9%, A2-90.2%, A3-91.1% ve K1-99.5%, K2-89.1%, K3-89.8%'dir. A1 numunesinin A2 ve A3'e, K1 numunesinin K2 ve K3 numunelerine göre daha yüksek bir bağıl yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Önceki araştırmacılar bu çalışmaya benzer sonuçlar bildirmiştir. Paramsothy vd. [164] bu durumu yapıda tespit edilen ince mikro gözeneklerle açıklamışlardır. Rashad vd. [99] porozite miktarının sinterleme sırasında iç yapıdaki difüzyonla boşlukların kapanmasından ve bunun sonucunda oluşan difüzyon ve büzülmeden etkilendiğini bildirmiştir. Ayrıca tozların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılığın da porozite miktarı üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Sonuç olarak, partikül takviyesinin T/M tarafından üretilen metal matrisli kompozitlerin bağıl yoğunluğunu azalttığını bildirmişlerdir. Bağıl yoğunluğu ve benzer şekilde porozite oranını etkileyen ana parametreler olarak sinterleme sıcaklığı ve süresi, pres basıncı, matris yapısı ve takviye elemanları, toz partikül boyutu ve kimyasal bileşimi, ana etkenler olarak yer almaktadır. Düşük bağıl yoğunluk, sıkıştırılabilirliği engelleyen daha sert parçacıkların varlığına bağlanabilir [81]. Bilindiği gibi, sinterleme sırasında metal kütlesi, metal atomlarının difüzyonu ile numunedeki preslenmiş toz partikülleri arasındaki malzeme boşluklarına akar; preslenmiş numunenin yoğunluğunu artırır ve toplam hacimde bir azalmaya neden olur. Metal atomları tane sınırları boyunca iç gözeneklerin duvarlarına doğru hareket ederek kütleli numunenin iç kütlesine yeniden dağıtır ve gözenek sayısını azaltır [165]. Bu nedenle bağıl yoğunluğu artırmak ve gözeneklilik miktarını azaltmak için, her matris ve takviye elemanı kombinasyonunun T/M üretim parametrelerin hassas bir şekilde belirlenmesinde fayda vardır. İstenirse bu parametreler değiştirilerek daha yüksek bağıl yoğunluklar elde edilebilir.

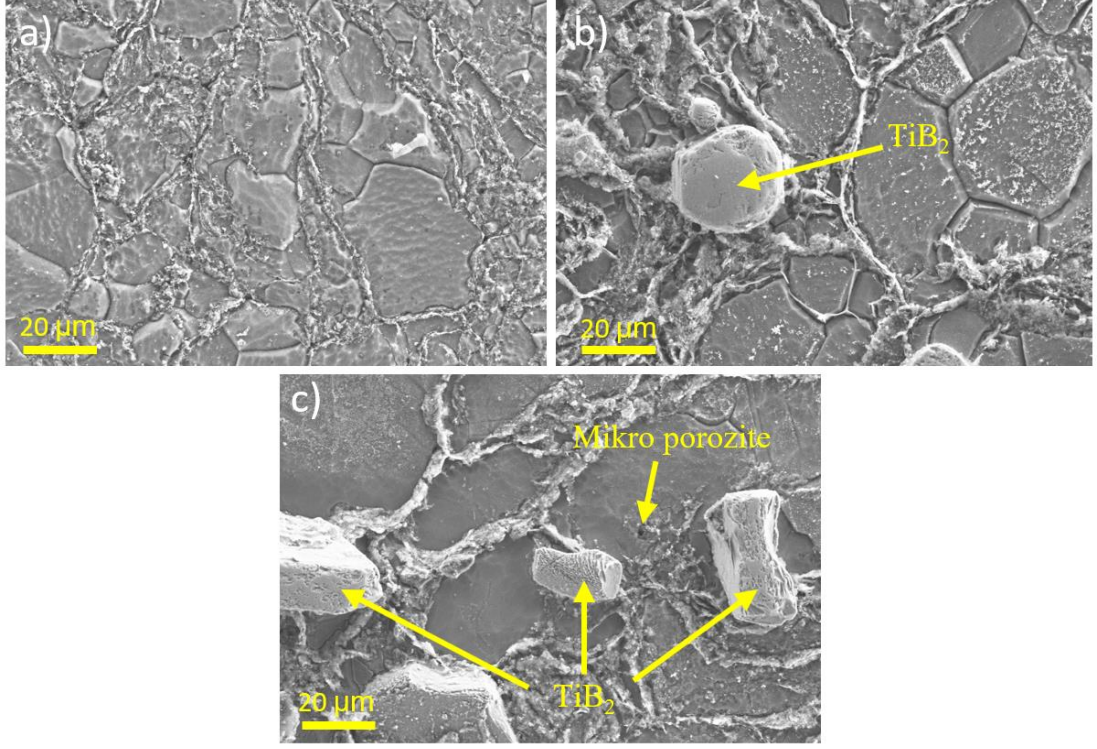
Çizelge 7.2. Numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	DeneySEL Yoğunluk (g/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
A1	1.810	1.790	98.9
A2	2.216	1.999	90.2
A3	2.217	2.020	91.1
K1	1.830	1.821	99.5
K2	2.233	1.990	89.1
K3	2.235	2.008	89.8

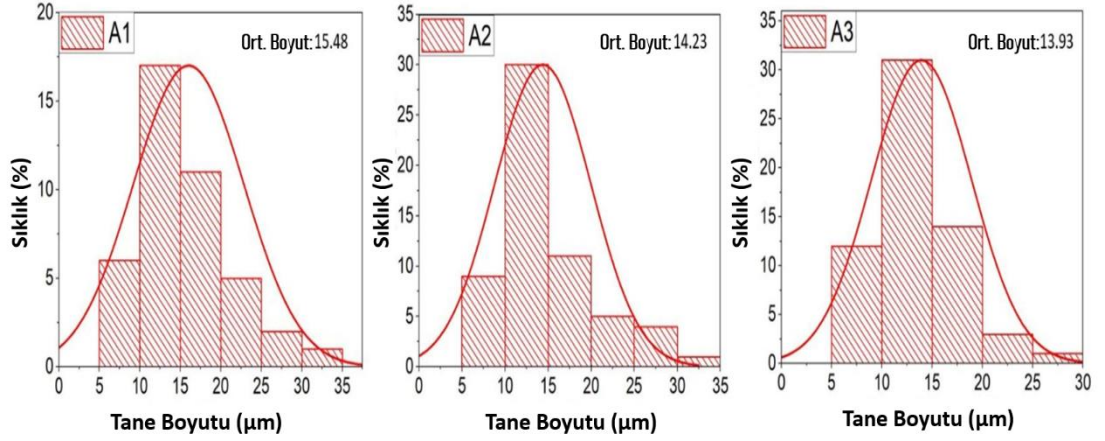
7.3. MİKROYAPI ANALİZİ

7.3.1 AZ61 Matrisli Kompozitler

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi, SEM analizlerinde genel olarak homojen bir mikro yapı gözlenmektedir. Farklı bileşimlere sahip Mg matrisli kompozitlerin mikroyapıları SEM kullanılarak incelenmiştir. TiB₂ mikro partikülleri (oklarla gösterilen), A2 ve A3 kompozitlerinde açıkça görülebilmektedir. Mekanik alaşımlama aşamasında iyi bir karışım gerçekleştirildiği ve mikron TiB₂ tozların homojen olarak karışımlarının sağlandığı görülmektedir. Bazı bölgelerde mikro gözenekler görülmektedir ve bu gözeneklerin yoğunluğun azalmasında büyük rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca, XRD ve görüntü analizi (SEM) sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.2, A1, A2 ve A3 kompozitlerinin tane boyutu dağılımını göstermektedir. Ölçüm sonuçları, A1, A2 ve A3'ün tane boyutlarının sırasıyla 15.48 µm, 14.23 µm ve 13.93 µm olduğunu göstermektedir.

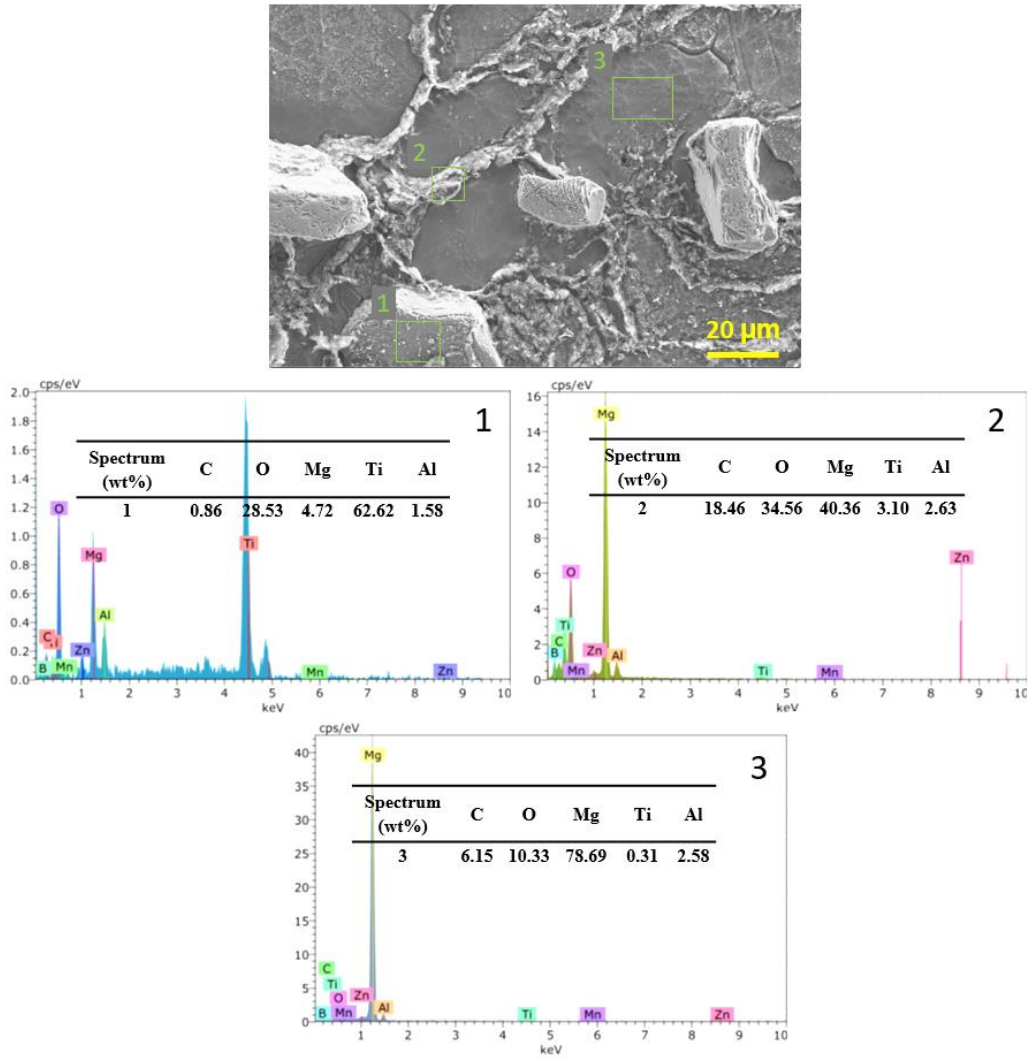


Şekil 7.1. T/M tarafından üretilen (a) A1, (b) A2 ve (c) A3 kompozitlerinin SEM mikro fotoğrafları



Şekil 7.2. Numunelerin tane boyutu dağılımı.

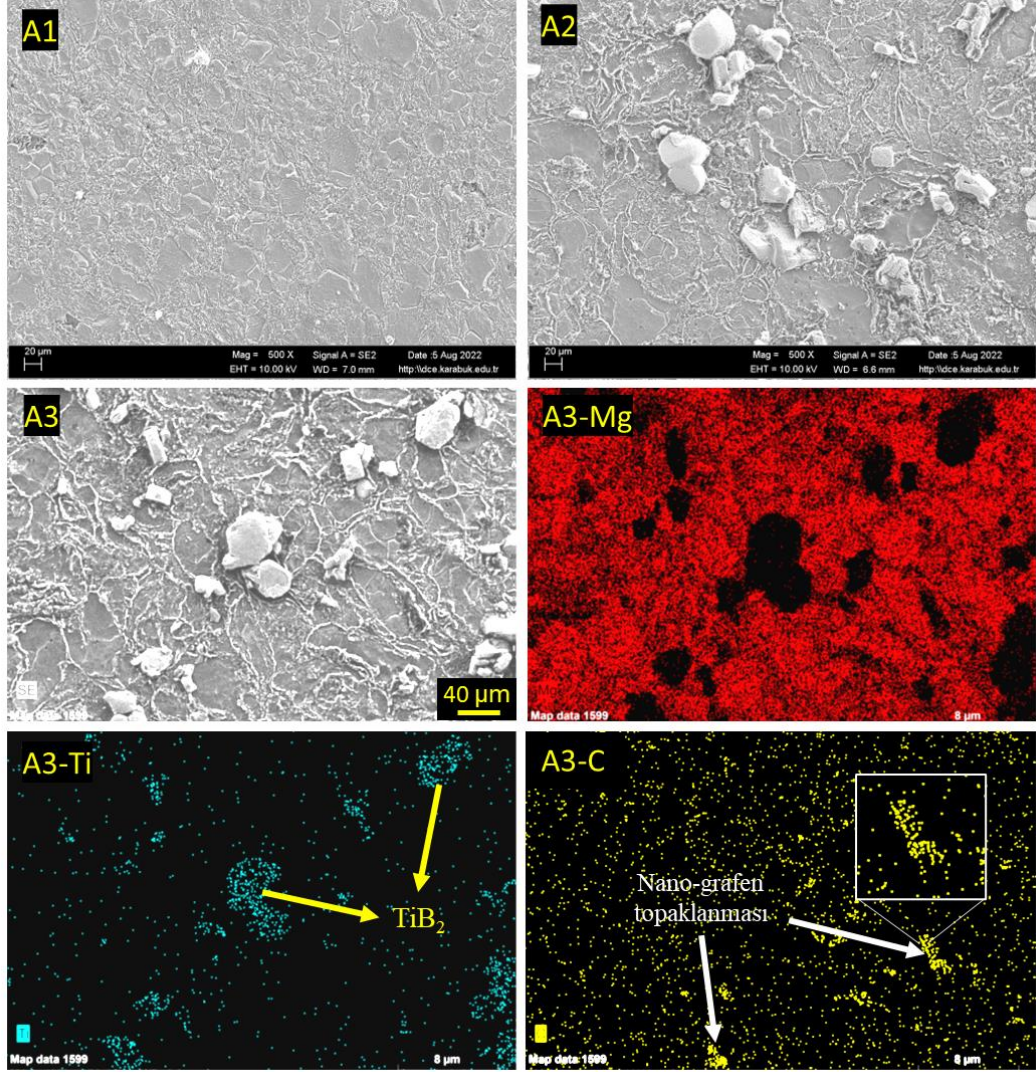
Şekil 7.3'teki A3 kompozitine ait EDS analizi ve bölgesel element oranları verilmiştir. Alan 1 bölgesinde TiB₂ partikülünün olduğu elde edilen Ti'ye ait elementel orandan ve ayrıca görüntüden de anlaşılmaktadır. Alan 2 ve Alan 3'ün matris malzemesine ait bölgeler olduğunu EDS sonuçlarından ve verilen görüntüden tespit edebilmekteyiz. SEM görüntüleri ve elde edilen EDS sonuçları beklendiği şekilde tutarlıdır diyebiliriz.



Şekil 7.3. T/M tarafından üretilen A3 kompozitinin EDS analizleri.

Şekil 7.4'te Sırasıyla A1, A2, A3 numunelerinin SEM mikroyapı fotoğrafları ve A3 numunesinin EDS haritalama analizi ile Mg, Ti, C dağılımları verilmiştir. Genel olarak homojen yapıların elde edildiği söylenebilmektedir. Öte yandan, A2 numunesi iri ve küçük TiB_2 partikülleri içermektedir. Şekil 7.4'teki A3 numunesinin C elementel SEM-EDS haritasının fotoğrafı, C açısından zengin bölge kümelenmesini, yani GNP topaklanmalarını (A3 için) göstermektedir. Şekil 7.4 ayrıca Ti dağılımının A2 ve A3 numuneleri için homojen olduğunu göstermektedir. Mg'nin, A2 ve A3 numunelerinin yüzeyinde GNP ve TiB_2 bulunan bölgelerde mevcut olmadığı, Mg a ait EDS

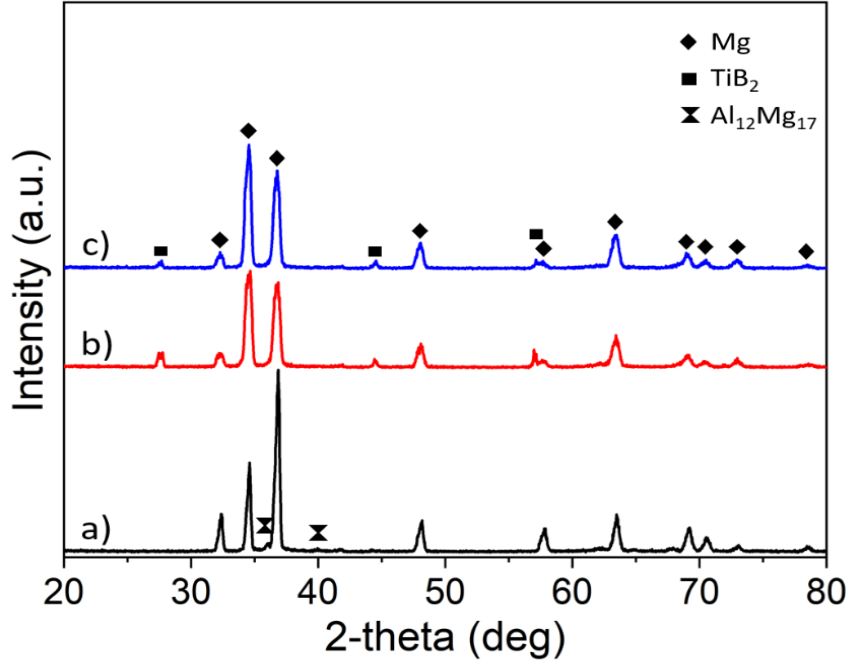
haritalama fotoğrafından görülmektedir. Genel olarak bilindiği üzere EDS, C tespitine karşı çok hassas değildir. Bununla birlikte, bu fotoğraf, C açısından zengin durumlardaki dağılımı bir dereceye kadar anlaşılır şekilde gösterebilmektedir.



Şekil 7.4. Sırasıyla A1, A2, A3 numunelerinin SEM-EDS mikrofotografaları ve EDS analizi ile A3 numunesinin Mg, Ti, C dağılımları.

Şekil 7.5'te görüldüğü gibi AZ61 ve kompozitlerine ait Xrd analizi verilmiştir. A2 ve A3 kompozitlerinin XRD analizlerinde TiB₂'nin varlığı piklerinin belirginliğinden açıkça anlaşılmaktadır. A3 numunesinin XRD analizinde, grafene ait pik noktaları standart ölçüm yöntemi ile tespit edilememektedir. Bunun nedeni XRD cihazının, belirli bir oranın altındaki pikleri tespit edememesi ve bu nedenle grafene ait piklerin

net olarak görülememesi olarak bilinmektedir [136,160]. Mg-TiB₂'nin kompozit yüzeyinde ve arayüzünde oksijen MgO [166] fazı şeklinde bulunabilir. Mg ve TiB₂ arasında olağandışı bir faz oluşmadığı da analizden anlaşılmıştır. %15 TiB₂ ilavesi ile Mg piklerinin şiddetinin TiB₂ takviyesi ile bir miktar bastırıldığı ve hafifçe azaldığı grafikte gözlemlenmektedir.

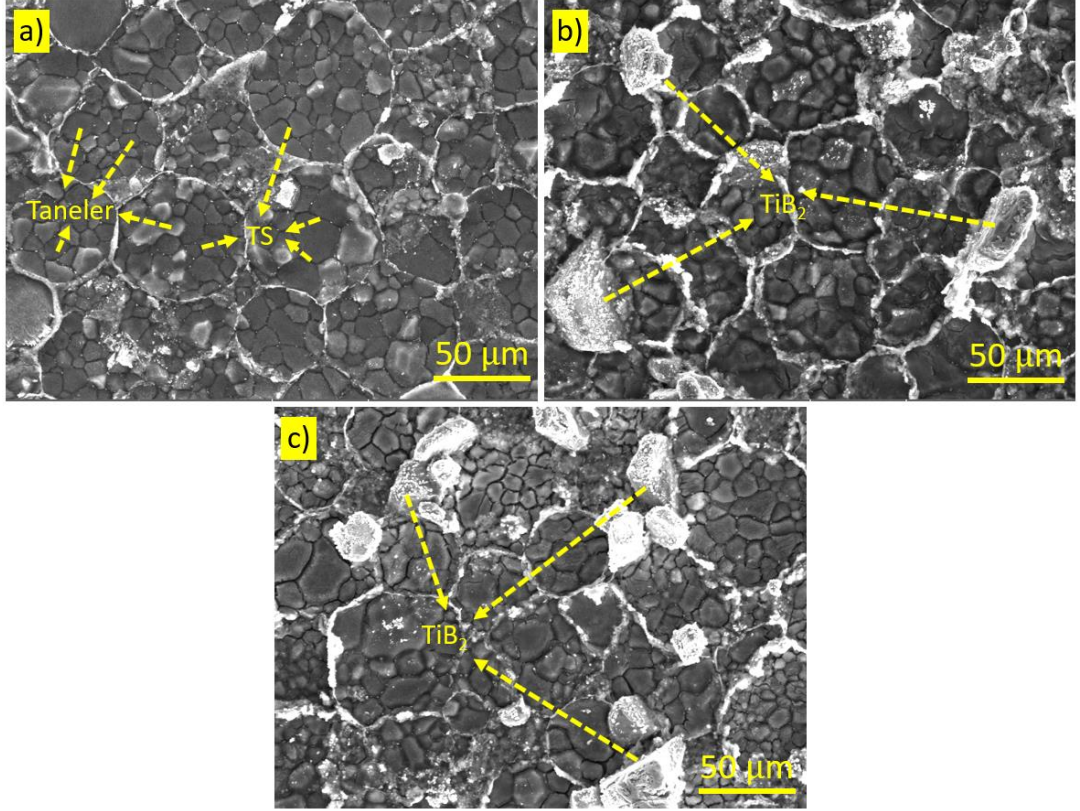


Şekil 7.5. a) A1, b) A2 ve c) A3'ün XRD desenleri.

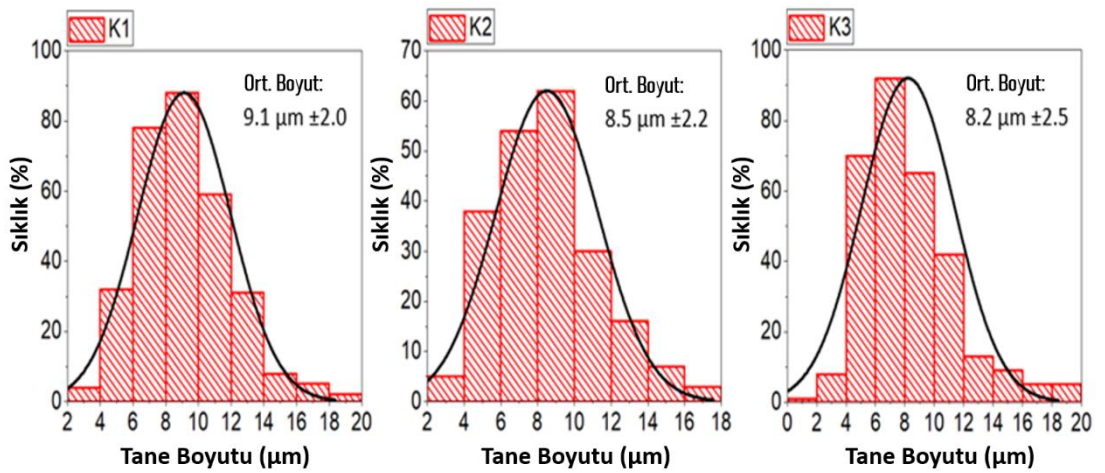
7.3.2. ZK60 Matrisli Kompozitler

Şekil 7.6, üretilen K1, K2 ve K3 numunelerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Numuneler için tane sınırları açıkça görülebilmektedir. Şekil 7.6 (a)'da görüldüğü gibi, bir matris yapısındaki heterojen eş eksenli taneler görülmektedir. Benzer tane yapıları K2 (b) ve K3 (c) kompozitleri için de geçerlidir. Bu numuneler, nano ve mikro partikül takviyeleri nedeniyle birincil tanelerin iç kısımlarında takviye partikülleri ve daha küçük tane sınırları göstermektedir. Ayrıca TiB₂ partiküllerinin ZK60 matrisinde homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Şekil 7.7, K1, K2 ve K3 kompozitlerinin tane boyutu dağılımını göstermektedir. Ölçüm sonuçları, K1, K2 ve K3'ün tane boyutunun sırasıyla 9,1 µm, 8,5 µm ve 8,2 µm olduğunu göstermektedir. Şekil 7.8'de gösterilen K3 numunelerinin EDS haritalama sonuçlarından görülebileceği gibi, TiB₂ partikülleri

(mor renkte gösterilen dağılım) küçük parçalara ayrılmakta ve bazı büyük partiküller şeklinde de kalmaktadır. TiB_2 partiküllerinin gösterdiği bu morfoloji, numunelere uygulanan mekanik alaşımlama işleminin bir sonucu olarak oluşmaktadır.

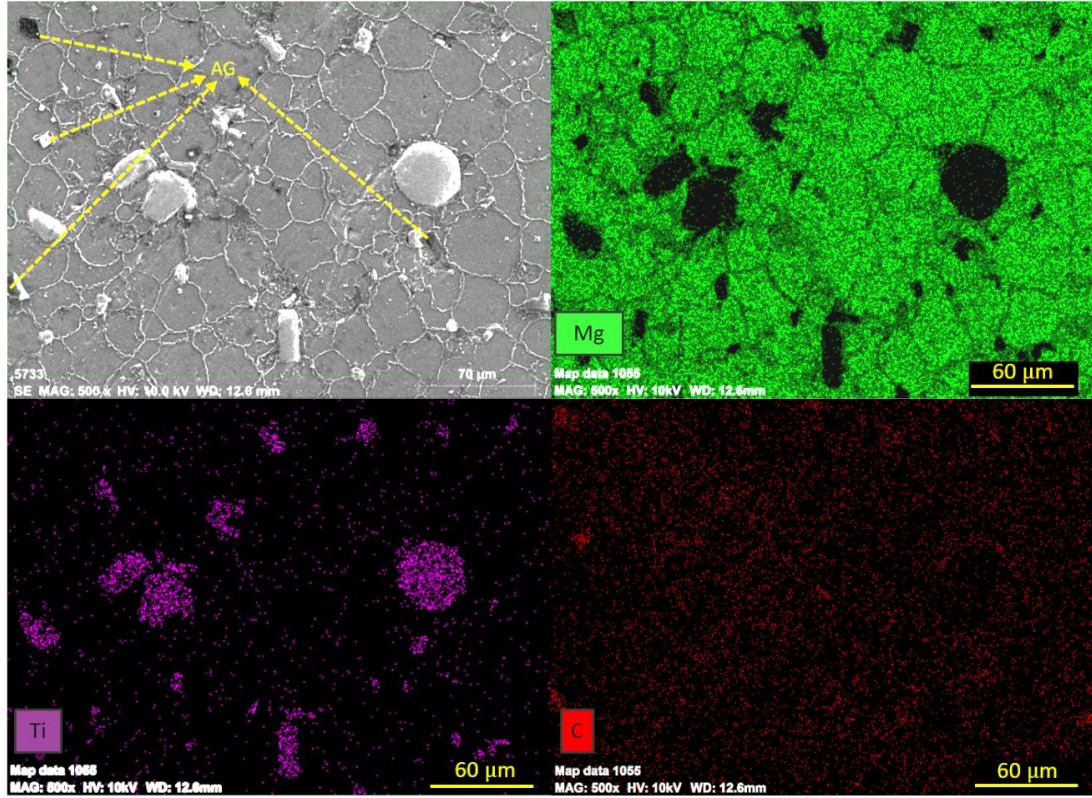


Şekil 7.6. K1 (a), K2 (b) ve K3 (c) SEM görüntüleri, kısaltmalar: TS: Tane Sınırı.



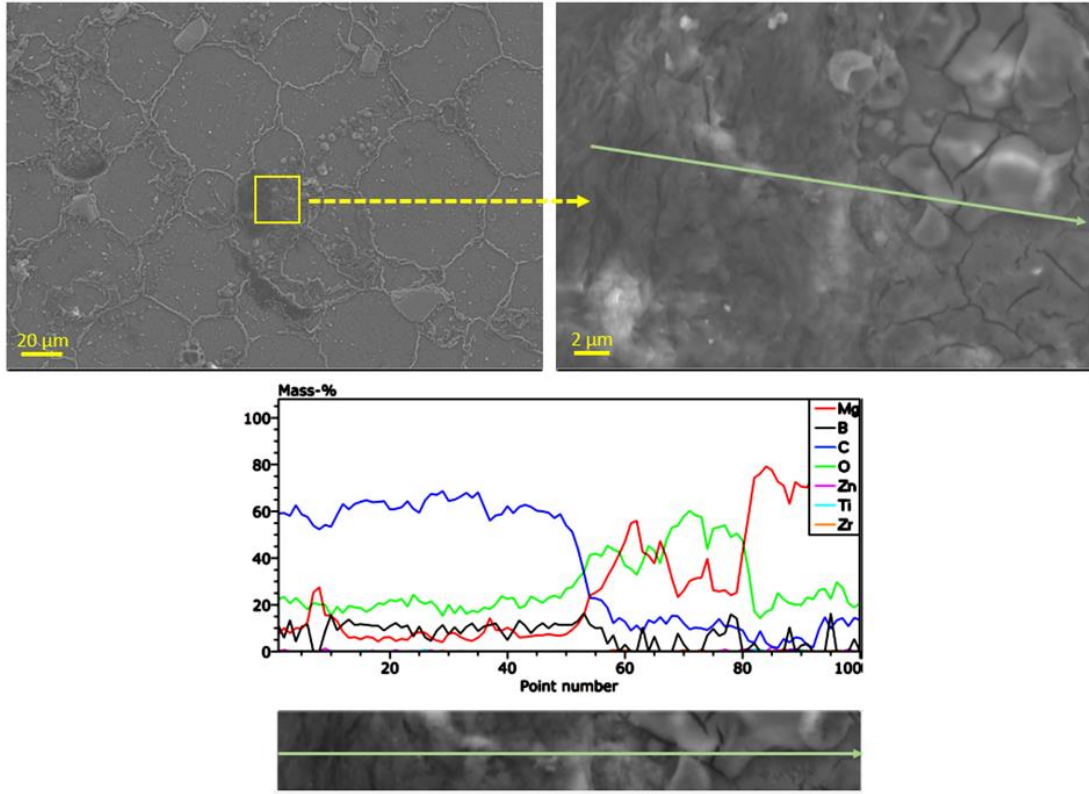
Şekil 7.7. K1, K2 ve K3'ün tane boyutu dağılımı.

Ek olarak, EDS haritalaması, grafene ait karbon (C) elementinin (dağılımı kırmızı renkle gösterilmiştir) genel olarak homojen bir dağılım göstermesine rağmen, bazı bölgelerde aglomere formda da bulunduğunu ortaya koymuştur (Şekil 7.8).



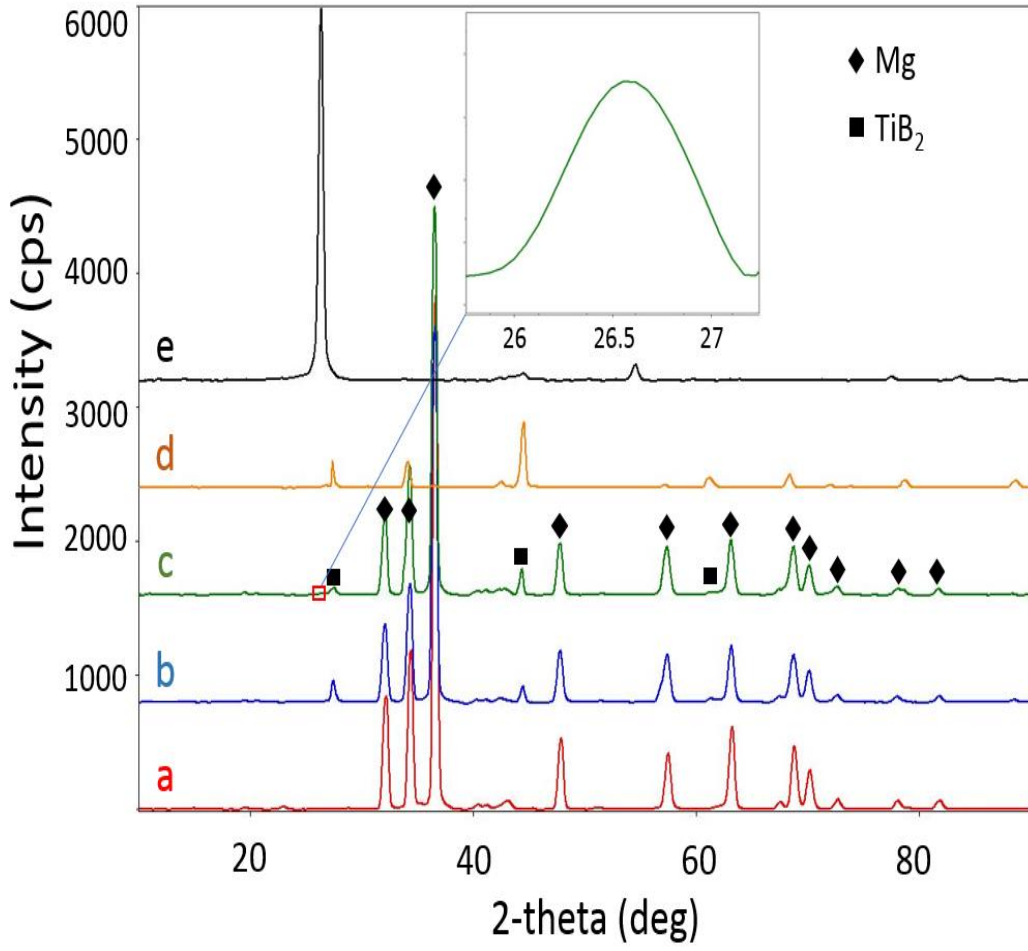
Şekil 7.8. K3 numunesinin EDS elementel haritalama analizi. Kısaltmalar: AG: Grafen topaklanması.

Şekil 7.9'da çizgi EDS analizinde gösterildiği gibi, siyah alanı yüksek oranda C içeriği izler ve gri alana geçişte bu oran birden düşmektedir. Bu geçiş bölgesinden sonra Mg ve O elementlerinin oranı aniden artmıştır. Sonuç olarak, bu alanda GNP topaklanmasının mevcut olduğu sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 7.9. K3 numunesine ait çizgi EDS analizi.

Şekil 7.10, kompozitlerin XRD analizlerinin kırınım desenlerini vermektedir. XRD analizinden, TiB_2 kırınım piklerinin yoğunluğunun, 15% (ağ.) TiB_2 takviye miktarı ile hemen hemen orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ek olarak, artan TiB_2 içeriği ile Mg kırınım piklerinin yoğunluğu azalmaktadır. Mg ve TiB_2 arasında reaksiyon olmadığı görülebilmektedir. Bu, TiB_2 'nin Mg matrisinde kararlı olduğunu gösterir. Bu sonuçlar, literatürdeki birçok araştırmacının sonuçları ile uyumludur [17,23,73]. Grafen pikinin, standart olarak kullanılan sürekli tarama yöntemi ile tespit edilemediği de görülebilmektedir (Şekil 7.10 (c)). Bu durum yapıdaki düşük grafen içeriği ile ilişkilidir [21,167]. Grafenin varlığını kanıtlamak için 25.75 ile 27.25 ($2\theta^\circ$) arasında sabit zamanlı (FT) tarama yöntemi uygulanmıştır. Adım genişliği ve tarama süresi sırasıyla 0.05° ve 60 s olarak seçilmiştir. FT taraması, K3 numunesi için grafenin varlığını doğrular niteliktedir (Şekil 7.10). Bu çalışmanın bulgusu Turan ve arkadaşlarının bulgularıyla örtüşmektedir [160].



Şekil 7.10. a) K1, b) K2, c) K3, d) TiB₂ ve e) Grafen'in XRD desenleri.

7.4. AŞINMA TESTİ

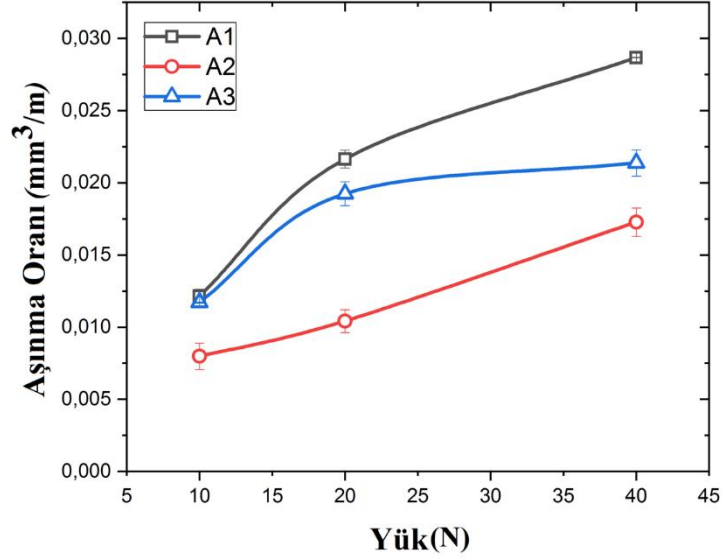
7.4.1. AZ61 Matrisli Kompozitler

Şekil 7.11, üretilen kompozitlerin artan yük ile aşınma hacim kayıplarını göstermektedir. Şekilden, tüm numuneler için artan yük ile aşınma hızı artışı gerçekleştiğini gözlemleyebilmekteyiz. Artan yükte, A2 numunesi hafif ve düzenli bir aşınma artış oranı gösterirken, A1 ve A3 numuneleri 20 N yük altında hızlı bir artış oranı göstermişlerdir. 40 N yük altında yapılan aşınma testinde, A1 aşınma hızındaki artış aynı oranda artarken, A3'ün aşınma artış hızı azalmış ve 20N yük altında aşınma oranına yakın bir aşınma davranışı göstermiştir. 40N aşınma yükü altında A1 alaşımının aşınma oranı $0,02868 \text{ mm}^3/\text{m}$ iken, A2 kompozitinin aşınma oranı $0,01727 \text{ mm}^3/\text{m}$ aşınma oranı ile %40, A3 kompozitin aşınma oranı ise $0,021137 \text{ mm}^3/\text{m}$ ile %25,5 daha az aşınma göstermiştir. A1, A2 ve A3 numunelerin aşınma oranları karşılaştırıldığında, A1 en kötü aşınma direncini gösterirken, A2 tüm yükler altında en iyi aşınma direncini göstermiştir.

TiB₂ ile güçlendirilmiş A2 kompozitinin performansı, kompozitin aşınma direncini yükselten daha sert ve daha güçlü TiB₂ takviyesi ile ilişkilendirilebilir [94]. Daha sert ve daha güçlü TiB₂ parçacıkları yükü taşır ve kolayca dağılıp parçalanmaz, aşınmaya ve dağılmaya karşı direnç gösterir. Aşınma işlemi sırasında TiB₂ etrafındaki AZ61 matris yapısı takviye partiküllerinden önce yüzeyden ayrılır ve bir süre sonra sadece TiB₂'ler aşındırıcı malzemeye (karşı çelik bilye) maruz kalır. Böylelikle aşındırıcı malzeme ile aşınmış yüzey arasındaki temas yüzey alanı azaldığından sürtünme katsayısı düşer ve sonuç olarak aşınma oranı azalır [158].

Diğer yandan grafen takviyesinin, literatürde sıklıkla karşılaşıldığı gibi aşınma direnci üzerinde performans artırıcı bir etkisi bu çalışmada gözlemlenmemiştir. Nano grafen takviyesi, mikron Mg ve TiB₂ arasına nüfuz ederek, mikron TiB₂ parçacıklarının Mg matrisine yeterli düzeyde tutunmasını ve matrisin korunmasını zayıflatmıştır. Mg matrisine iyi yapışmayan ve erken ayrılan TiB₂ partikülleri kompozit yüzeyinde serbest kalmaktadır ve numune ile aşındırıcı arasında ekstra bir aşındırıcı etki oluşturmaktadır. Bu durum A2'ye kıyasla A3 numunesinin abrasif aşınma direncinin

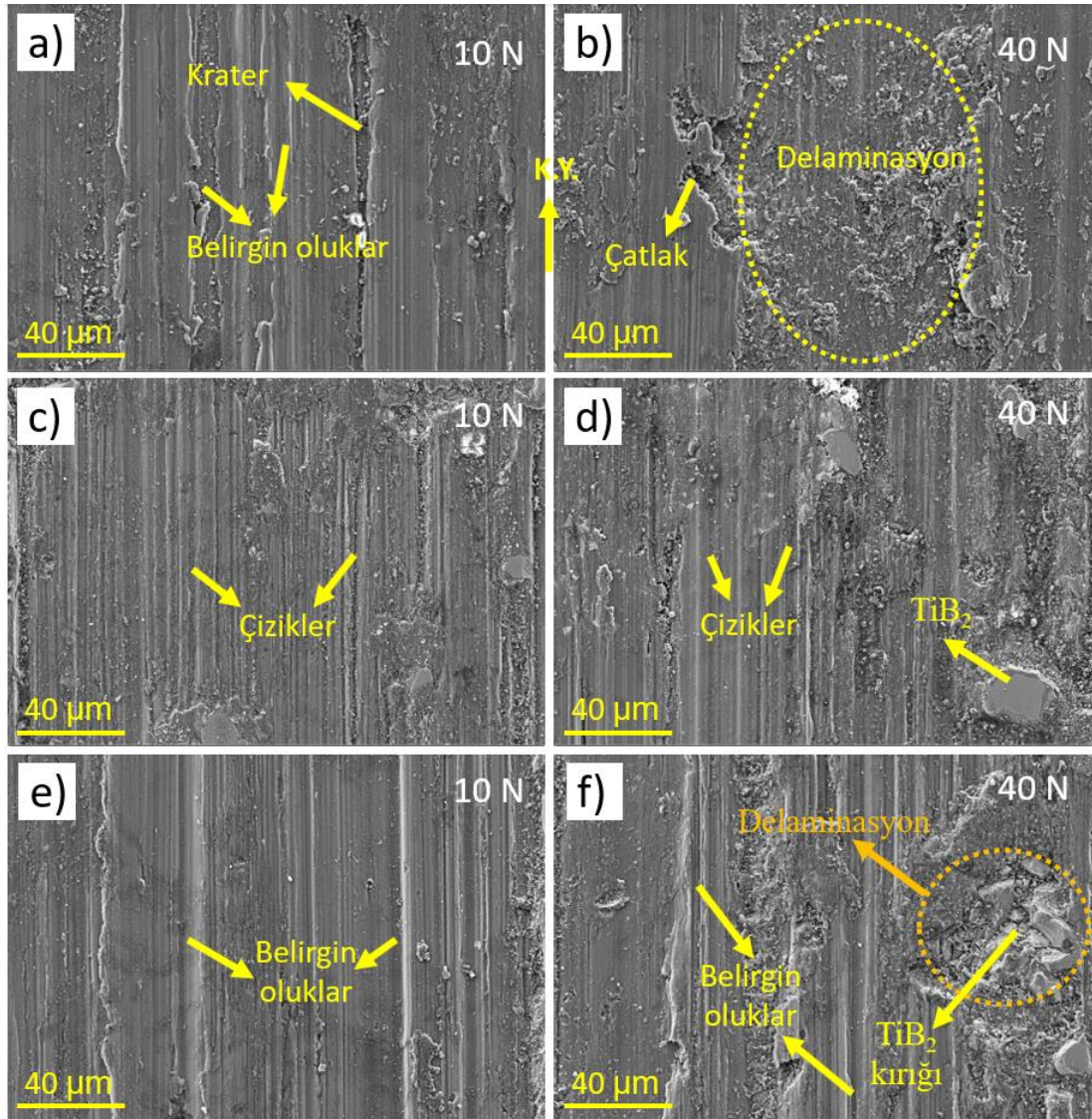
daha da azalmasına sebep olmaktadır. Dahası, grafen aglomerasyonu da yapının bütünlüğünü zayıflattığından dolayı, aşınma direncinin azalmasına yol açmıştır [168]. Sonuç olarak A3 hibrit kompoziti A1'e göre daha iyi bir performans sergilemiş olsada, A2 kompozitine göre daha kötü bir aşınma performansı sergilemiştir.



Şekil 7.11. A1, A2 ve A3 kompozitlerinin aşınma oranları.

Sertliğin aşınma direnci ile orantılı olduğu bilinmektedir. Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi, A2 en yüksek sertliği, A1 ise en düşük sertliği sergilemiştir. Archard yasasına göre daha düşük bir sertlik ayrıca aşınma testlerinde daha yüksek hacim kaybına karşılık gelir ve bu da daha düşük aşınma direncine neden olmaktadır [169].

Şekil 7.12, 10N (düşük) ve 40N (yüksek) yükler altındaki numunelerin aşınmış yüzey görüntülerini göstermektedir. Artan yük ile tüm numunelerde aşınma genişliği, derinliği ve yüzey aşınmasına bağlı hasar artmaktadır. Genel olarak artan yüklerle birlikte hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olduğu şeklinde yorumlanabilir [16]. Diğer yandan abrasif aşınma, tüm numunelerin başlıca aşınma mekanizması olduğu gözlemlenmiştir. Bu aşınmaya öncelikle daha sert olan aşındırıcı karşıt malzeme sebep olmaktadır. A1 numunesinin yüzeyinde, nispeten daha belirgin aşınma sonrası oluklar görülebilmektedir. Genel olarak ölçüm sonuçlarını SEM görüntüleri ile birleştirdiğimizde, A1'deki aşınma mekanizmasının daha fazla hacim kaybına neden olduğu sonucuna varılmaktadır.

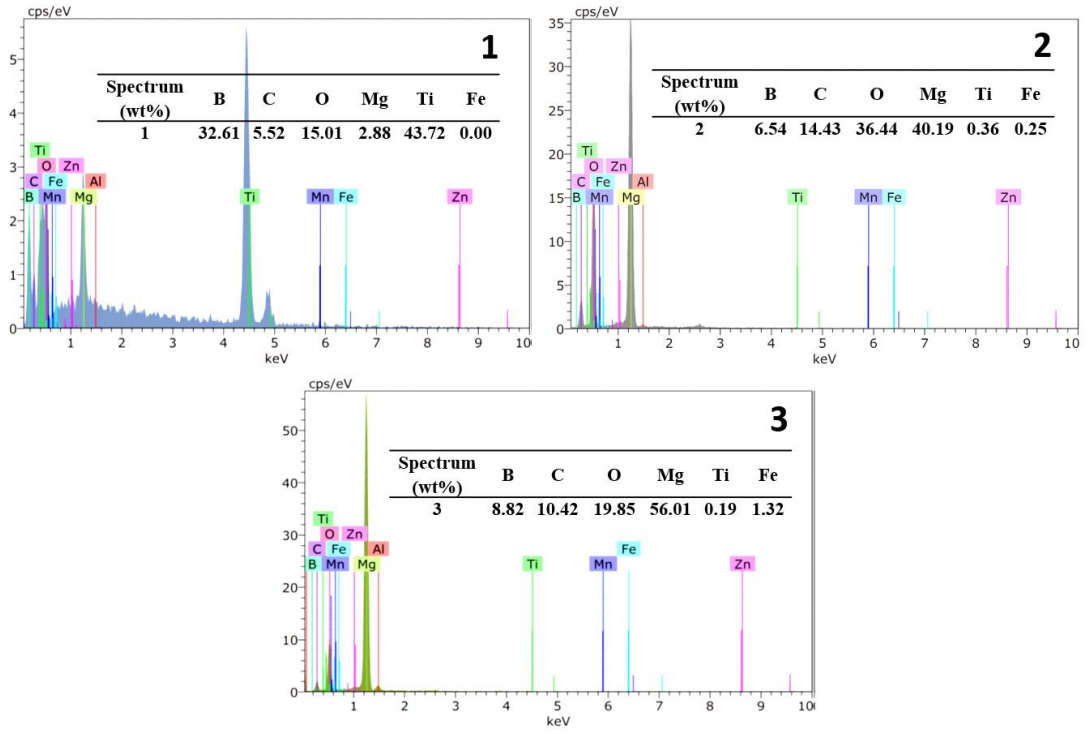
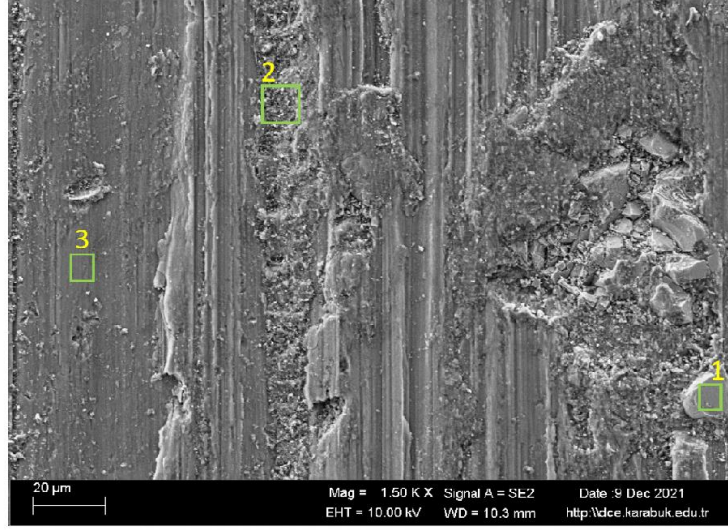


Şekil 7.12. (a-b) A1, (c-d) A2, (e-f) A3 numunelerinin aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri.

A2 numunesinde diğer numunelere kıyasla, tüm yüklerde daha hafif oluk görünümleri oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum, A2 numunesinde abrasif aşınmanın daha az olduğunun göstergesidir. Burada daha sert TiB_2 partiküllerinin varlığının abrasif aşınmayı sınırladığı söylenebilir [73]. A3 numunesinde abrasif aşınma sırasında TiB_2 partikülleri karşıt yüzey malzemesinin etkisi ile yüzeyden uzaklaştırılır. Yapıda kalan mikro TiB_2 parçacıkları, derin yırtıkların oluşmasını engellemekte ve sürtünme direncinin azalmasını sağlamaktadır.

A2 ve A3 numunelerinde artan aşınma yükleri ile TiB_2 partiküllerinin kopmaya ve yüzeyden ayrılmaya başladığı görülmektedir. A3 numunesinde, yapıdaki nano grafen TiB_2 ve Mg arasındaki bağı zayıflatmış ve A2 örneğinde henüz gözlenmeyen aşamalardaki TiB_2 ayrılımları A3 örneğinde daha erken görülmeye başlanmıştır.

Şekil 7.13, A3 numunesinin 40N yük altındaki aşınma sonrası EDS analizi görüntüsünü ve sonuçlarını göstermektedir. Bu analiz ve sonuçlar incelendiğinde, alan 1'de yüksek oranlarda Ti ve B elementlerine ait piklerin varlığı gözlenmektedir. Bu, alan 1 bölgesinde TiB_2 'nin var olduğunu göstermektedir. Alan 2 ve alan 3 bölgelerinde, yüksek seviyelerde Mg ve O elementleri olduğu ve MgO fazının bulunduğu sonucuna varabilmekteyiz. Aşınma sırasında, özellikle yüksek yüklere ulaşıldığında, aşınma nedeniyle ısı açığa çıkmaktadır. Aşınma sırasında oluşan sürtünme ısısına maruz kalan yüzeyde, oksidasyon meydana gelmektedir [11,16,75]. Aşınma sırasında yüzeyde oluşan bu oksit film sürtünmeyi azaltıcı etkiye sahiptir ve bu sayede o yüzeyin aşınma performansı artmaktadır. Ayrıca bu oksit tabakasının aşındırıcı bilye ile yüzey arasındaki teması engellediği ve bunun da aşınma oranını azalttığı rapor edilmiştir [170]. Öte yandan alan 2 bölgesinde az miktarda karşılaşılan Ti ve B element piklerinin matristen ayrılan ve yüzeyde aşındırıcı çelik bilyenin etkisiyle serbest hareket eden TiB_2 parçacıklarına ait olduğu söylenebilir. Alan 2 ve 3. bölgelerinde ise eser miktarda Fe elementine ait piklere rastlanmaktadır. Aşınma testleri sırasında, bu alanlara aşındırıcı çelik bilyeden ayrılan çok az miktarda partikül geçişleri olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 7.13. 40N yük altında aşınma testi sonrası A3 numunesinin EDS analizi.

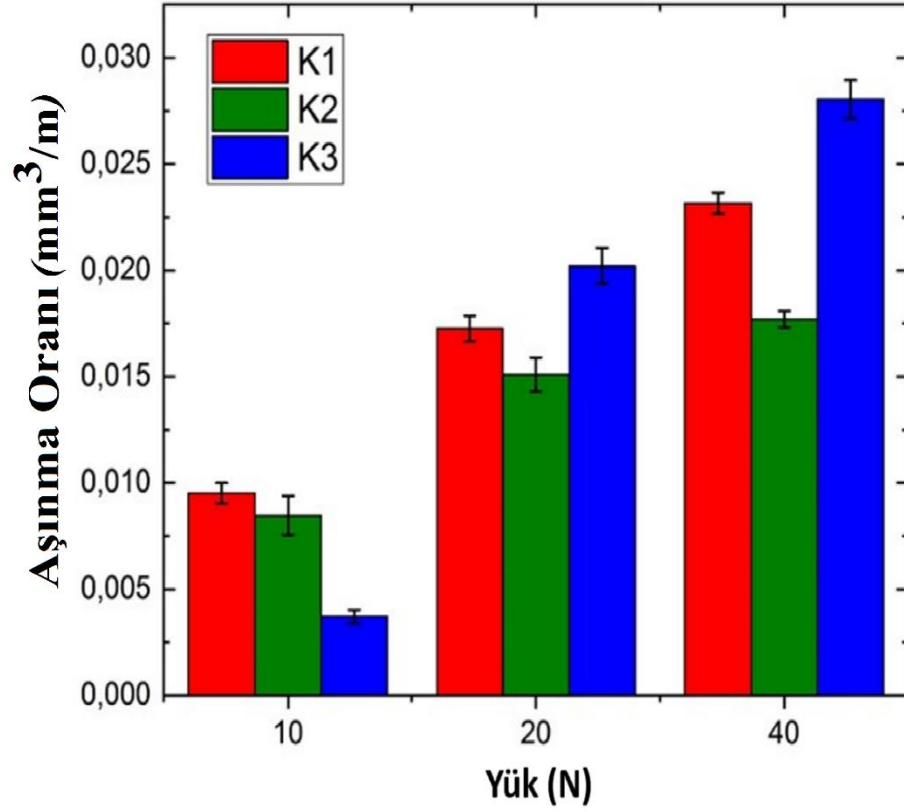
7.4.2. ZK60 Matrisli Kompozitler

Şekil 7.14, uygulanan yüklere bağlı olarak K1, K2 ve K3 numunelerin artan yüke karşı aşınma oranlarını ve bu oranlardaki değişiklikleri göstermektedir. Tüm numuneler 10N yükten 20 ve 40N yüke geçişte artan aşınma yükü nedeniyle artan bir aşınma oranı göstermişlerdir. Yük artışına bağlı olarak hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olduğu şeklinde yorumlanabilir [16]. Başlangıçta K3 numunesi diğer numunelere göre daha yüksek aşınma direnci ve daha az aşınma oranı göstermiştir. Ancak 20N ve 40N yük altında aşınma oranı diğer numunelere (K1, K2) göre hızlı bir şekilde artış göstermiştir.

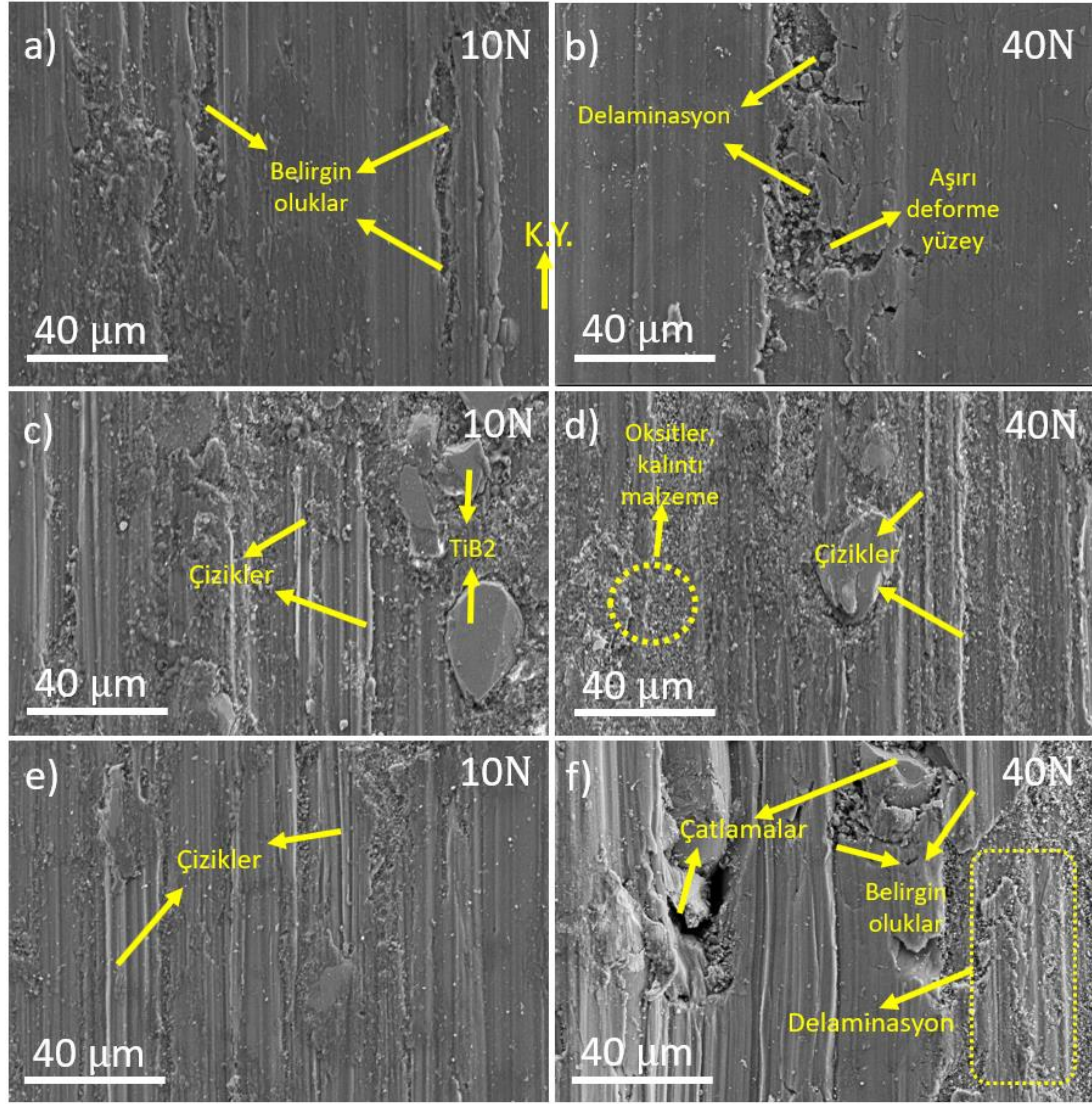
Şekil 7.15, 10 ve 40 N yükler altındaki numunelerin aşınmış yüzey görüntülerini göstermektedir. K1 numunesinin düşük ve yüksek yükte aşınmış yüzeyleri karşılaştırıldığında, yükteki artışa bağlı olarak adhesif kopma alanının arttığı ve tabakalaşma görünümünün arttığı söylenebilir. Ayrıca artan yük ile birlikte tüm numunelerde olukların derinliği, genişliği ve sürekliliği artmıştır.

Kompozitler, takviyesiz numune ile karşılaştırıldığında yüzeylerindeki partiküllerin görüntüsü ile yoğun bir partikül içeriğine sahip oldukları görünmektedir. K2 numunesi için, baskın aşınma mekanizması, 20N ve 40N için daha az yoğun oluklar nedeniyle hafif aşındırıcı olarak kabul edilebilir [168]. Hem K2 hem de K3 numunelerinde, TiB_2 partikülleri çevrelerini aşınmaya ve çizilmeye karşı korur. TiB_2 'nin yüzey erozyonu, çevresel, parçalanıp dağılmış TiB_2 partikül birikimini ortaya çıkarır. Bilindiği gibi sert ve güçlü partiküller, yumuşak matrislere kıyasla kompozitin aşınma direncini artırır [11,168]. Ancak 10N yük altında K3 numunesinde düşük bir aşınma oranı gözlemlenmesine rağmen, nano grafenin topaklanmasından dolayı basma mukavemeti ve sertlik değerlerindeki azalmaya paralel bir görünümle aşınma direncini de azaltmaktadır. TiB_2 takviyesi, daha yüksek yüklerde (20N ve 40 N) de aşınma miktarının azalmasını sağlamaktadır. Şekil 7.15 (d)'de gösterildiği gibi, oluklar diğer numunelere kıyasla önemli ölçüde artar. K3 örneğine grafenin eklenmesi, mekanik alaşımlama sırasında TiB_2 parçacıklarının çevresinde topaklanmaya neden olmuştur. Aşınma sistemindeki bu bölgesel farklılıkların artması aşınma miktarının artmasına ve aşınma direncinin düşmesine neden olmaktadır şeklinde yorumlanabilir (Şekil 7.8 ve

Şekil 7.15 (f)) [99]. Ayrıca literatürde açıklandığı gibi TiB_2 'nin yağlama etkisi, abrasif aşınmanın etkisinin azalmasını sağlar [17]. Diğer yandan sürtünme ile oluşan ısı da aşınmış yüzeyde oksidasyona yol açmaktadır (Şekil 7.15. (d)) [16].

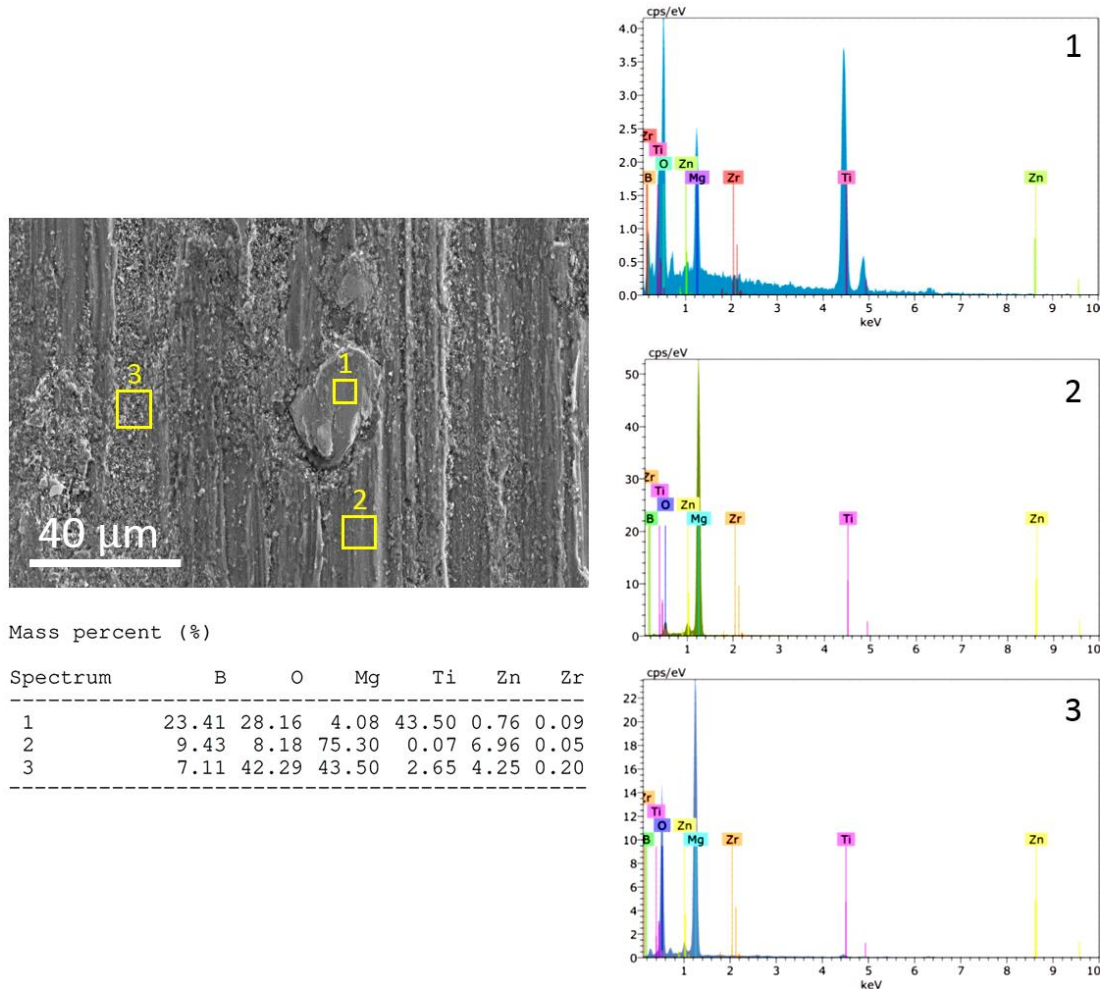


Şekil 7.14. Uygulanan yüklere karşı numunelerin aşınma oranları.



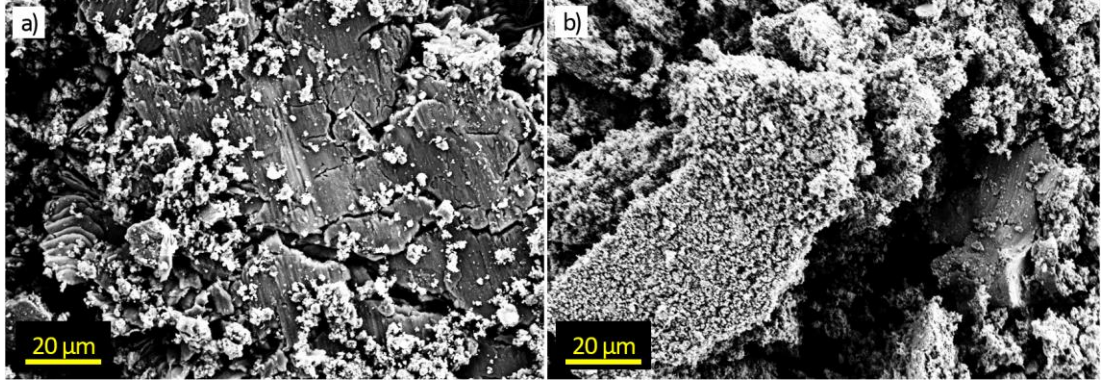
Şekil 7.15. Numunelerin aşınma yüzeyi, sırasıyla 10N ve 40N aşınma yükü olarak; a) ve b) K1 numuneleri, c) ve d) K2, e) ve f) K3.

Şekil 7.16, 40 N yük altında K2'nin aşınmış yüzeyinin EDS analizini göstermektedir. Yüksek miktarda Ti ve B elementlerine ait piklerinin (alan 1) tespit edildiği görülebilmektedir. Bu, aşınmış yüzeyde TiB_2 parçacıklarının varlığını doğrulamaktadır. Alan 2'nin analizinde önemli miktarda Mg tespit edilmiştir ve bu bölgenin tamamıyla ZK60 matrisine ait olduğu söylenebilir. Alan 3'ün analizinden önemli miktarda Mg ve O belirlenmiştir. Bu oluşum, aşınma sırasında sürtünme ısısının neden olduğu oksidasyona atfedilmektedir [11]. Ayrıca aşınmış yüzeyde karşı aşındırıcı yüzey malzemesinden herhangi bir Fe elementi geçişi tespit edilmemiştir. Bu, karşı aşındırıcı malzemenin matris malzemesine yapışmadığını göstermektedir.



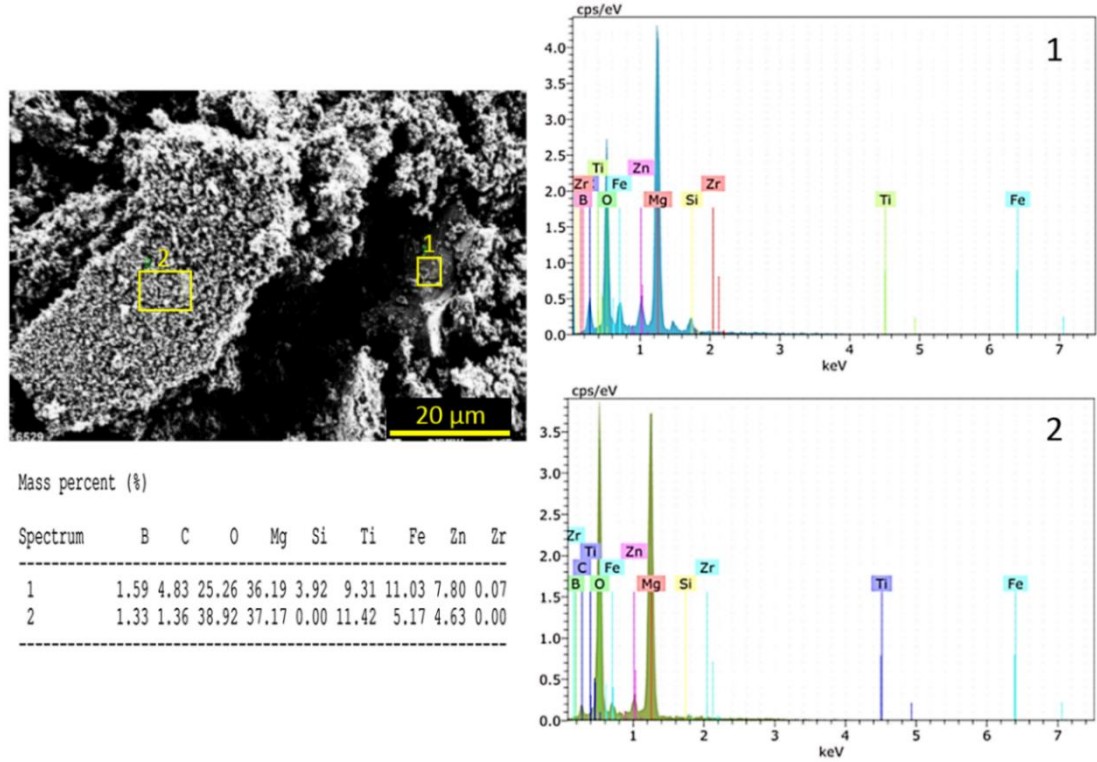
Şekil 7.16. 40 N yük altındaki K2 kompozitinin aşınmış yüzeyinin EDS analizi.

Şekil 7.17, farklı numuneler için aşınma kalıntılarının SEM görüntülerini göstermektedir. Takviye edilmemiş K1 alaşımı için 40 N yük altında çatlamlar ve krater yapılar tespit edilmiştir. Oluklu yapının varlığı, kompozit ve karşı yüzey malzemesi arasındaki sürekli sürtünme ile ilişkilidir [171]. Aşınma kalıntısı üzerindeki çatlaklar, delaminasyon aşınmasının varlığını göstermektedir. Bu durum, 40 N yük altında K1'in aşınmış yüzey fotoğraflarıyla tutarlıdır (Şekil 7.17 (b)). K3 numunesi için küçük kalıntı parçacıkları görülmektedir. Abrasif aşınma mekanizmasının karşı yüzey malzemeden malzemeyi kaldırdığı ve aşınan yüzeyin ezilerek oksitlendiği söylenebilir. Bu sonuç Aydın vd. bulguları [17] ile uyumludur. Ayrıca yapıdaki takviye partiküllerinin mikro kesme etkisi gösterdiği ve bunun da ince yapılu aşınma kalıntılarının oluşmasına neden olduğu bildirilmiştir [172].



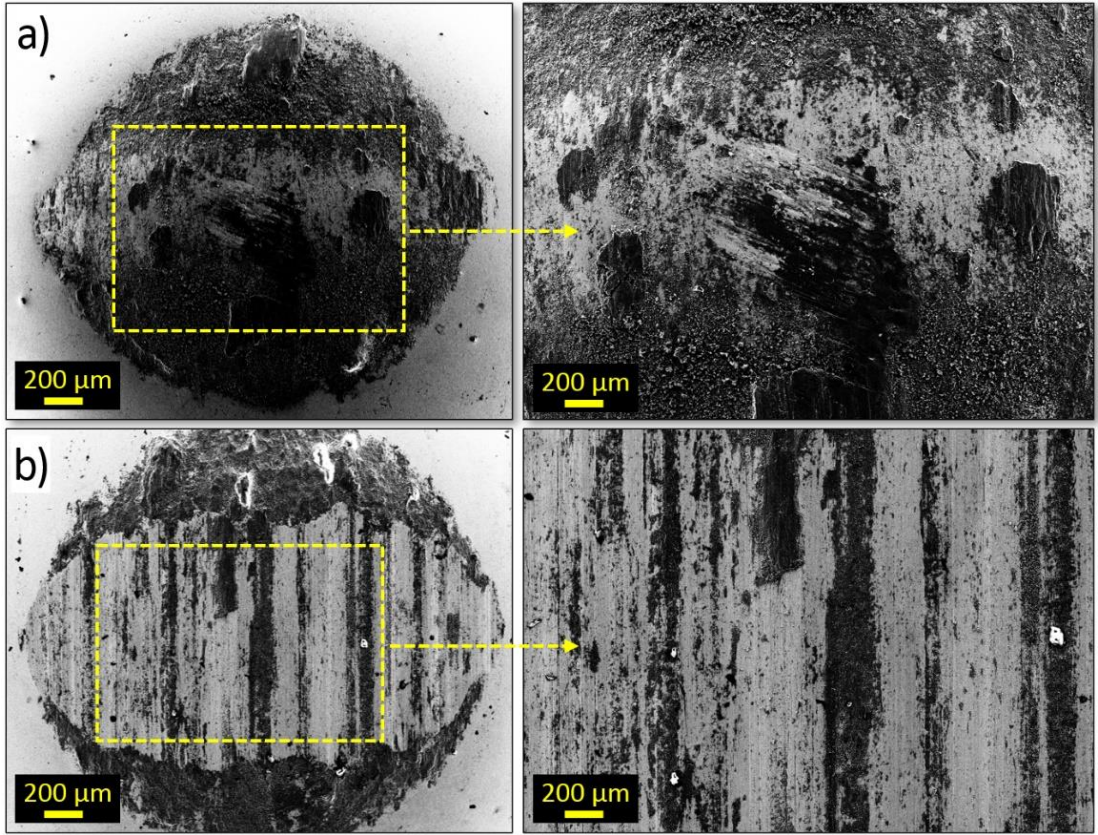
Şekil 7.17. a) K1 ve b) K3 numunelerin 40 N yük altındaki aşınma kalıntılarının SEM görüntüleri.

Şekil 7.18, 40 N yük altında K3'ün aşınma kalıntısının EDS analizini göstermektedir. EDS analizi, her iki alan için yüksek miktarda Mg ve O göstermektedir. K3'ün aşınma kalıntısında Fe ve Ti'nin varlığı da tespit edilmiştir.



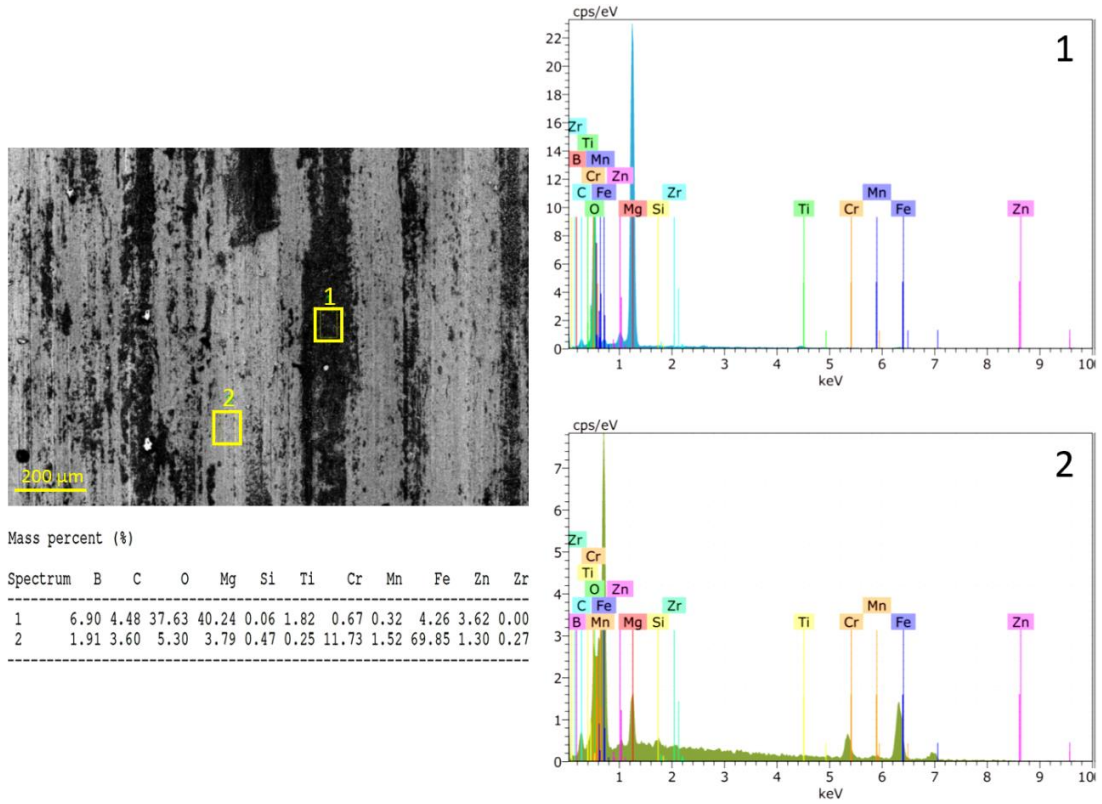
Şekil 7.18. 40 N yük altında K3'ün aşınma kalıntılarının EDS analizi.

Şekil 7.19, 40 N yük altındaki K1 (a) ve K3 (b)'nin karşıt aşındırıcı malzeme yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. K3 kompoziti ile karşılaştırıldığında, takviyesiz K1 alaşımından aşındırıcı çelik bilya yüzeyine geçiş yapmış olan kalıntı malzeme alanının daha yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. K3'ün yüzeyi incelendiğinde ise karşıt malzemeden oldukça az geçiş olduğu anlaşılmaktadır. Bu, K3 kompozitinin yapısındaki takviye partiküllerinin matris yüzeyi ile aşındırıcı karşıt malzeme yüzeyinin temasını azaltmasına dayanmaktadır [81,173]. Ayrıca K3 karşıt malzemesinin yüzeyinde aşınmaya maruz kaldığı gözlemlenebilmektedir.



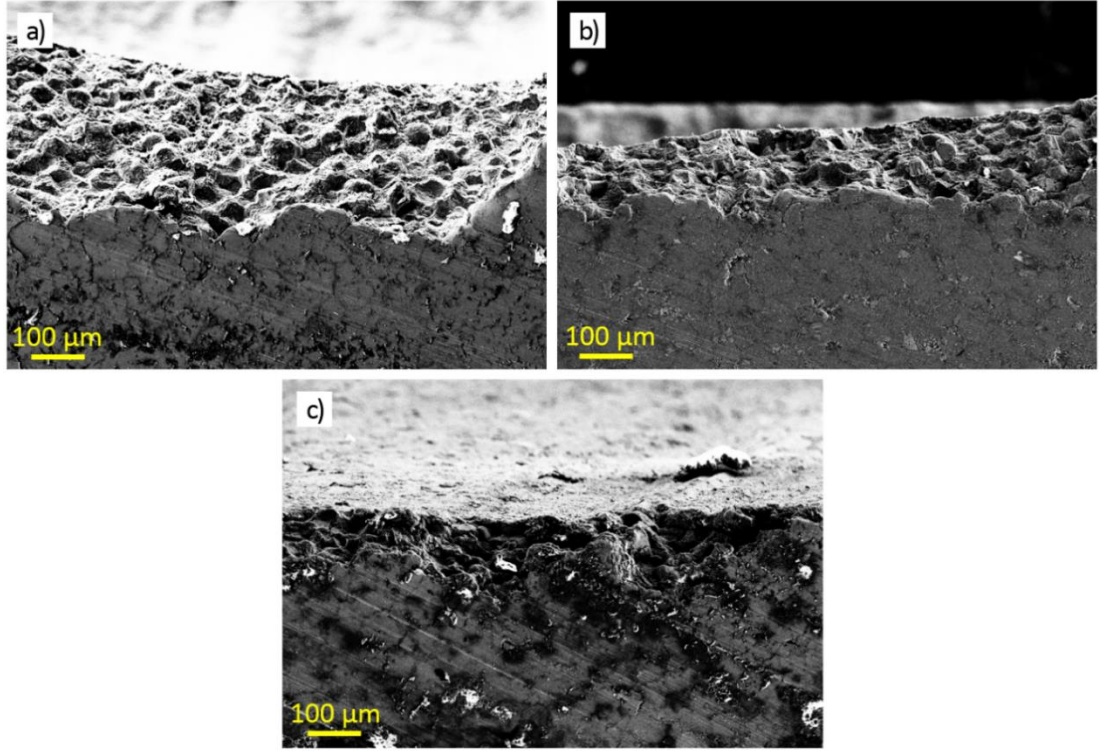
Şekil 7.19. a) K1 ve b) K3'e ait çelik karşıt (aşındırıcı) yüzeyinin SEM görüntüleri.

Şekil 7.20, K3 kompozitinin karşıt yüzey malzemesinin EDS analizini göstermektedir. Alan 1'in (karanlık alan) analizi, yüksek miktarda Mg ve O varlığını doğrulamaktadır. Bu, matris malzemesinin oksitlendiğini ve karşı malzemeye aktarıldığını göstermektedir. Alan 2'nin (gri alan) analizi yüksek miktarda Fe ve Cr elementlerinin varlığını göstermektedir. Bu sonuç, aşındırıcı AISI 420 çelik karşıt bilya yüzeyinin kimyasal bileşimini doğrulamaktadır.

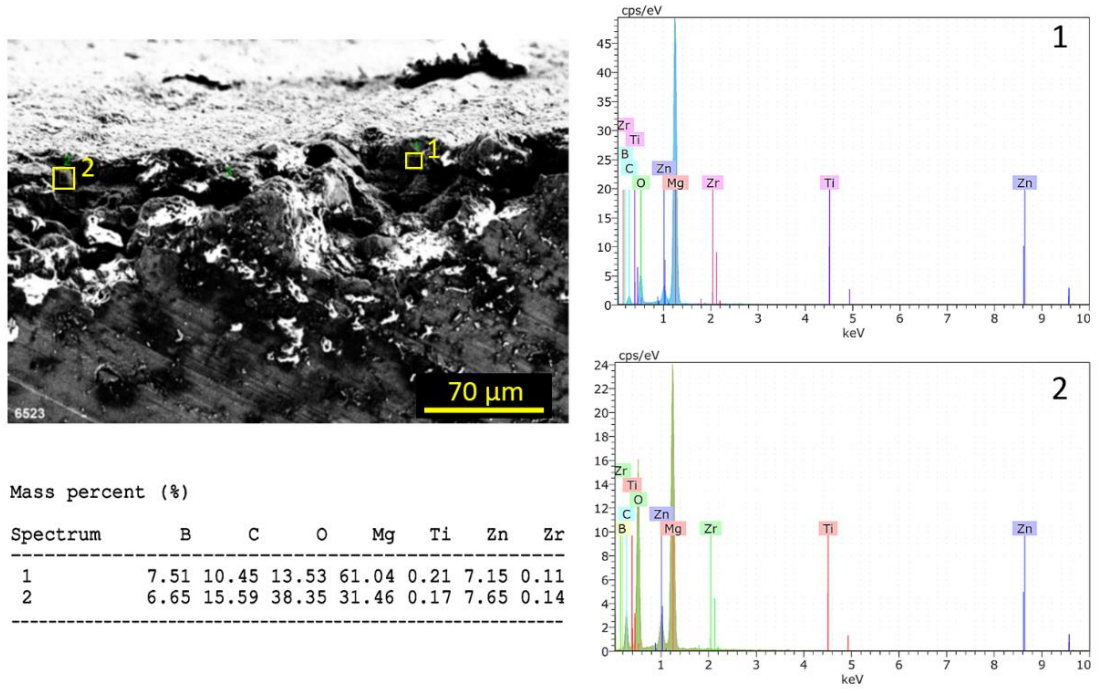


Şekil 7.20. K3 numunesine ait aşındırıcı bilye yüzeyinin EDS analizi.

Şekil 7.21, 10 N yük altındaki numunelerin enine kesit görüntülerini göstermektedir. En fazla deforme olmuş yüzeyin, takviyesiz K1 alaşımı yüzeyinde olduğu görülebilmektedir. Ayrıca K3 numunesi diğer numunelere göre en düşük aşınmaya uğramış yüzeye sahiptir. Bu sonuçlar, 10 N yük altındaki aşınma oranı sonuçlarıyla tutarlıdır (Şekil 7.14). Şekil 7.22, K3 numunesinin enine kesitine ait EDS analizini göstermektedir. EDS sonuçları, numunenin kesiti için yüksek Mg ve O içeriğinin mevcut olduğunu doğrulamaktadır. Bu sonuçlardan oksit filminin aşınma testi [174] sırasında oluştuğu çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 7.21. 10 N yük altındaki a) K1, b) K2 ve c) K3 numunelerinin kesit görüntüsü.



Şekil 7.22. K3 numunesi aşınma yüzeyi kesitinin EDS analizi.

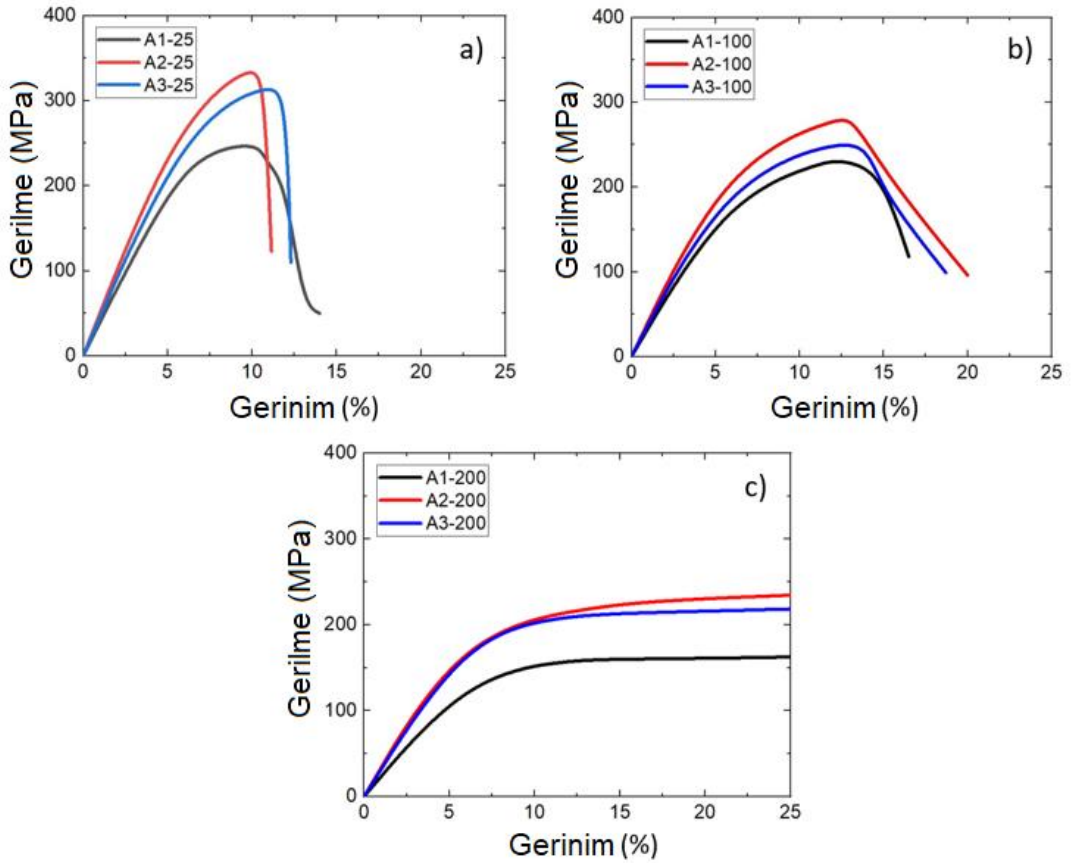
7.5. BASMA TESTİ SONUÇLARI

7.5.1. AZ61 Matrisli Kompozitler

Bu çalışmada üretilen AZ61 alaşımı, kompozit ve hibrit kompozit numunelerin oda sıcaklığında, 100°C ve 200°C’de uygulanan basma testlerinin sonuçları Çizelge 7.3’te, gerilme-gerinim grafikleri ise Şekil 7.23’te verilmiştir. Bu sonuçlar bütün numunelerde sıcaklığın artmasına paralel olarak mukavemet değerlerinin düştüğünü ve gerinim değerlerinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Basma testlerinin uygulandığı her sıcaklık için değişen oranlarda, A2 (TiB₂ takviyeli) numune grubu diğerlerine göre daha yüksek dayanım ve benzer gerinim göstermişlerdir. Literatürde bildirildiği gibi basma gerilmesi altında metal ve MMK parçaların deformasyonu ve kırılması farklı şekillerde olabilir [35–37]. 200°C de basma testi gerçekleştirilen numuneler süneklik artışı sebebiyle basma testi sırasında yassılaşıma ve oldukça gecikmiş bir çatlama göstermiş, bununla birlikte ayrılma göstermemişlerdir. Oda sıcaklığı ve 100 °C sıcaklık altında basma testi uygulanan numuneler, sünek-gevrek tarzda ve yaklaşık 45° açıyla kayma göstermiş, konik biçimde numunenin parçalara ayrılması şeklinde deforme olmuşlardır [175].

Çizelge 7.3. AZ61 ve AZ61 matrisli kompozitlerin basma testi sonuçları.

Malzeme	Test sıcaklığı (°C)	0.2% Akma Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Kırılma Dayanımı (MPa)	Üniform Gerinim (%)	Kırılma Gerinimi (%)
A1	Oda Sıcaklığı (25)	211.79	251.87	235.52	10.76	11.15
A2		287.21	345.28	324.54	10.20	10.74
A3		260.38	321.23	310.02	12.03	12.32
A1	100	171.64	231.91	193.05	12.24	15.26
A2		216.60	282.24	208.50	12.28	15.36
A3		198.30	256.63	244.54	12.42	14.13
A1	200	126,48	163	-	-	-
A2		173,61	240	-	-	-
A3		160,28	214,42	-	-	-



Şekil 7.23. a) 25 °C, b) 100°C ve c) 200°C'de AZ61 ve AZ61 matrisli kompozitlerin basma testi Gerilme-Gerinim grafikleri.

Diğer taraftan A3 numuneleri ikinci sırada en yüksek basma dayanımını ve bir miktar daha fazla gerinim gösterirken, en düşük basma dayanım performansını ise orijinal AZ61 alaşımı numuneler göstermiştir. Ayrıca nihai basma dayanımı ve proof (0,2) akma dayanımı değerlerinin değişimi kıyaslandığında benzer bir trend ile artış ve azalış gösterdikleri anlaşılmaktadır. Oda sıcaklığı numunelerinde A1 numunesine göre A2 - A3 numunelerinde basma akma dayanım değerlerindeki değişim sırasıyla %35.6 - %22.94, ve 100°C numuneleri için sırasıyla %26.2 - %15.53 ve 200°C numuneleri için bu sonuçlar sırasıyla %37.2 - %26.72 olarak gerçekleşmiştir. A1 numunesine göre A2 - A3 numunelerinde basma dayanımı değerlerindeki değişim sırasıyla %37.2 - %27.5, ve 100°C numuneleri için sırasıyla %21.7 - %10.66 ve 200°C numuneleri için bu sonuçlar sırasıyla %47.2 - %31.6 olarak gerçekleşmiştir. Deformasyon-dayanım mekanizmaları ve ilgili literatürle uyumlu olarak T/M numunelerinin basma deformasyon özelliklerinin gelişimi kompozit malzemelerdeki takviye içeriğinin artmasıyla açıklanabilmektedir [10,176,177]. Diğer taraftan, tüm T/M numunelerin iyi basma dayanımı ve gerinim değerleri göstermesi, bu çalışmada kullanılan üretim parametrelerinin uygunluğuna bir işarettir. Bu nedenle literatür dikkate alınarak yapılan denemelerle elde edilen T/M üretim parametrelerinin uygunluğunun kabul edilebilir olduğu anlaşılmaktadır [10,178].

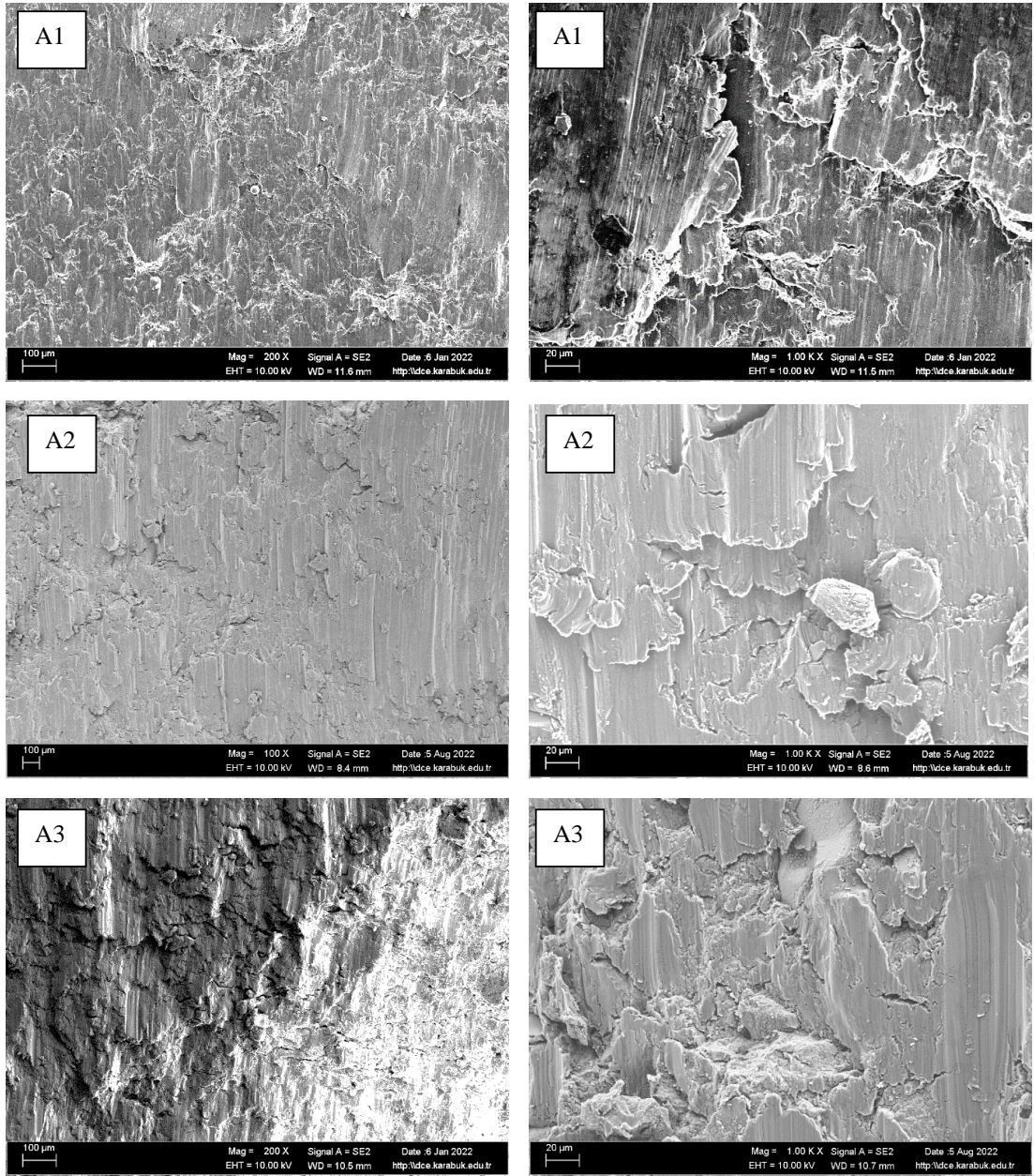
Basma gerilme-gerinim grafiği deformasyon-hasar tarzı açısından değerlendirdiğinde, sıcaklık artışı ile paralel olarak arttığı ve nihayetinde 200°C'lik testte ise tamamen yatay bir seyir ile basma gerilmesinin düşmek yerine veya gerinimin azalmak yerine oldukça arttığı ve eğrinin burada bütün numunelerde yatay bir yol izledikten sonra ise yukarı bir trend gösterdiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan yapılan basma testlerindeki bu nihai genel artış AZ61 orijinal numunesinde sınırlı iken kompozit numunelerde oldukça dikey bir seyir izlemektedir. Bu durumun kompozit numunelerin dayanım artırma özelliğinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar için önceki araştırmalar içerisinde bu çalışmaya benzer bir içerikle yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Basma sonuçlarında görüldüğü ve bilindiği gibi basma eğrisinin eğiminin artması, basma deneyi sırasında numunenin kesitinin devamlı olarak artmasının bir sonucudur. Bilhassa plastik deformasyonun sonuna doğru numunenin kesiti çok arttığından basma gerilmelerinde de ani yükselmeler gözlemlenebilmektedir [175,179].

Şekil 7.23' deki gerilme-gerinim eğrilerinden oda sıcaklığında kompozit numunelerin daha ani bir kırılma oluşumu ve gerilme düşüşü gösterirken, A1 numunesi kompozit numunelere göre daha kademeli bir hasar davranışı göstermektedir. Bu durum ve diğer mekanik özellikler; mikro-nano partiküller, matrisin fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ve morfolojisi ile yakından ilişkilidir. Literatürde belirtildiği gibi [167], matris ile takviye arasındaki termal genleşme katsayısı (TGK) ve elastik modül (E) uyumsuzluğunun geometrik olarak gerekli dislokasyonların (GND'ler) oluşumuna yol açtığı bildirilmektedir. Diğer bir ifade ile, takviye edilmiş MMK'lerde artış ve birikim gösteren dislokasyonların yoğunluğuna ek olarak, Geometrik olarak gerekli dislokasyon (GND) oluşumlarında aktif şekilde dayanım artışında etkili olduğu gözlenmektedir [180]. Şöyle ki; sertlikleri farklı matris ve takviye bileşenleri, gerilim gradyanını arttırmaktadır. Bu kristal kafesin geometrik kısıtlamalarının neden olduğu gerinim gradyan alanlarında geometrik olarak gerekli dislokasyonların toplanmasını ve oluşumunu teşvik etmektedir. Ani kırılma konusunda A1 numunesi biraz daha avantajlı görünmektedir. Diğer taraftan 100°C ve 200°C'de uygulanan basma testlerinde dayanımla beraber eğrinin eğiminin (elastisite modülü) de düştüğü görülmektedir. Bilindiği gibi sıcaklık, dayanım ve elastisite modülü üzerinde etkilidir. Diğer taraftan numuneler arasında Elastisite modülü farklılığı ve kimyasal bileşim değişimlerine (takviye) bağlı olarak dayanım özellikleri yine belirgin bir şekilde değişmektedir. Bu sonuçlar kompozit teorisi olarak bilinen teori kapsamında değerlendirilebilir. Kompozitlerde karışım kuralına göre kompozit malzemenin özellikleri; karışımdaki malzeme özelliklerinin ortalaması olarak oluşmaktadır. Şöyle ki karışım kuralında kompozit malzemenin yaklaşık mekanik değerleri; bileşenlerin hacim oranları, bileşenlerin mekanik değerleri ile çarpılarak toplanması ile bulunabilmektedir. Bir yaklaşım ve trend olarak Şekil 7.23 ve Çizelge 7.3'te anlaşıldığı üzere bu çalışmadaki basma test sonuçları da buna göre yorumlanabilir [175,181].

Öte yandan, mikro ve nanoparçacık takviyeli hibrit kompozit ile beklenen yüksek mukavemetin elde edilemediği görülmektedir. A2 ve A3 numunelerinin gerilme-gerinim değerleri karşılaştırıldığında, GNP ilavesi (A3 numunesinde) basma dayanımı değerlerinde ilave bir artış yapmamış bunun yanında çok az bir miktar azalma gözlenmiştir. Benzer bir durum yüksek sıcaklıklarda da devam etmiş, tekrarlanmış

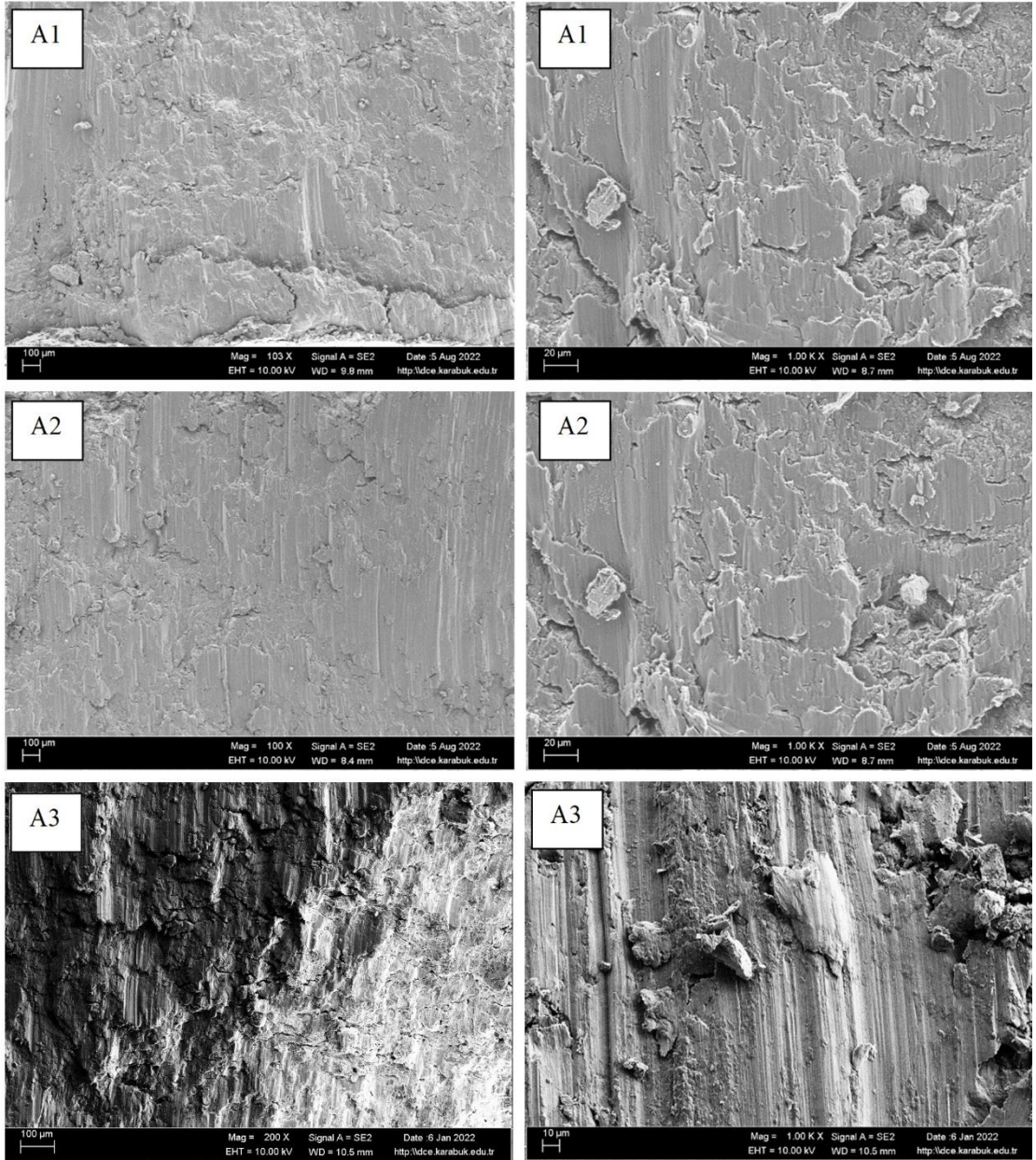
olarak görülmektedir. Bunlar, ilgili literatürde açıklandığı gibi GNP partiküllerinin topaklanma etkisi ile yorumlanabilmektedir [182,183]. Şöyleki, topaklanmış nano partiküller tek bir parça gibi dursa da esasen ayrı parçalar oldukları için, deformasyon altında dağılma eğilimine girerek erken kırılmalara sebep olmaktadır.

Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'te oda sıcaklığı ve 100°C de basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. 200°C'de basma testi gerçekleştirilen numunelerin ise ayrılma kırılması göstermediği, sünek bir davranış ile kısıp kesitinin arttığı ve yumuşak davranış gösterdiği için kırılma yüzey görüntüleri alınamamıştır. Bunun yanında mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, çatlak oluşumları gözlemlenmiştir (Şekil 7.28). Şekil 7.24'te verilen oda sıcaklığı kırık yüzeyleri, kısa kayma çizgileri, dalgalı görünüm, tabaka ayrılmaları, enine çatlamlar göstermiştir. Şekil 7.24'te verilen oda sıcaklığı basma testlerinde A2 numunesi A1 numunesine göre daha uzun kayma çizgileri, ikinci partikülleri üzerinden malzeme aşınmaları ve sıvanması ve bu noktalarında kayma çizgilerine dikey çatlamlar gözlenmiştir. İnce kayma çizgilerinin yanında kalın kayma çizgileri de görülmektedir. Benzer bir durum oda sıcaklığı basma testi yapılan A3 numunesinin kırık yüzeylerinde de görülmüştür. Pürüzlü ve pürüzsüz kırılma yüzey görünümlerine ek olarak, kayma hattı kırılmalarında önemli yön değişimleri ve farklı katmanlar da gözlenmektedir. Literatürde, Rashad vd. AZ31 alaşımı üzerinde yaptığı çalışmada GNP'lerin aglomerasyonu nedeniyle AZ31 kompozitinin basma dayanımının beklenenden düşük çıktığını bildirmişlerdir. AZ31/GNP kompozitinin basma dayanımında daha sınırlı bir değişiklik gözlemlemişlerdir [99,165,184]. Ayrıca, XRD sonuçları ile, takviye partiküllerinin eklenmesinin, kompozitin verim asimetrisini etkileyen esas dokuları zayıflatması ile sonuçlandığını bildirmişlerdir. Oda sıcaklığında basma uygulanan numuneler incelendiğinde, çatlağın makro görünümü, 45 °C açı ile numune köşegenlerinde oluşan konik bir ilerlemeyi göstermektedir ki bu durum gevrek kırılmaya işaretir [175].



Şekil 7.24. Oda sıcaklığında basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri.

100°C de uygulanan basma testi sonuçlarına göre; A1 numunesi oda sıcaklığı numunelerine göre daha az belirgin kayma çizgileri daha geniş kanal ve artan gerininin bir sonucu olarak daha geniş kırıklar göstermiştir. A2 ve A3 100°C numuneleri ise artan süneklüğün göstergesi olarak daha belirsiz kayma çizgileri, daha derin kanallar ve sıvanmalar göstermiştir.

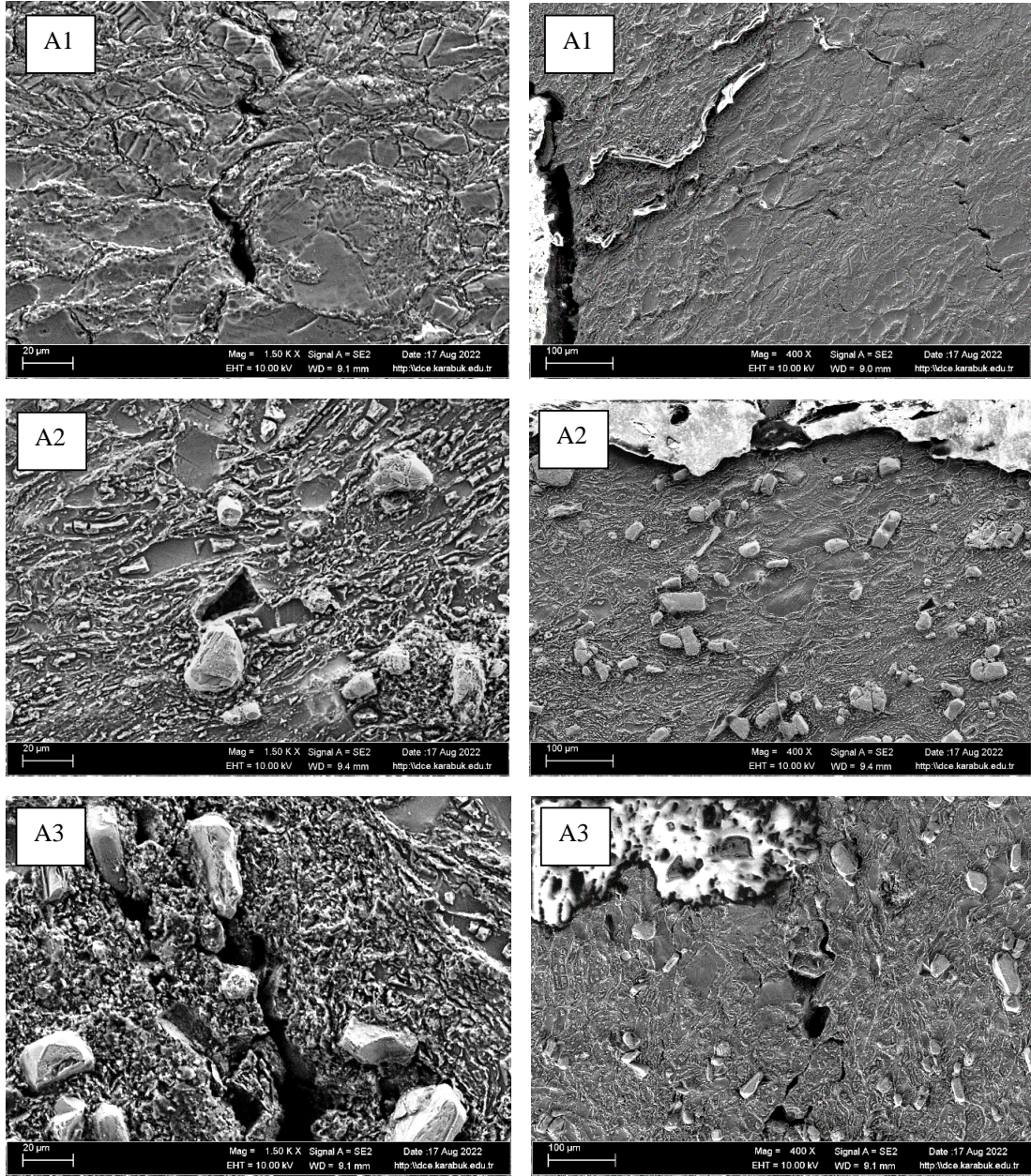


Şekil 7.25. 100°C sıcaklıkta basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri.

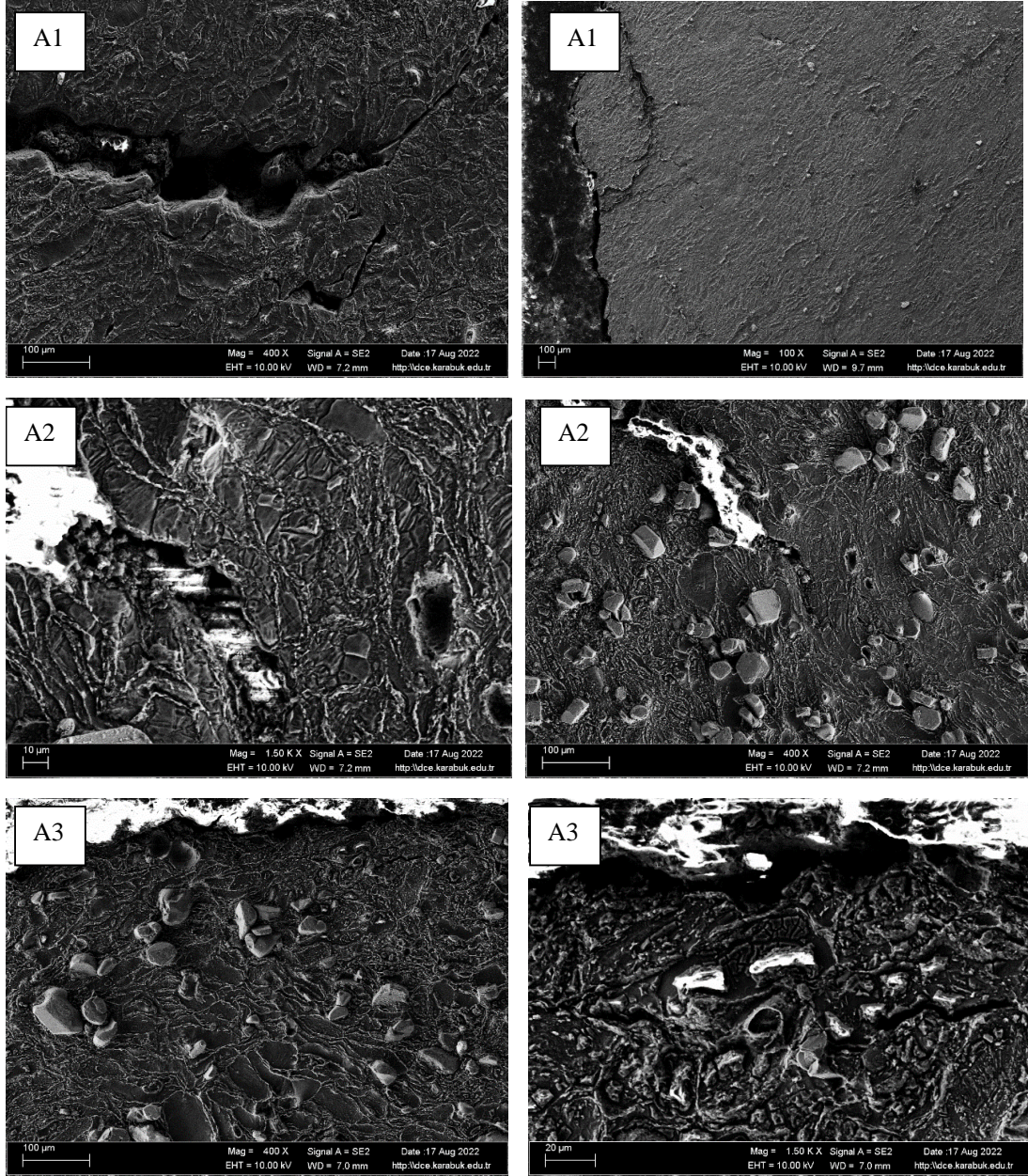
Kırılma yüzey görüntüleri, Mg bazlı malzemelerde en yaygın deformasyon olan kayma bantları ile kompozitte önemli ikizlenme aktivitesi gösterdiği sonucunu vermektedir [165].

Basma test numunelerinin oda sıcaklığı (Şekil 7.26), 100°C (Şekil 7.27) ve 200°C (Şekil 7.28) numunelerinin test sonrası kırık yüzeyden içlere doğru çatlama ilerlemesi, basma üst yüzeylerine ait görünümünde mikroyapı olarak verilmiştir. Bu

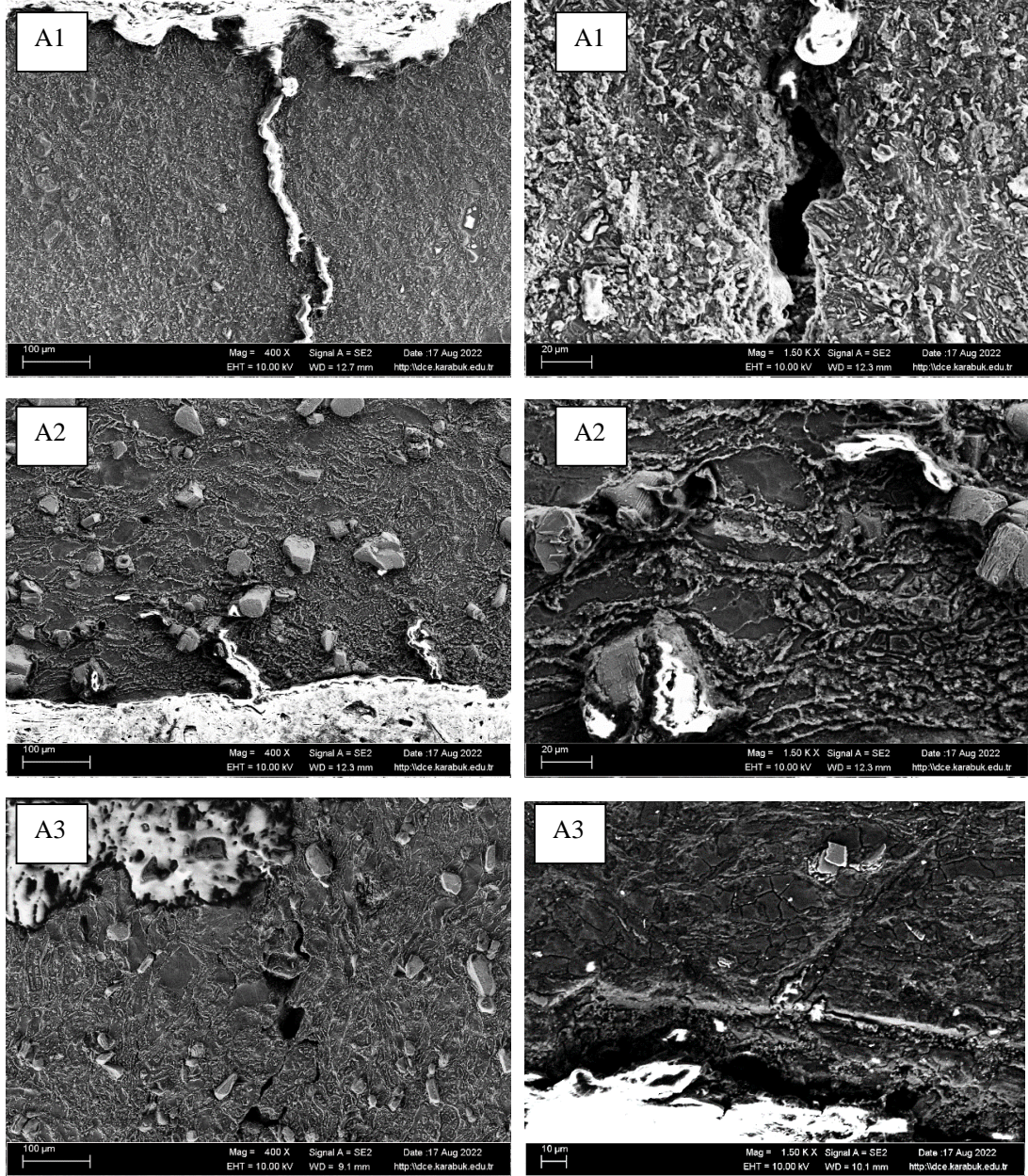
görüntülerden anlaşıldığı üzere çatlamlar tane sınırlarında gerçekleşmiştir. İlave olarak A2 ve A3 kompozit numunelerinde ikinci faz bölgelerinde geniş kırıklar görülmektedir. 200°C numunelerinde kısmen de olsa tespit edilebilen yeniden kristalleşme görülmemiştir.



Şekil 7.26. Oda sıcaklığında basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.



Şekil 7.27. 100°C sıcaklıkta basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.

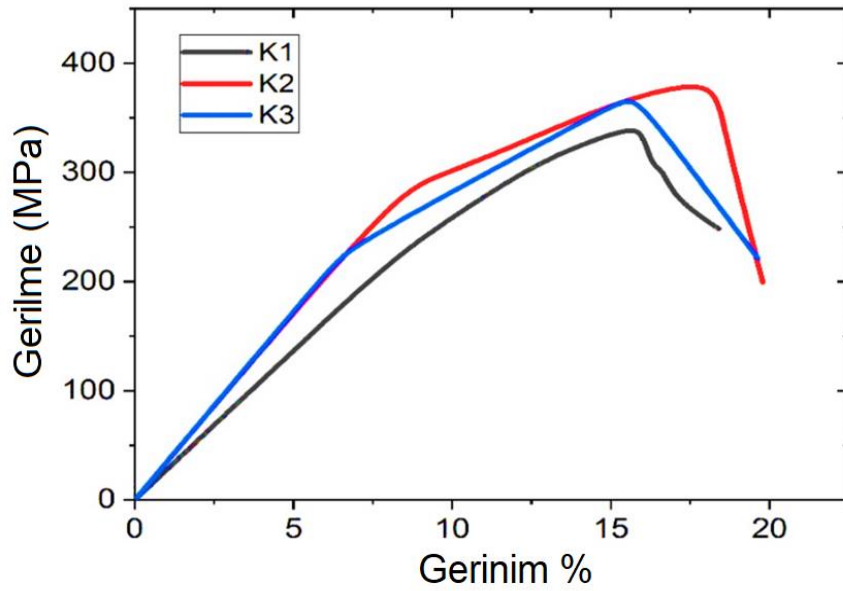


Şekil 7.28. 200°C sıcaklıkta basma testleri gerçekleştirilen numunelerin (basma üst yüzeyine ait) çatlama mikroyapı görüntüleri.

Genel olarak değerlendirildiğinde kompozitin kırılma modu, test sıcaklıklarındaki artışla sünek moda değişir. SEM görüntüleri incelendiğinde çatlak oluşumunun TiB_2 üzerinden değil Mg matris yapısı üzerinden ilerlediği ve TiB_2 katkısının dayanım artışı sağladığı anlaşılmaktadır.

7.5.2. ZK60 Matrisli Kompozitler

Bu tez çalışmamızda üretilmiş olan ZK60 Mg alaşımı ve ZK60 matrisli kompozit numunelerinin basma testi sonuçları veri olarak Çizelge 7.4'te ve grafiksel olarak Şekil 7.29'da verilmiştir. Bu sonuçlar, K2'nin en yüksek basma dayanımı, akma dayanımı ve üniform gerinim gösterdiğini göstermektedir. Ayrıca K2'den sonra K3 numunesi en yüksek basma dayanımını ve üniform gerinimi ikinci sırada gösterirken, ZK60 alaşımı en düşük performansı göstermiştir. Kompozitlerin nihai basma dayanımı ve akma noktası değerlerinin değişimi kıyaslandığında paralel bir artış ve azalma göstermektedirler. K1 numunesine kıyasla K2 ve K3 numunelerinde gerilme-gerinim değerlerindeki değişim sırasıyla %11,8 - %8,2 ve %8 - %7,1 olmuştur.



Şekil 7.29. ZK60 ve kompozitlerinin gerilme-gerinim eğrileri.

Bu sonuçlar, literatürle uyumlu olarak T/M numunelerinin basma dayanımı özelliklerini geliştiren kompozit malzemelerdeki takviye içeriğinin artmasıyla açıklanabilir [10,159].

Çizelge 7.4. ZK60 ve kompozit numunelerin basma testi sonuçları.

Malzeme	0.2% Akma Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Üniform gerinim (%)	Kırılma gerinimi (%)
K1	205.4	339.3	16.0	18.3
K2	290.1	379.2	18.2	19.8
K3	230.7	366.5	15.7	19.6

Diğer yandan, T/M üretim parametreleri dikkate alındığında, tüm numunelerin iyi bir gerilme ve gerinim değerleri gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle denemeler ile elde edilen toz metalurjisi üretim parametrelerinin literatür ışığında uygunluğunun kabul edilebilir olduğu anlaşılmaktadır [10,11,159,185]. Basma gerilme-gerinim grafiği hasar açısından değerlendirildiğinde, K2 numunesinin daha keskin ve ani azalan kırılma-gerinim davranışı ve değerleri gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca K3 numunesi ve takviyesiz K1 numunesi, K2 numunesine göre daha kademeli bir kırılma davranışı göstermektedir.

Mikro ve nanopartiküllerin mikro yapısı, boyutu ve dağılımlarının mekanik özellikleri etkilediği iyi bilinmektedir [10,11,185]. Bu etkiler, matris ve takviyelerin fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri ve morfolojisi ile yakından ilgilidir. Literatürde belirtildiği gibi [167], termal genleşme katsayısı (TGK) ile elastik modül (E) arasındaki uyumsuzluk nedeniyle geometrik olarak gerekli dislokasyonların (GND'ler) üretildiği söylenebilir. TGK ve E'deki matris ve takviye arasındaki uyumsuzluklar, termal kalıntı gerilimi oluşmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla oluşabilecek bu tür uyumsuzluklar kompozitlerin dayanım özelliklerini etkilemektedir.

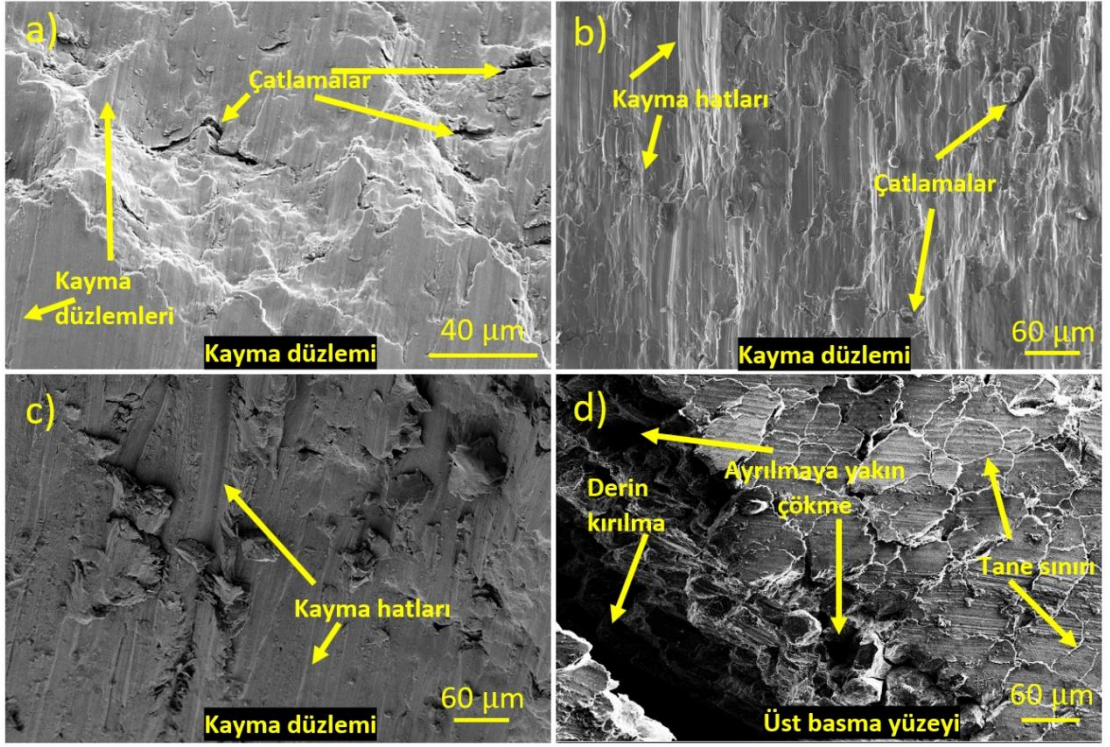
Ayrıca yumuşak ZK60 matrisinden daha sert bileşenlere (TiB_2 +grafen partikülleri) doğru transfer edilen yük paylaşımı, mukavemet değerlerinin artmasını sağlamaktadır. Diğer yandan mikro ve nanoparçacık takviyeli hibrit kompozit ile beklenen yüksek mukavemetin elde edilemediği görülmektedir. K2 ve K3 numunelerinin sonuçları karşılaştırıldığında, GNP ilavesi (K3 numunesinde) basma dayanımı değerlerinde bir miktar azalmaya neden olmuştur. Mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuş K2 ve K3 kompozitlerinin mukavemeti, orijinal ZK60 Mg alaşımına kıyasla arttığı tespit

edilmiştir. Ancak K3 numunesinin basma mukavemeti ve üniform gerinim değeri beklenenin altında performans göstermiştir. Bu durumlar, ilgili literatürde açıklandığı gibi [182,183,186] nano grafen partiküllerinin topaklanması ile açıklanabilmektedir.

Şekil 7.30, basma testi gerçekleştirilen numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. K1 numunesinin kırık yüzeyinde pürüzlü ve düzgün klivaj kırılma özelliklerinin yanı sıra basma kayma düzlemine dikey çatlaklar ile sünek-çukurlu bölgeler gözlenmektedir. Ayrıca kayma hattı kırığı üzerinde yönün değiştiği de gözlemlenebilmektedir. Diğer yandan, K2'nin çatlak yayılımı değişiklikleri, basma kayma düzlemine dikey çatlamlar gösterir. K3'ün kırılma yüzeyi ise pürüzlü, sınırlı çukurlar ve basma-kayma düzlemine dikey çatlamlar ile kısmen pürüzsüz bölünme özellikleri gösterir.

Çatlak makro fotoğrafları, numune köşegenlerinde 45° eğim ile oluşan konik bir ilerleme göstermektedir. Başka bir deyişle, basma testi altındaki numunelerin kırık yüzey incelemesi, tüm kompozitlerde kayma bantlarının varlığını ortaya koymaktadır. Kırılmış numunelerin makroskobik incelemesi, kırılmaların diyagonal benzeri 45° eğimli iki ana çatlak yoluyla meydana geldiğini ve dolayısıyla basma testi eksenine doğru konik çatlama kaynağı olduğunu doğrulamaktadır. SEM görüntülerindeki görünür kayma-kesme bantları, bu kompozitte önemli ölçüde ikizlenme aktivitesi olduğunu göstermektedir ki bu durumun Mg bazlı malzemelerde en yaygın deformasyon mekanizması olduğu bildirilmiştir [165].

Ayrıca kayma yüzeyine dik, taneler arası dikey çatlamlar oluşmuştur. TiB_2 takviyesi parçacıklarının kayması sırasında sürüklenmesine, sıyrılmasına ve etraflarında çatlakların oluşmasına neden olmuştur. Bilindiği gibi kayma, tane sınırlarında ve sert parçacıkların etrafında boşluklara neden olur. Basmanın ilerleme aşamasında, oluşan boşlukların birleşmesi ve en sonunda kırılma meydana gelmektedir. Ayrıca, üst yüzey kırığında (Şekil 7.30 (d)'de) görüldüğü gibi gözeneklilik ve aglomerasyonun (kısmen TiB_2 ve esas olarak GNP'ler) taneler arası kırılmayı desteklediği anlaşılmaktadır.



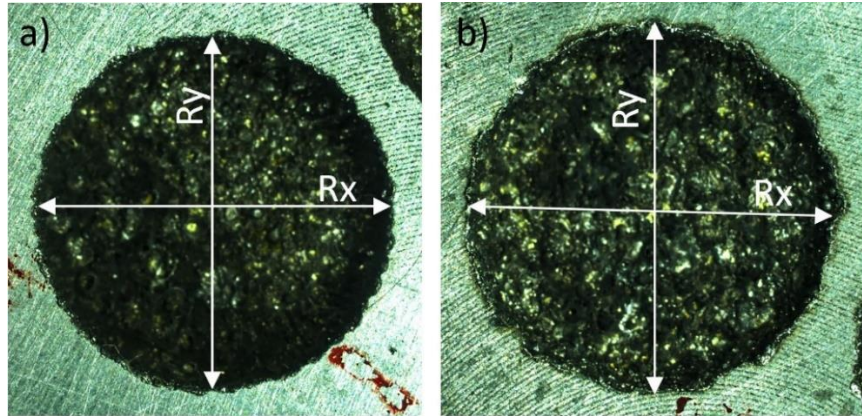
Şekil 7.30. Numunelerin kırılma yüzeyi a) K1, b) K2, c) K3, d) K2 (basma uygulanmış üst yüzey)

Bu açıklamalar gerilme-gerinim eğrileri ile karşılaştırıldığında, kırık yüzey görünümleri basma testi eğrileri ile uyumlu olduğu görülmektedir. K2 numunesinin kırılma görünümü, maksimum dayanıma düzgün kırılma yüzeyi ve tane içi takviye taneciklerinin etkisiyle ulaşılması, yüksek lokal sertleşme ile ani çökme şeklinde kırılma oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca, K3 numunesinde maksimum basma gerilimi sonrasında ani bir kırılma gösterdiğinden, mikro parçacık delikleri görülmemiştir.

7.6. ELEKTRO EREZYON İLE İŞLENEBİLİRLİK SONUÇLARI

7.6.1. AZ61 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ ile İşlenmesi

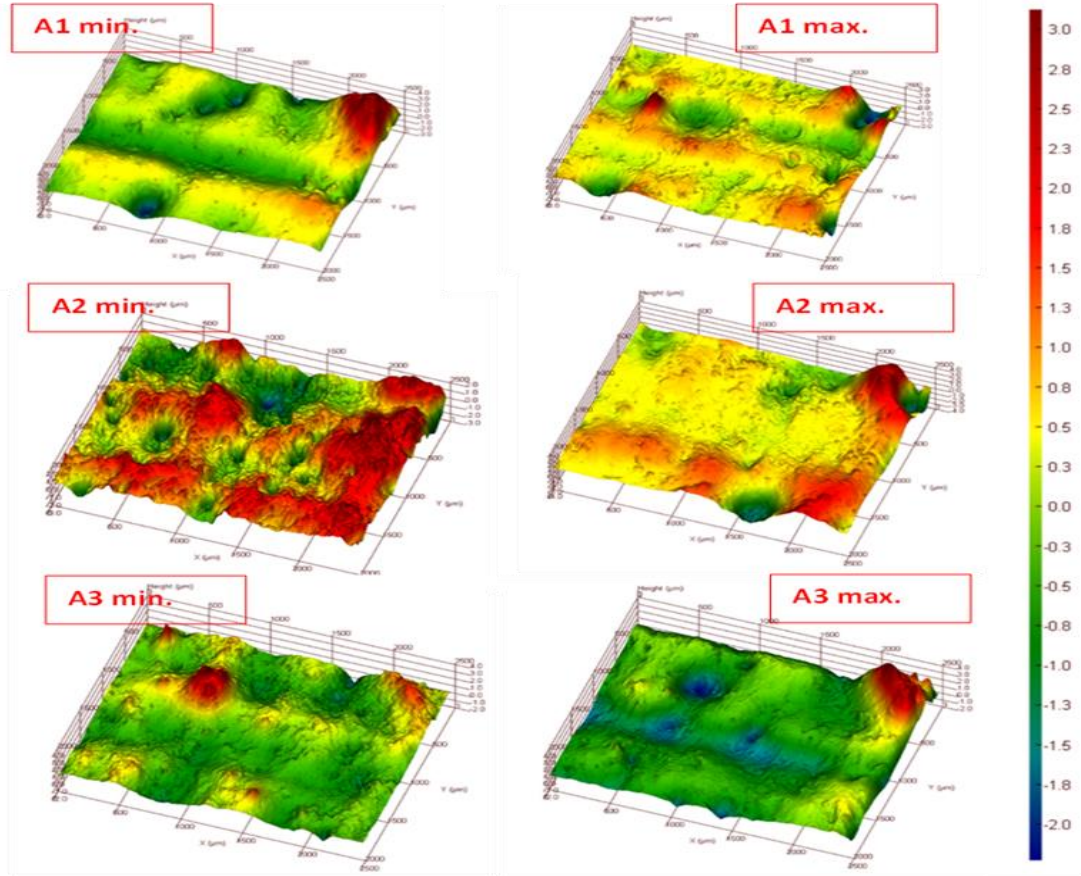
Kompozitler, EEİ ile işleme sonrası çeşitli analizlere tabi tutulmuş, işleme etkileri ve performansları değerlendirilmiştir. İlk olarak işlenmiş bölgelerin delik çap, boyut ve geometrileri, projeksiyona entegre edilmiş bir stereo mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Şekil 7.31’de minimum ve maksimum işleme parametreleri kullanılarak işlenmiş iki numunenin üst görünümü verilmiştir. TKEEİ işleme parametre değerleri (akım ve vurum süresi) arttığında tüm numuneler için delik boyutu artmış ancak A2 ve A3 kompozit malzemelerde A1 numunelere göre sınırlı kalmış ve AZ61 numunesinde en yüksek olarak elde edilirken A3’te en az elde edilmiştir. Boyutlar hakkında daha fazla bilgi vermek gerekirse: A1 grubu için çap ölçümleri; I: 4 ve t:6’da $r_x = 7,88$ ve $r_y = 7,80$ mm, I: 16 ve t: 400’de $r_x = 8,07$ ve $r_y = 8,12$ mm dir. A2 grubu için I: 4 ve t:6’da $r_x = 7,50$ ve $r_y = 7,57$ mm. I: 16 ve t: 400’de $r_x = 7,79$ ve $r_y = 7,82$ mm dir. Bu değerler A3 grubu için benzer işleme parametrelerinde $r_x = 7,75$ ve $r_y = 7,82$ mm- $r_x = 7,79$ ve $r_y = 7,77$ mm olarak belirlenmiştir. Sonuçta, GNP takviyeli A3 kompozit numunesinin delik çapı boyutu artışı, A1 ve A2 numunelerine göre çok daha düşük olmuştur.



Şekil 7.31. a) A1 numunesinin minimum parametreler ile b) maksimum parametreler ile işlenmiş yüzeyi

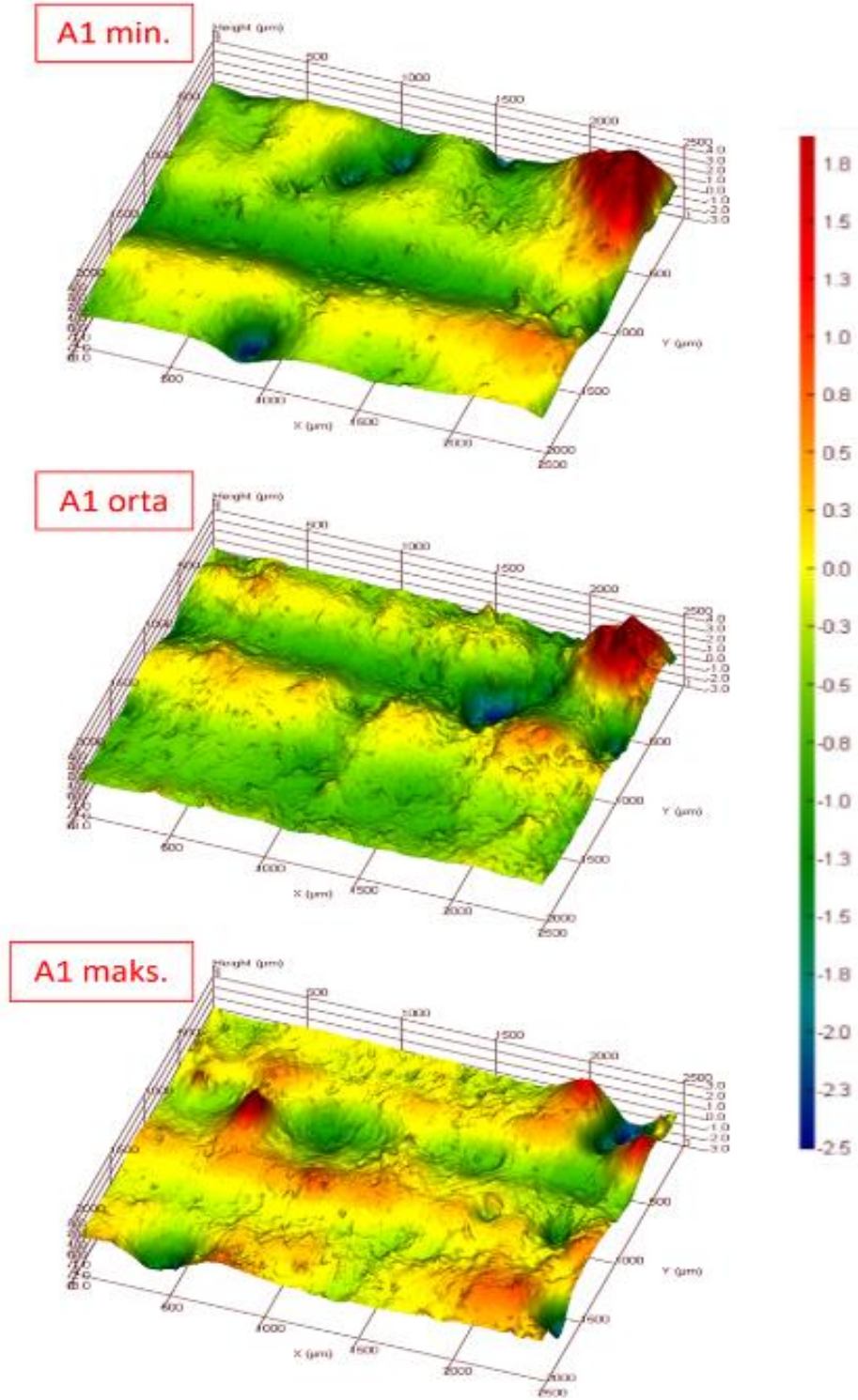
TKEEİ ile işlemleri gerçekleştirilen yüzeylerin karakterizasyon değerlendirmeleri için topografya analizlerinden faydalanılmıştır. Topografya, bir yüzey boyunca

yüksekliklerin veya çöküntülerin dağılımı anlamına gelir; mikrojeometri ve pürüzlülük ikame terimleridir. Esasen bir yüzey, malzemenin kütle özelliklerinden diğerine bir geçiş bölgesi olarak kabul edilir. Açık literatürde benzer yaklaşımın kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Şekil 7.32, sırasıyla düşük ve en yüksek akım ve zaman parametrelerinde işlenmiş A1, A2 ve A3 numunelerinin yüzey profilini göstermektedir. Anlaşıldığı üzere TKEEİ parametrelerinin artırılması ısının etkisini, dolayısıyla beyaz tabakanın (ergimiş ve katılaşmış tabaka) kalınlığını arttırmaktadır. Artan parametrelerden özellikle akım ile YP büyük ölçüde artmıştır [187]. Ponappa vd. [146], YP ($Ra=3-8 \mu m$) ve delik kalitesindeki bu gelişmeyi proses verimliliği ve nano boyutlu takviyenin etkisi ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca şekillerde de görüldüğü gibi kompozit malzemenin YP'si AZ61 alaşımına göre daha iyidir. Metal yapının tepkisi, özellikle seramik partiküllerle takviye edildiğinde kompozite göre çok daha yüksektir. Diğer yandan, metal yüzeylerde EEİ ile işlemenin yüzeyde oluşturduğu tahribat, kompozite göre daha yüksek olduğu araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir [34,188].

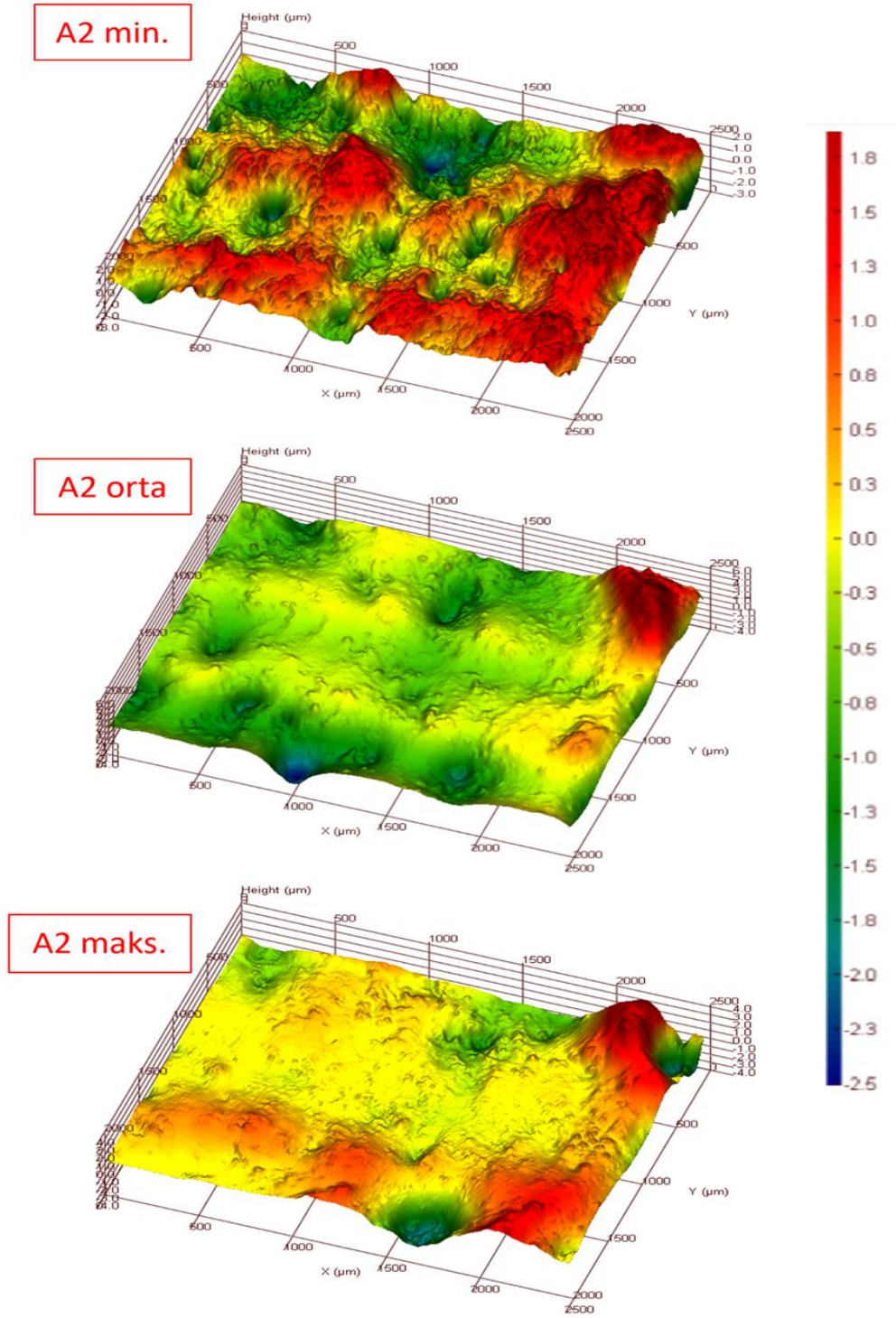


Şekil 7.32. TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerin yüzey topografyası.

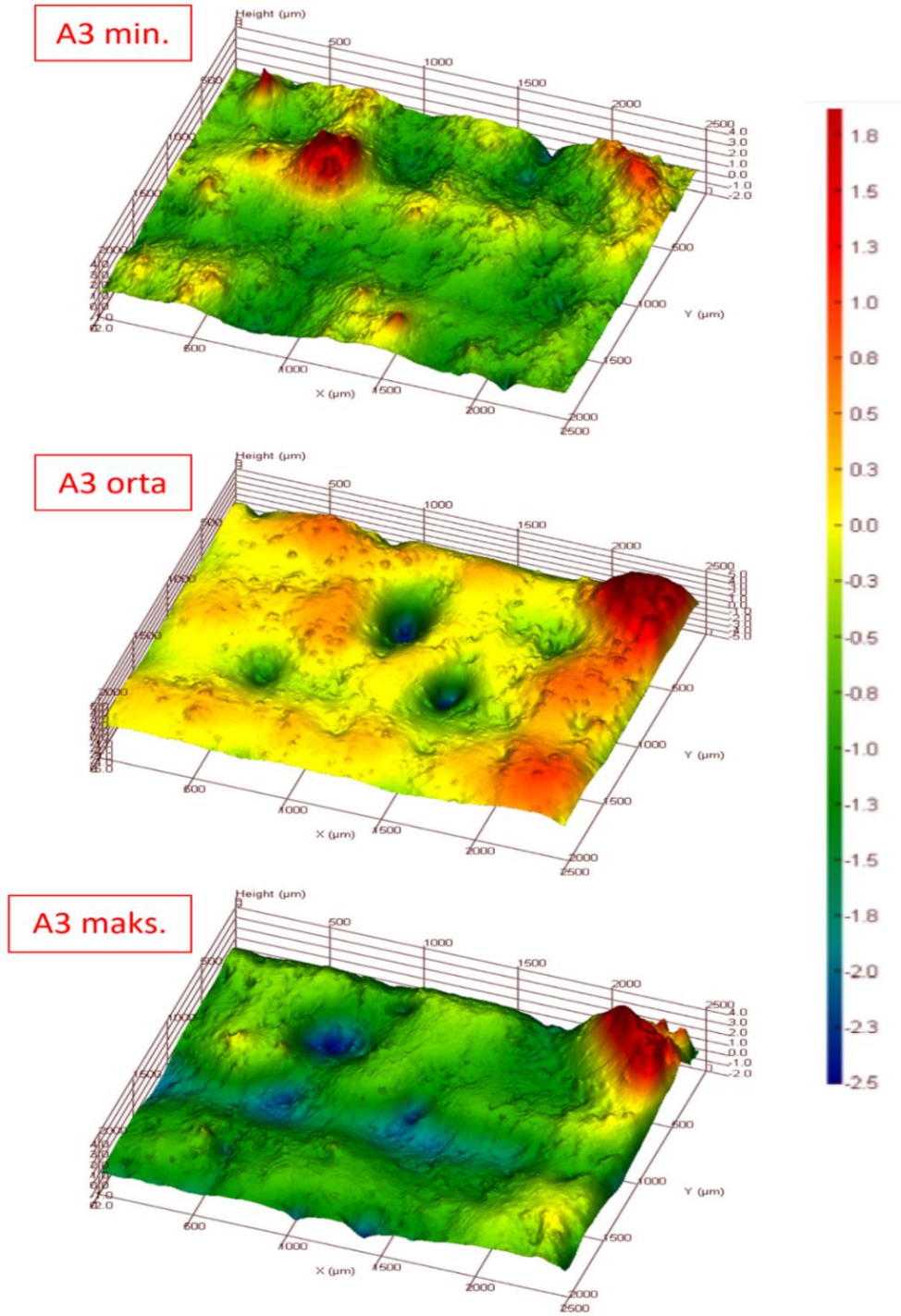
Ek olarak A1'e ait (Şekil 7.33), A2'ye ait (Şekil 7.34) ve A3'e ait (Şekil 7.35); minimum, orta ve maksimum parametreler ile işlenmiş yüzeylerin topoğrafyaları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Bu şekillerde aynı malzemelerin farklı parametreler ile işlenmesi sonucu yüzey profilleri farklılıklarını inceleyebilmek mümkün olabilmektedir.



Şekil 7.33. A1'in min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.



Şekil 7.34. A2'nin min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.



Şekil 7.35. A3'ün min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.

Araştırmacılar, numunelerin TKEEİ ile işlenmiş yüzeyini doğrudan erimiş ve katılmış tabaka veya beyaz tabaka olarak tanımlamışlardır. Şekil 7.36, Şekil 7.37 ve Şekil 7.38'de tüm numunelerin (A1, A2 ve A3) yüzey mikroyapılarını, yüzey tabakalarından alınan mikroyapı fotoğraflarını ve farklı bölgelerden alınan EDS

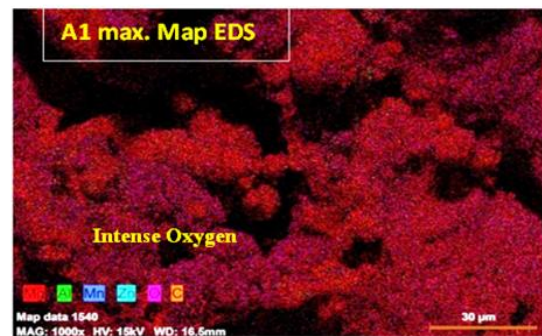
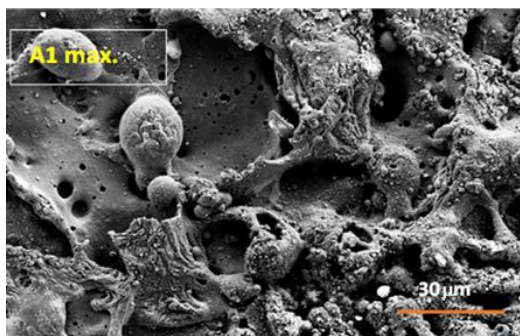
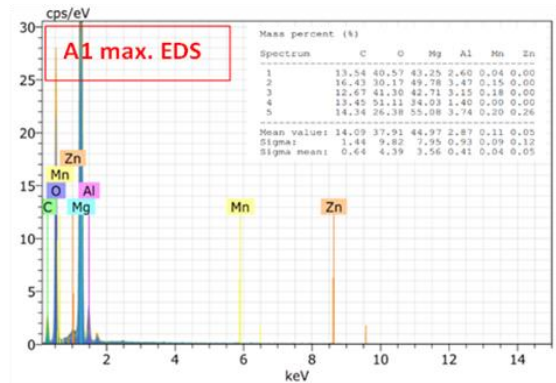
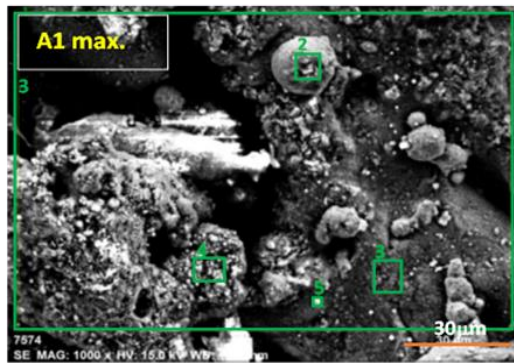
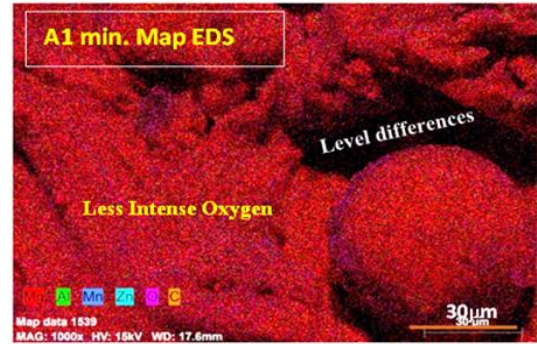
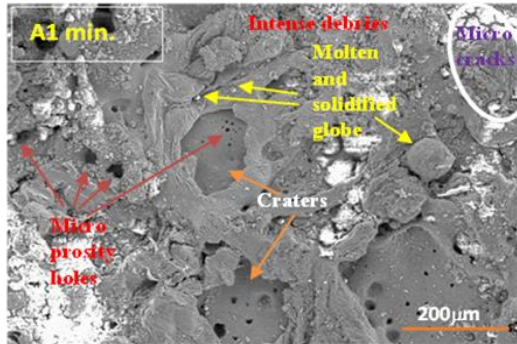
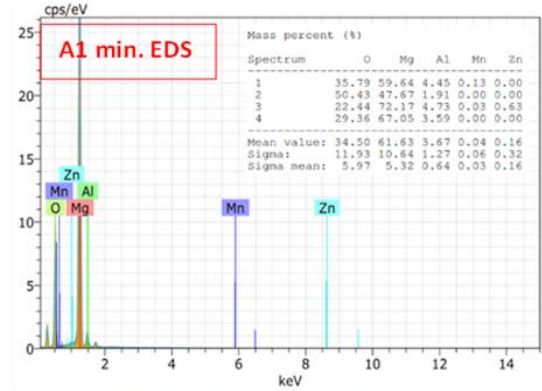
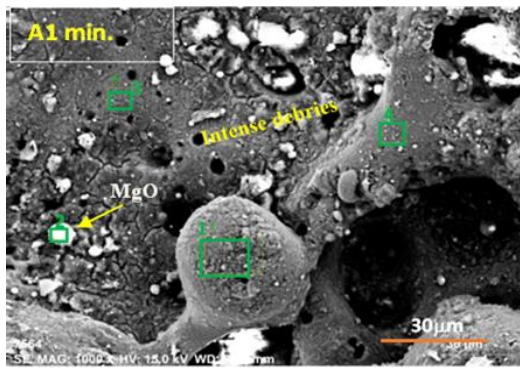
analizlerini göstermektedir. Bu görüntüler ve EDS analizleri minimum ve maksimum proses parametrelerine göre seçilmiştir. Bu numunelerin yüzeyleri incelendiğinde şekillerde görüldüğü gibi tipik metal erimiş ve katılaşmış yapıları görülmektedir. Isı girdisi, ulaşılan sıcaklık, ortam, kerosen (dielektrik sıvı) ve numune içeriği bu yapı üzerinde etkilidir.

EDS sonuçlarına göre yüzeydeki oksijen seviyesi değişimi EEİ proses değerinin büyüklüğüne bağlıdır. Aşağıdaki gibi, artan oksijen seviyesi, artan EEİ proses parametrelerinin değerine, nihai olarak ısı girdisi-sıcaklık artışına bağlı olarak değişmektedir. Isı girdisinin artması, stokiyometrik kimyasal bileşikler ve kerosen gibi maddelerin çözünmesini beraberinde getirmektedir [189,190]. Bu artış süreci tamamen etkilememektedir ancak ciddi etkileri olmaktadır. EEİ işlemi dalma işlemi ile birleştirildiğinde ortaya çok karmaşık durumlar çıkabilmektedir. Örneğin proses sonuçları, YP ve MRR üzerinde ilginç etkilere neden olmaktadır. Kompozit malzemeler söz konusu olduğunda ise bu etki daha da ilginç hale gelebilmektedir. Genel olarak, dalma EEİ proseslerinde dielektrik sıvı olarak kerosen ve hidrokarbon yağları kullanılmaktadır. Hidrokarbon yağı ve kerosen çok yüksek plazma sıcaklıklarında ayrışır ve işleme düzeneğinin etrafındaki atmosferi kirletebilir. TKEEİ'deki karıştırma sistemi, proses yüzeyindeki bu etkiyi azaltırken, karbon ve oksijen partiküllerinin çalışma yüzeyine yapışması da verimliliği ve kararlı deşarjı sınırlayabilir ve MRR'yi daha da azaltabilir. Dolayısıyla MRR ve YP değerlerinde bu değişkenlikler ve sapmalar görülebilmektedir.

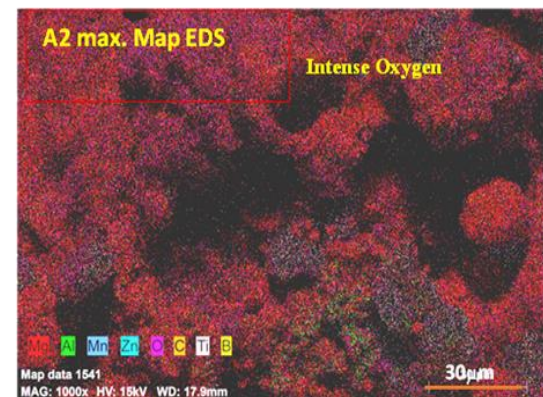
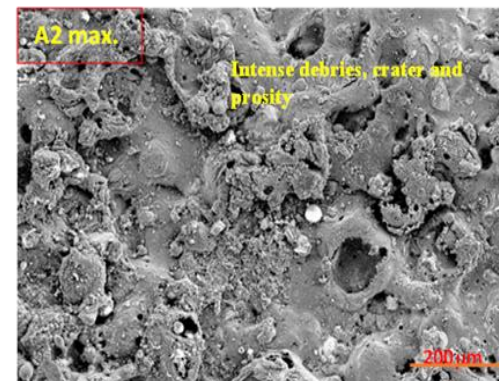
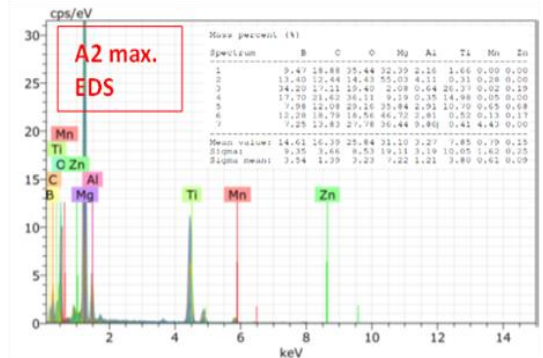
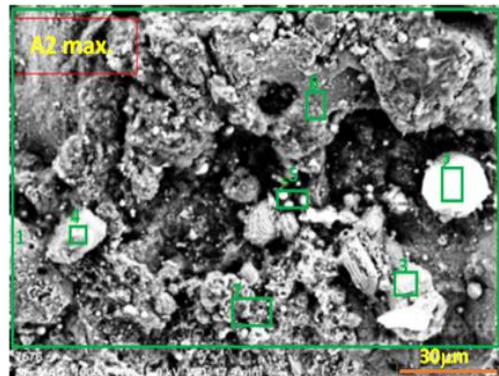
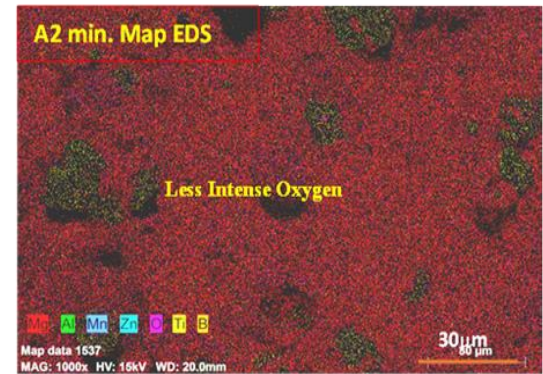
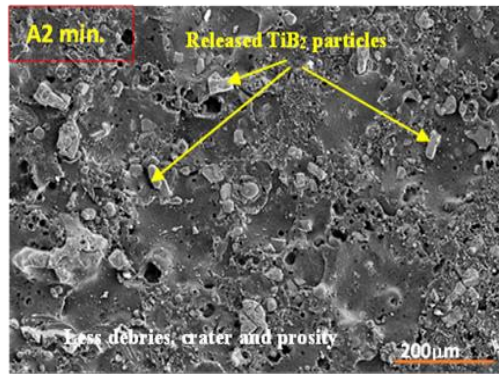
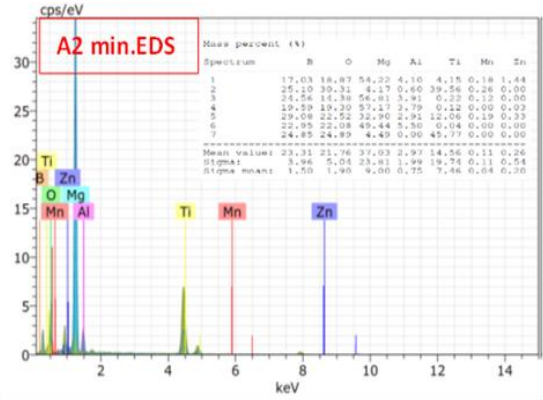
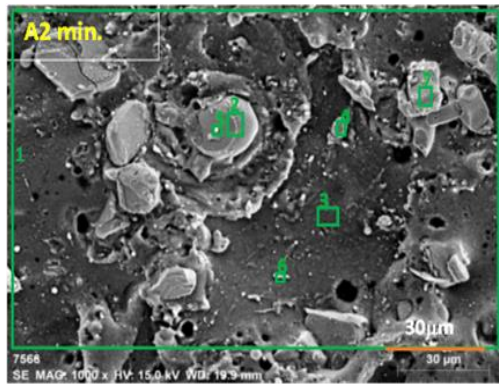
TKEEİ uygulanmış yüzeyde gözlemlenen volkanik kraterler, delikler, molozlar ve beyaz tabakanın boyutu, yüzey işleme parametre değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Akım ve vuruş süresindeki artış, füzyon kaynaklı hasarı, işleme sırasında erimiş tabaka kalınlığını, birikinti miktarını, yüzey yığılmaları üzerindeki birikinti ve kraterlerin erimiş metal ile kaplanmasını arttırmıştır [187,191]. Kompozit malzemelerde, takviye partikülü TiB₂ elemanı yüzeyde daha çok görünmekte ve yüzeydeki miktarı artmaktadır. TiB₂'nin yapışma gücü yüzey kalitesi için önemlidir. Ayrıca yoğunlukta olduğu gibi, TiB₂ parçacıklarının çevresinde bulunan gözenekler nedeniyle bu bölgedeki boşluklar daha olası görünmektedir [184]. Yüzey bileşenleri ve oluşumları, TKEEİ proses parametrelerine bağlı olarak kimyasal ve morfolojik

olarak farklılık göstermektedir. Genel olarak, parametrik artış nedeniyle yüzey bozulma görüntüsü daha karmaşık ve şiddetli hale gelmektedir.

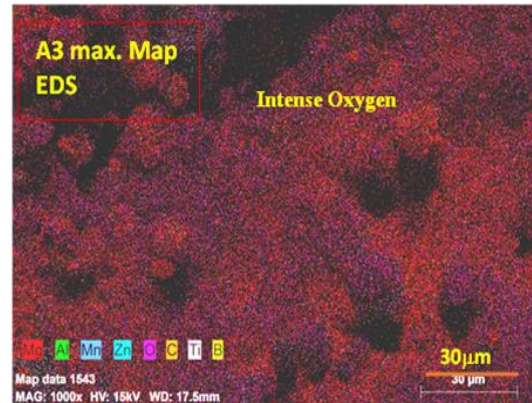
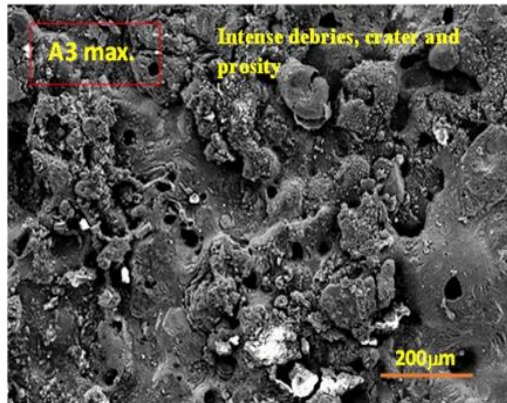
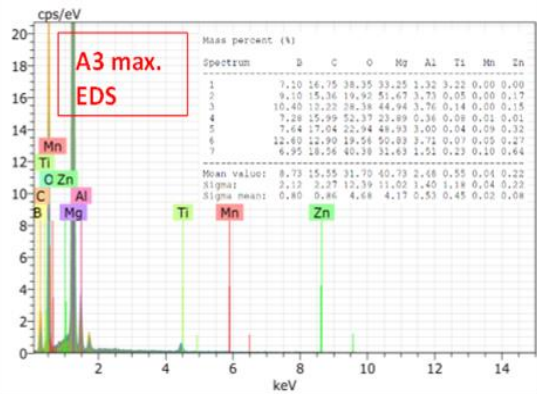
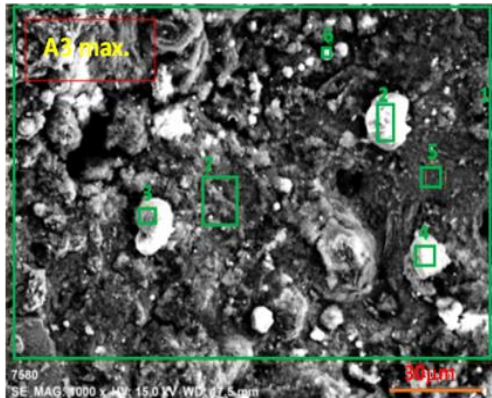
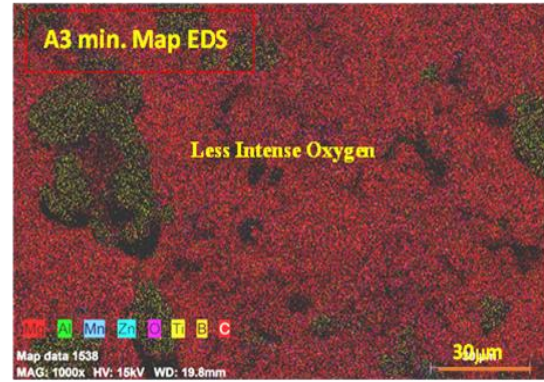
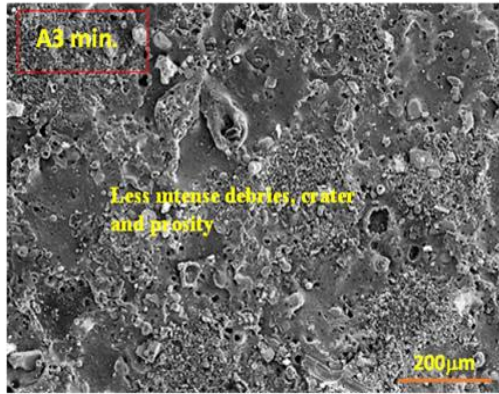
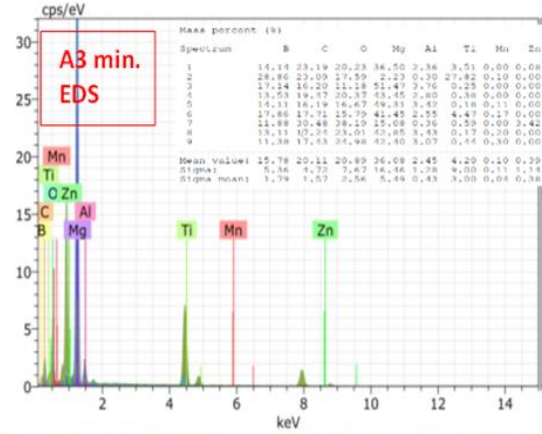
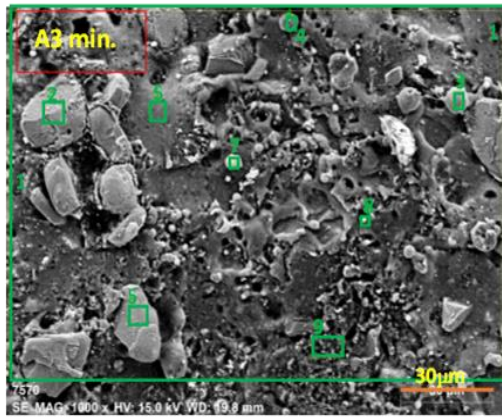
Yukarıdaki literatür göz önüne alındığında, yüzeyde çatlak oluşumu EDM için yaygın bir durum gibi görünmektedir. Bu açıdan ilgili şekil ve açıklamalarda görüldüğü gibi çok az çatlak oluşumu gözlenmiştir. Beyaz tabakaların incelenmesi bir sonraki bölümlerde verilmiştir ve derinlere doğru uzanan belirgin çatlaklar gözlenmemiştir. Ayrıca düzensiz erime ve katılaşmanın diğer bileşenler üzerindeki etkileri nedeniyle seviye farklılıkları gözlemlenmektedir. Araştırmada Peças ve Henriques [145], bu çatlaklardan bazılarının, kapasitif etki nedeniyle deşarj üreticinin sağlaması gerekenden daha fazla enerji içeren deşarjlarından kaynaklandığını bildirmiştir. Kazara boşalmalar daha büyük kraterler oluşturabilmektedir. Ayrıca erimiş malzemenin krater sınırlarını aşmasına ve krater merkezindeki metal buharlaşmasına sebep olabilmektedir. En yüksek ve en düşük TKEEİ akım ve vuruş süresi değerlerinde, bu durum numune yüzeylerinde çoğunlukla küresel kalıntıların, erimiş-katılaşmış ve dağınık görünümlü krater benzeri formların şiddetini de etkilemektedir. Long vd. [145] olası bantların TKEEİ ile işlemede gözlemlenmediğini bildirmişlerdir. Ancak, küçük kraterler mevcuttur. Bunu, bazı araştırmacılar gibi [145,146] işleme sırasında daha düşük düzensiz kıvılcım deşarjlarının olası bir göstergesi olarak yorumlamışlardır. Başka bir çalışmada Jabbaripour vd. [139] yüzey bütünlüğünün temel özellikleri arasında yüzey topografyası, YP, beyaz film, yüzey çatlak oluşumu, mikrosertlik dağılımı ve ayrıca işlenmiş parçanın yüzeyinin altındaki metalurjik değişikliklerin ve döküntülerin yer alabileceğini de rapor etmişlerdir. Ayrıca EEİ yerine TKEEİ kullanmanın bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Bunun yanında, kullanılan tozun iletkenliğinin yüzey özelliklerini önemli derecede etkilediğini de bildirmişlerdir. Bu çalışmada, AZ61 alaşımının tipik TKEEİ işleme yüzeyi görünümü, takviye elemanlarının varlığı, kompozit yüzeyde döküntü görünümü, takviye partiküllerinin ağırlık artışı ve literatürde belirtilen bileşen yaklaşımlarıyla tutarlıdır [40,192]. Ayrıca bu mikro fotoğrafların incelenmesinde nano-grafen varlığını tespit etmek çok zor olsa da Şekil 7.36'daki EDS kimyasal analizlerinde C'nin varlığı anlaşılmaktadır. C'nin varlığının bir diğer nedeni de işlemlerde kullanılan grafit tozlarıdır.



Şekil 7.36. TKEEİ ile işlenmiş A1 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografaları.

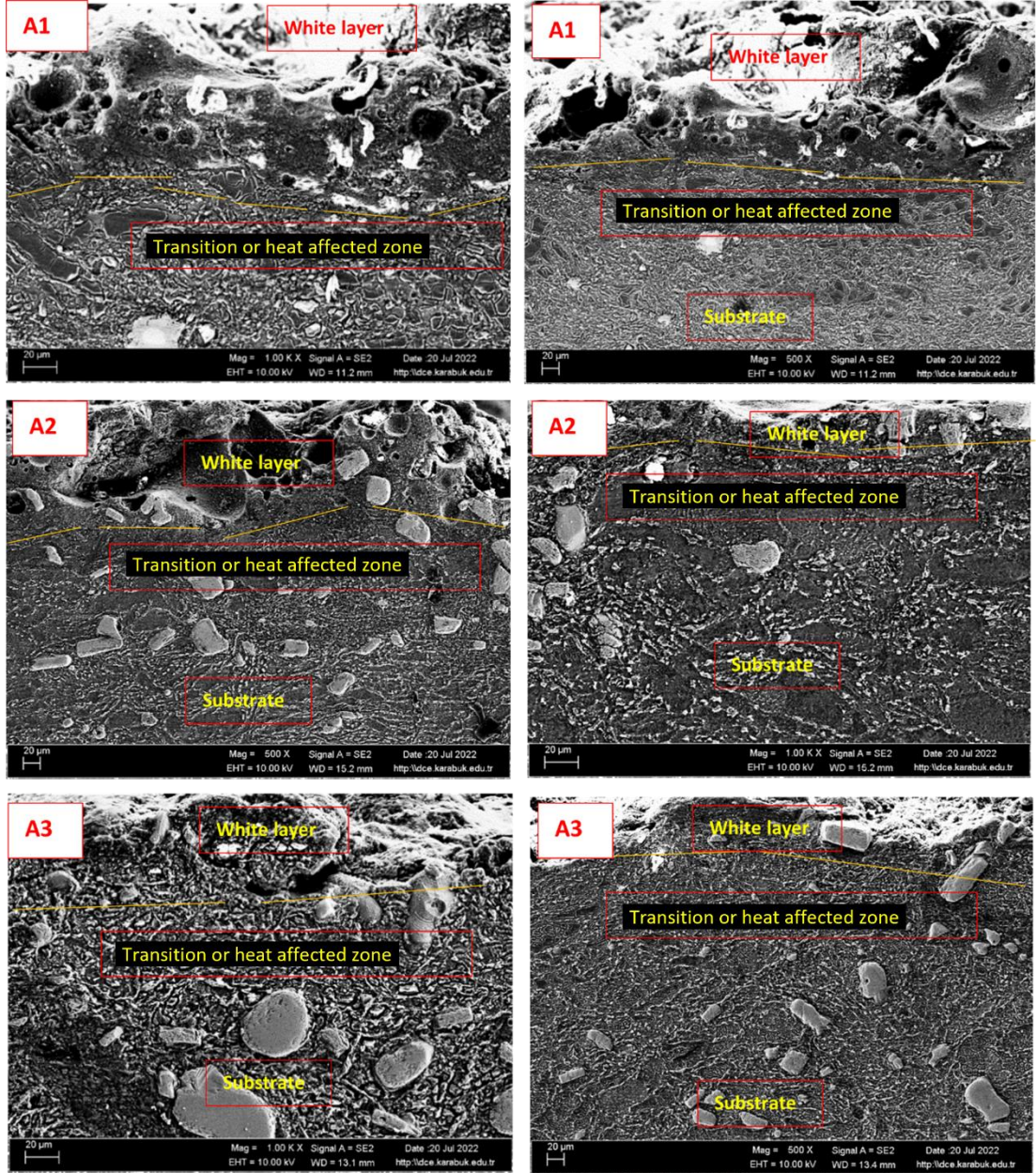


Şekil 7.37. TKEEİ ile işlenmiş A2 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografı.

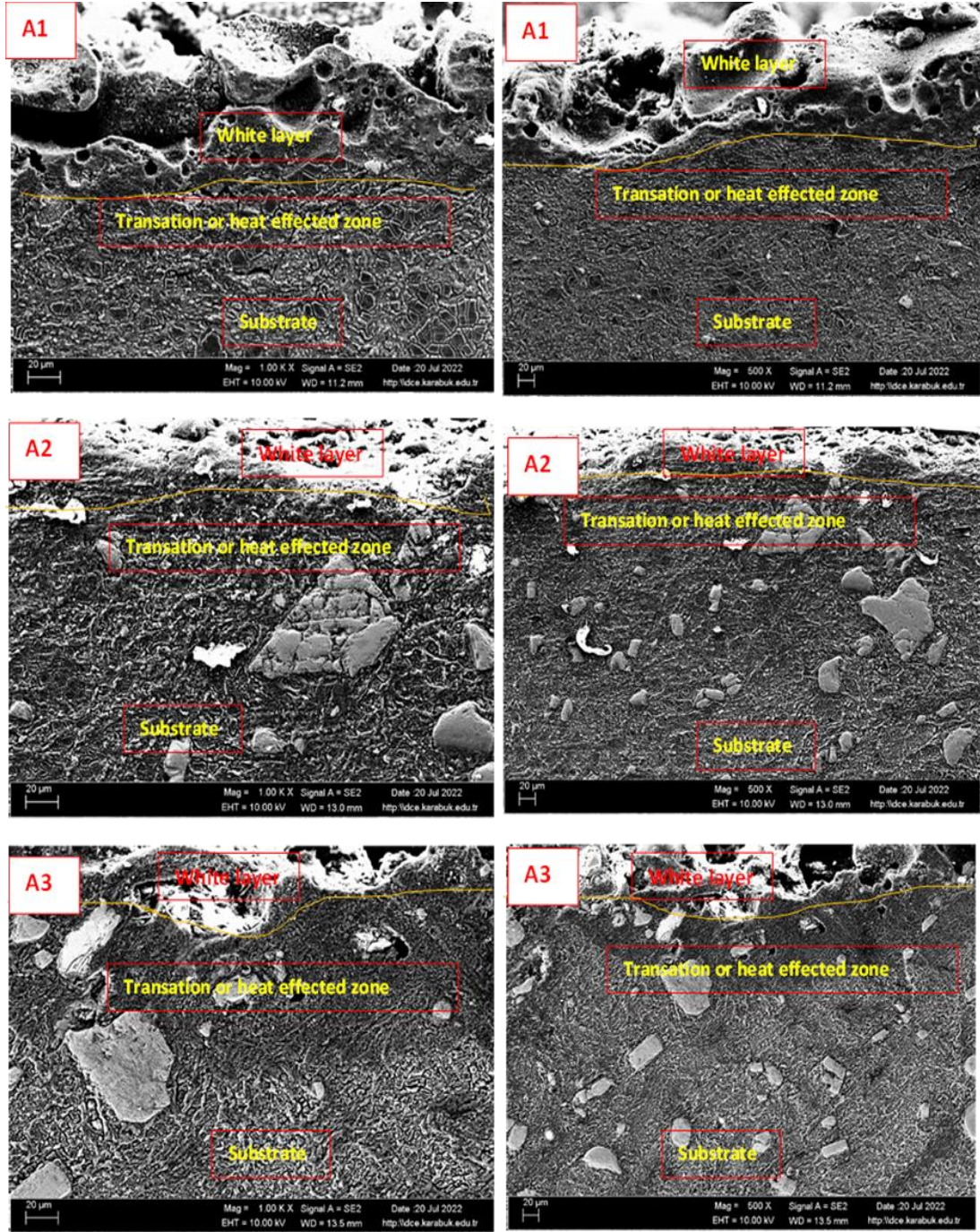


Şekil 7.38. TKEEİ ile işlenmiş A3 yüzeyinin minimum ve maksimum işleme parametrelerinin SEM mikrofotografı.

Şekil 7.39 ve Şekil 7.40, numunelerin işlenmiş yüzeylerinin enine kesitlerini göstermektedir. Şekillere göre beyaz tabaka, erimiş ve katılaşmış tabakaların tipik yüzeyini ve devasa bir ısı atmosferinin etkilerini gösteriyor. Küçük ve büyük delikler, delikler arasındaki camsı yüzeyler ve volkanik kraterler gibi diğer yüzey faktörleri, yüzeyden aşağıya doğru uzanan çatlaklar ve molozlar, işleme gerçekleştirildikten sonra ortaya çıkmıştır. Diğer yandan, geçiş bölgesi özellikle yüzeye komşu alanlarda temel yapının bozulmasına neden olan sınırlı bir erime-katılma sürecini yansıtmaktadır. Minimum ve maksimum parametreler ile işlenmiş numunelerin kesit görüntüleri belirgin ve ayırt edici bir yapı göstermemişlerdir.



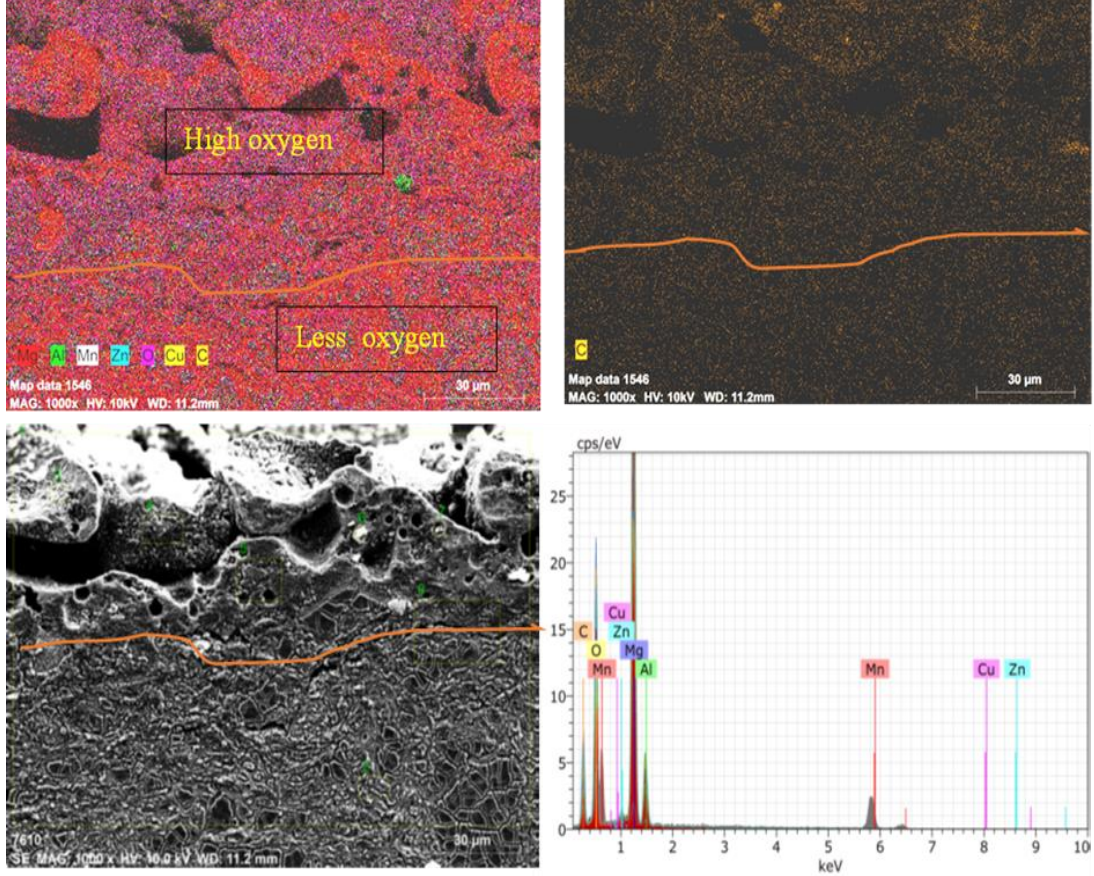
Şekil 7.39. Daha düşük ve daha yüksek büyütme oranları ile maksimum TKEEİ akımı ve vurum süresi değerleri ile işlenmiş numunelerin beyaz tabakasının mikrofotografı



Şekil 7.40. Daha düşük ve daha yüksek büyütme oranları ile minimum TKEEİ akımı ve vurum süresi değerleri ile işlenmiş numunelerin beyaz tabakasının mikrofotografaları

Şekil 7.41'deki EDS haritası ve pik analizlerinde görüldüğü gibi, minimum TKEEİ akımı ve vurum süresi parametreleri kullanılsa bile, işlenmiş beyaz tabakadaki oksijen alt tabakaya göre önemli ölçüde artmaktadır. Beyaz tabaka ve alt tabaka karşılaştırıldığında O oranı farkı anlaşılmaktadır. Oksijen oluşumunun açıklamasına

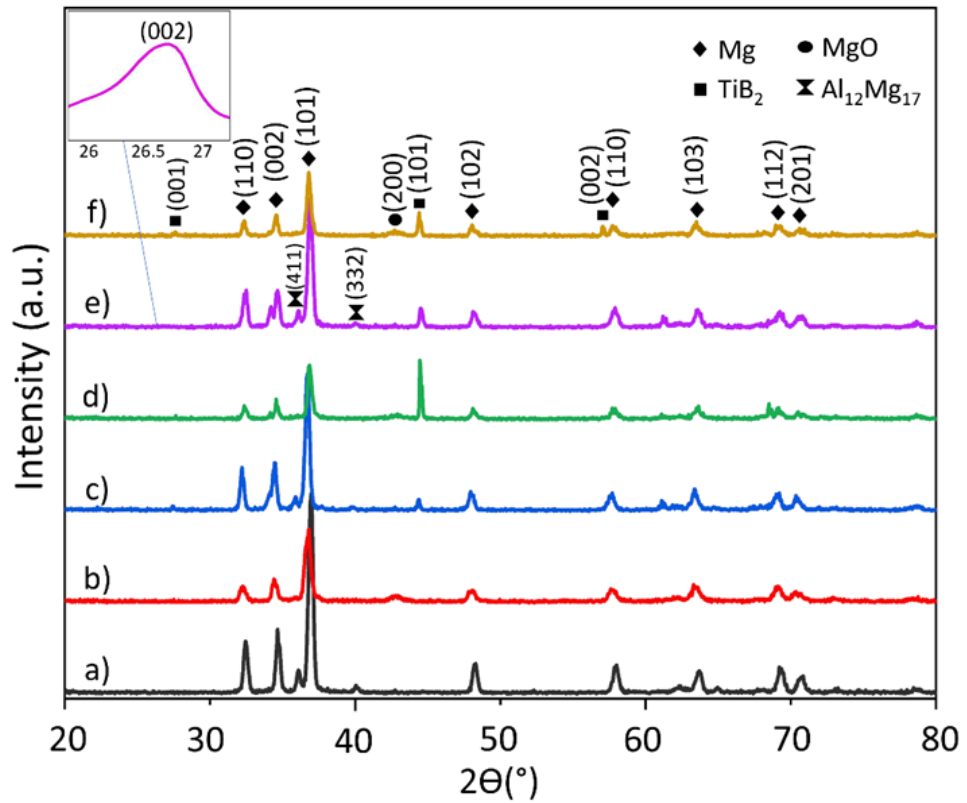
yukarıda yer verilmiştir. Ayrıca burada elde edilen karbon (C) varlığı, nano-grafen tozu ve dielektrik sıvıya karıştırılan grafit tozundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.41. TKEEİ Minimum akım - vurum süresi değerleri ile EDS elementel ve Harita analizi.

İşlem görmemiş kompozit yüzeylerinin ve TKEEİ maksimum akım ve vurum süresi parametreleri ile işlem görmüş bölgelerin XRD analizleri Şekil 7.42'de verilmiştir. Grafikten, işlenmiş tüm yüzeylerde işlemden sonra Mg'ye ait pik şiddetlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. $Al_{12}Mg_{17}$ fazının işlem görmemiş tüm kompozitlerde mevcut olduğu ve bu fazın işlemeden sonra kaybolduğu ve tekrar ortaya çıkmadığı anlaşılmaktadır. TKEEİ işleminden sonra işlenmiş yüzeylerde MgO fazının oluştuğu görülmektedir. TiB_2 takviyesi içeren kompozitlerde, TiB_2 'nin ergime noktasının yüksek olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda Mg'ye kıyasla varlığını sürdürebildiği ve TiB_2 'nin yapı içinde daha fazla oranda kaldığı, TiB_2 piklerinin şiddetinin artmasından açıkça anlaşılmaktadır. Buna karşılık Mg yapıdan daha önce uzaklaşmaktadır. Diğer yandan, grafen içeriği cihazın algılayabileceği içerik miktarı

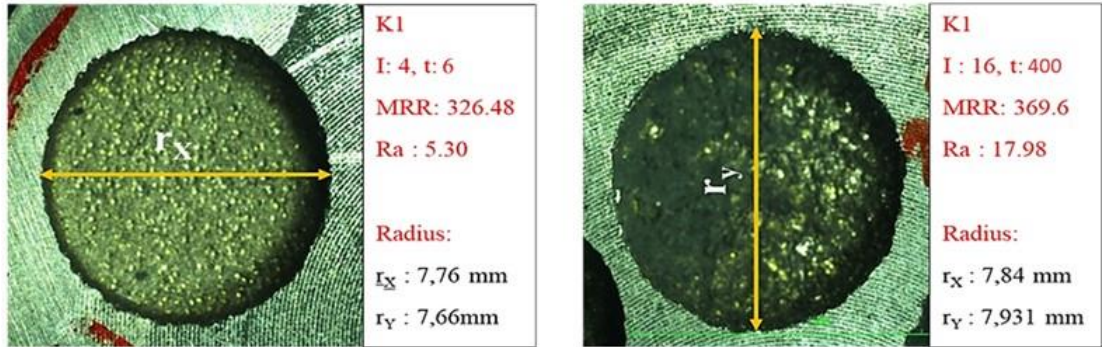
limitinin altında olduğu için GNP piki görülememiştir [167]. Araştırmacılar, GNP'ye ait pikleri tespit edebilmek için sabit zamanlı XRD taraması kullanmışlardır. Bu çalışmalardan birinde Mustu vd. [94], ZK60 /TiB₂-GNPs kompozitleri için XRD analizi yapmış ve GNP'lere ait herhangi bir pik olmadığını bildirmişlerdir. GNP'lerin varlığını kanıtlamak için sabit zaman (FT) yöntemini kullanmışlardır. GNP zirvesinin 2θ'da 26.7°'de tespit edildiğini bildirmişlerdir. Bu çalışma için FT taraması uygulanmıştır. Adım genişliği ve sayma süresi sırasıyla 0.05° ve 90 s idi. GNP'lere ait pik, Şekil 7.42'de ek olarak verilen (002) düzleminde ve 26.7°'de görülebilmektedir.



Şekil 7.42. a) A1, b) İşlemeden sonra A1, c) A2, d) İşlemeden sonra A2, e) A3 ve f) İşlemeden sonra A3'ün XRD desenleri.

7.6.2. ZK60 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ ile İşlenmesi

Şekil 7.43, TKEEİ ile işlenmiş K1 numunesinin en düşük ve en yüksek parametreler kullanılarak işlenen bölgelerinin, iki eksenli boyutlarıyla üstten görünüşünü göstermektedir. Geometrik ölçümlere göre TKEEİ akım ve vurum süresi proses parametre değerleri arttığında, delik çapı tüm numunelerde artmış ancak kompozit malzemelerde sınırlı kalmış ve ZK60 numunesinde en yüksek olmuştur. Boyutlar hakkında daha fazla bilgi vermek gerekirse: K2 grubu için I:4 (A) ve t:6 (μ s) 'da delik çap ölçüleri $r_x = 7,54$ ve $r_y = 7,633$ mm. I: 16 (A) ve t: 400 (μ s)'de delik çap ölçüleri $r_x = 7,883$ ve $r_y = 7,881$ mm'dir. Bu değerler K3 grubu benzer parametreler için $r_x = 7.614$ ve $r_y = 7.597$ mm. $r_x = 7.688$ ve $r_y = 7.595$ mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, K2 ve K3 kompozitlerinin delik boyut artışı, orijinal ZK60 örneğine göre daha düşük olmuştur. K3 kompoziti diğerlerine kıyasla en kararlı ve en az değişiklik gösteren numune olmuştur.

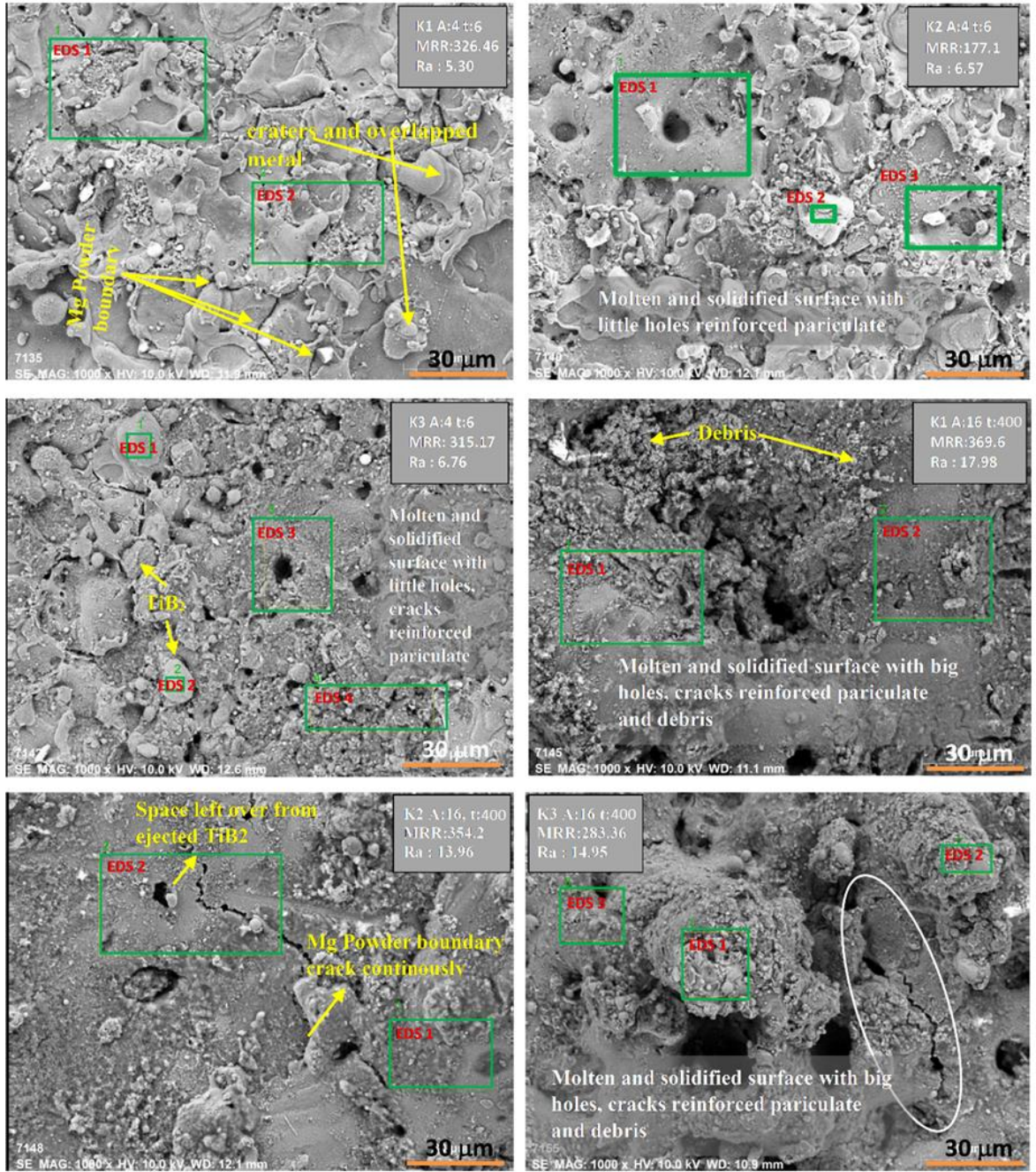


Şekil 7.43. TKEEİ ile işlenmiş bölgelerin (deliklerin) üstten görünüşleri.

TKEEİ ile işlenen numunelerin yüzey mikro yapıları Şekil 7.44'te, EDS kimyasal analizleri Şekil 7.45'te gösterilmektedir. Yüzey mikro yapıları, kalıntıları, numunelerin erimiş ve katılmış yüzeylerini, kraterleri görülmektedir. Akım ve vurum süresindeki artış, işleme sırasında erimeyi ve deşarj tahribatını arttırmaktadır. Bu nedenle eriyip katılan tabakanın, birikintileri ve yüzey kraterlerini kapladığı rapor edilmiştir [187]. Fotoğraflarda belirtildiği gibi çatlak oluşumu, tane sınırlarının yansması ve Mg matrisi toz sınırlarının belirginleşmesi gibi görünmektedir. TKEEİ işlemi sırasında bu sınırlardaki malzeme daha fazla boşalmakta ve boşluklar artarak çatlak görünümü vermektedir. Ayrıca yoğunluk ve SEM görüntüleri değerlendirilmesinde olduğu gibi

TiB₂ partiküllerinin çevresinde bulunan porozitelerin de etkisi ile bu bölgedeki boşlukların daha yoğun olduğu görünmektedir [184]. Dahası, Peças ve Henriques [145] bu çatlaklardan bazılarının, kapasitif etki nedeniyle deşarj üretici tarafından sağlanması beklenen enerjiden daha fazla enerji içeren kontrolsüz deşarjlardan kaynaklandığını bildirmişlerdir. Kontrolsüz deşarjlar daha büyük kraterler oluşturabilmektedirler. Ayrıca erimiş malzemenin krater sınırlarını aşmasını ve krater merkezinde metal buharlaşmasının oluşmasına yol açmaktadırlar. Orijinal K1 numunesinin en yüksek ve en düşük TKEEİ akım ve vurum süresi değerlerinde, numune yüzeylerinde çoğunlukla küresel kalıntılar, erimiş-katılmış ve dağınık görünümlü bazı krater benzeri formlar bulunmaktadır.

Jabbaripour vd. [139], yüzey bütünlüğünün temel özellikleri arasında yüzey topografyası, YP, beyaz film, yüzey çatlak oluşumu, mikrosertlik dağılımı, döküntüler ve ayrıca işlenmiş parça yüzeyinin altındaki metalurjik değişikliklerin yer alabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca EEİ yerine TKEEİ kullanmanın bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azalttığını ve kullanılan tozun yüksek iletkenliğinin yüzey özelliklerini daha da iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Tüm açıklamalar ve gözlemler; AZ61 alaşımının tipik TKEEİ görünümü, takviye elemanlarının varlığı, kompozit yüzeyde döküntü görünümü, takviye partiküllerinin ağırlık artışı ve literatürde belirtilen bileşen yaklaşımlarıyla tutarlıdır [40,192]. Bu mikro fotoğrafların incelenmesinde GNP varlığını tespit etmek çok zor olsa da Şekil 7.45'deki EDS kimyasal analizlerinde C'nin varlığı tespit edilebilmiştir. C'nin varlığının bir başka nedeni de işlemede kullanılan grafit tozlarıdır. Ayrıca Ti ve B gibi takviye elemanlarından kaynaklanan elementlerin varlığı da açıkça görülmektedir.

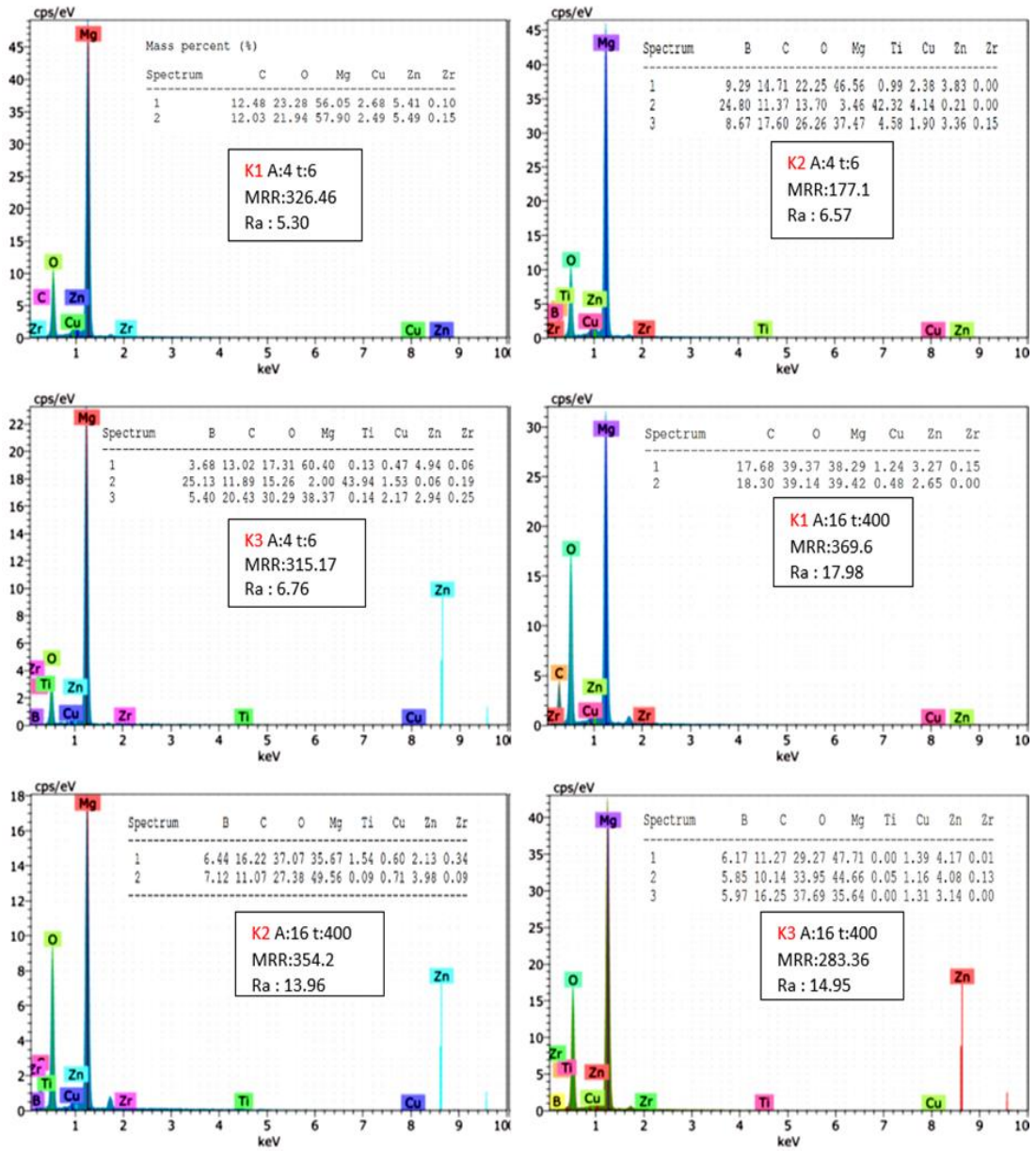


Şekil 7.44. Numunelerin TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerinin SEM mikrofotografaları.

Analizler sonucunda tespit edilen diğ er bir nokta ise, oksijen miktarının TKEEİ'nin düşük akım değerlerine kıyasla yüksek akım değerlerinde oldukça artmış olmasıdır. Bu durum proses parametrelerinin yüksek olması, daha fazla ergime-katılma ve karşılaştırma proseslerinde dahi yüksek oksidasyon ile açıklanabilmektedir [145,146]. Ayrıca EDS analizlerinde Cu bulunmasının nedeni de açıktır; bu, elektrotlardan eriyerek birikmiş kalıntı malzemesidir. Bu noktada, TKEEİ'nin etkili olabilmesi için yüzeylerin işlemden önce zımparalanması ve atmosferik koruma ile temizlenmesi verimliliği arttırabilir. Erime ve katılma ile ilgili konulara odaklanarak yeni yaklaşımlar sağlamak mümkün olabilmektedir. Literatüre yenilik olarak birçok yeni yaklaşımlar bu çalışmada yapılmıştır. Örneğin, oksijenin varlığının açıklaması özellikle küçük döküntülerin erimiş metal ile kaplanması olacaktır. Yüzeydeki boşlukları arttıran bir durum da TKEEİ kıvılcımı oluştuğunda, Mg'nin erimesi ve eş zamanlı olarak takviye parçacığının yüzeyden çıkarılmasıdır.

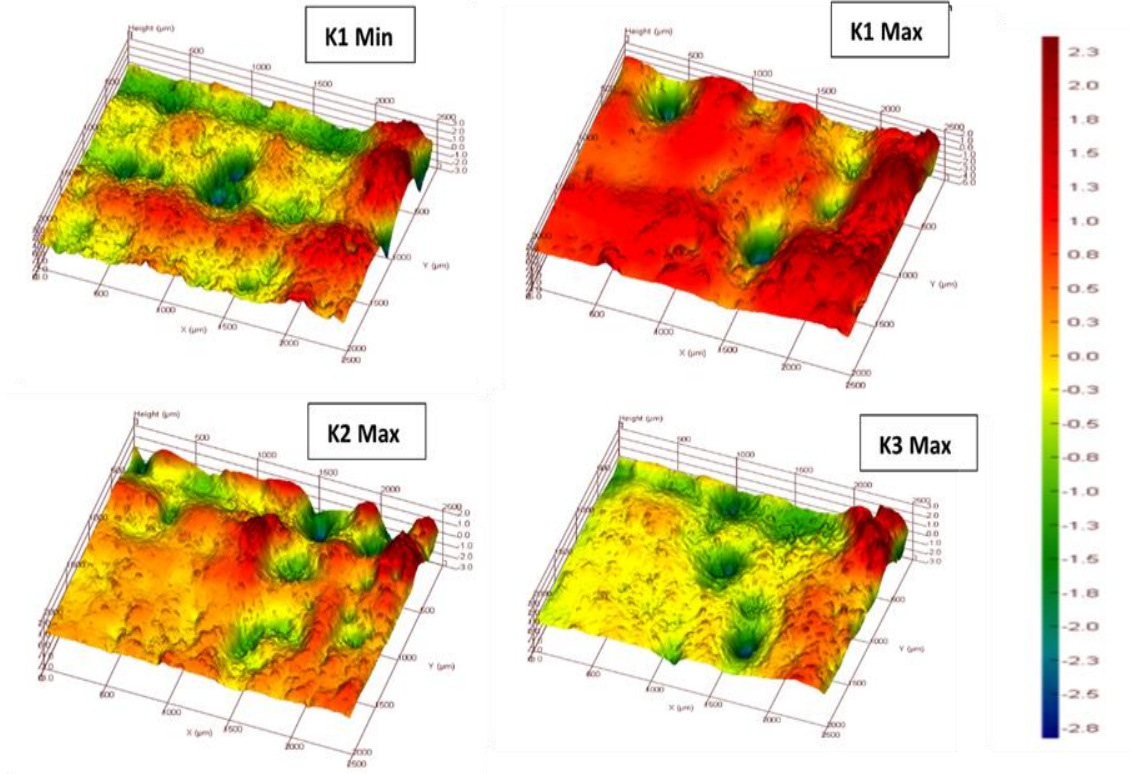
Kompozit yapıdaki boşluk ve topaklanma bölgeleri, kontrolsüz deşarjları ve TKEEİ işleminde uygulanan enerji miktarını arttırabilmektedir [184]. Ayrıca malzemenin ısıdan etkilenen bölgesinin artmasına neden olmaktadır. Optimum vurum süresi aşıldığında, kararsız deşarj nedeniyle MRR düşmektedir. TKEEİ yöntemindeki en önemli işleme parametrelerinden biri olan deşarj akımı, vurum süresi ile doğrudan ilişkilidir [184,187]. Sonuç olarak bu çalışmada TiB₂ partiküllerinin homojen olarak dağıldığı ve grafen nanopartiküllerin bir miktar topaklanma gösterdiği göz önüne alındığında, nanopartiküllerin topaklanmasının katılmış küresel formun oluşumunda etkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Şekil 7.45'e bakıldığında bu değerlendirmeyi destekleyen mikro elementlerin mevcut olduğu anlaşılmaktadır.

Ponappa vd. [146] tarafından rapor edildiğine göre, dielektrik sıvı içerisine nano boyutlu parçacık takviyesi, anormal ark oluşumlarını azaltabilmektedir ki YP'deki (Ra = 3-8 µm) ve delik kalitesindeki bu gelişme, nano boyutlu takviyenin proses verimliliğini arttırması ile açıklanabilir.



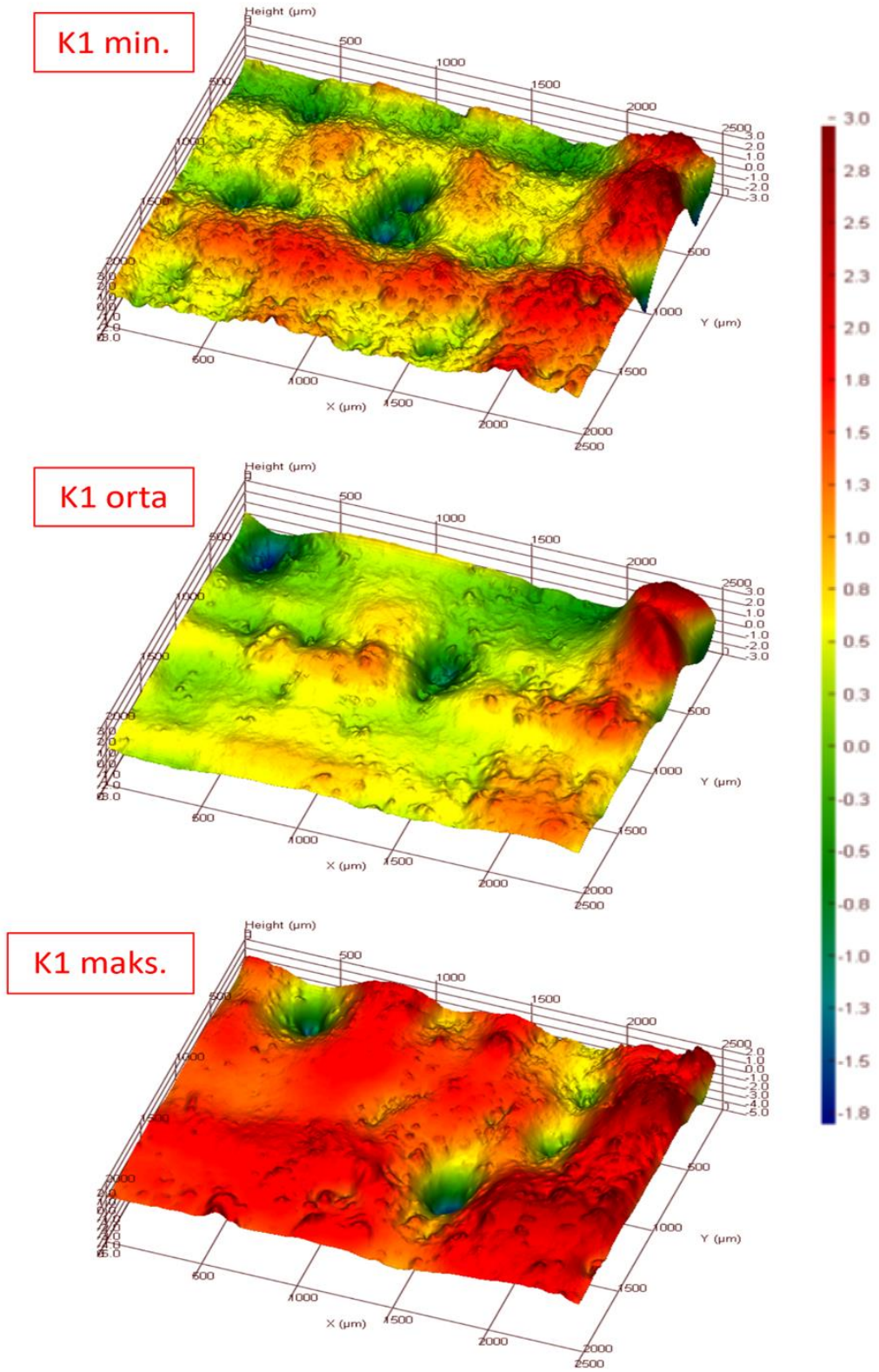
Şekil 7.45. TKEEİ ile işlenmiş yüzeylerin (Şekil 7.44) SEM-EDS spektrumları.

Şekil 7.46, en düşük TKEEİ parametreleri ile işlenmiş orijinal numunelerin ve en yüksek TKEEİ parametreleri ile işlenmiş kompozit numunelerin yüzey topoğrafyasını göstermektedir. Kompozit malzemelerin işleme sonrası YP değerleri, orijinal ZK60 alaşım numunesinin işlenmiş yüzeylerinden daha iyidir. Metal yapının tepkisi, özellikle seramik partikül ile takviye edilmiş kompozite kıyasla çok daha yüksektir. Dolayısıyla metal matris yüzeylerde TKEEİ işleminin şiddeti kompozitlerden daha yüksek olmaktadır [34,188].

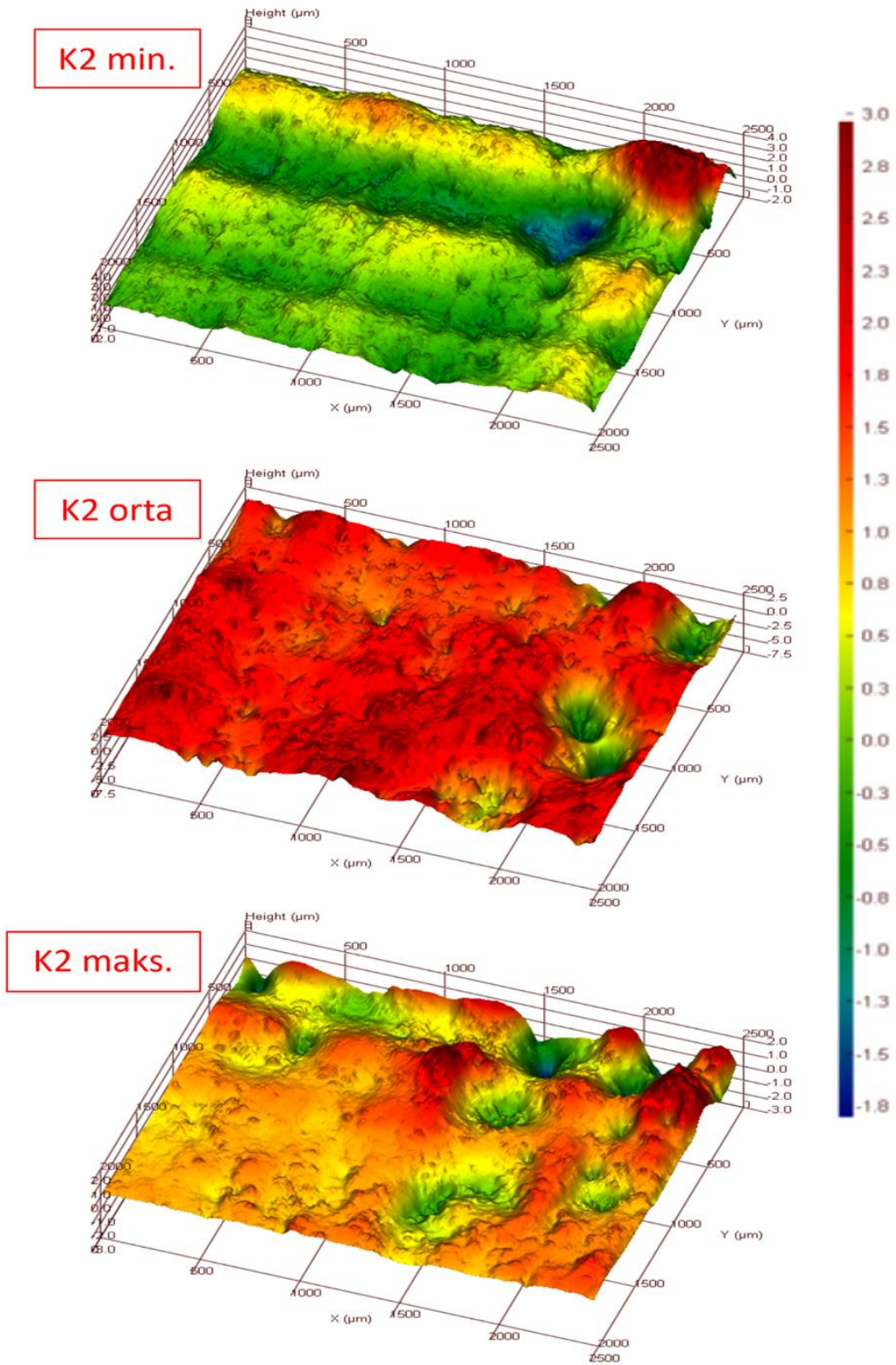


Şekil 7.46. TKEEİ işlenmiş yüzeyin yüzey topografisi.

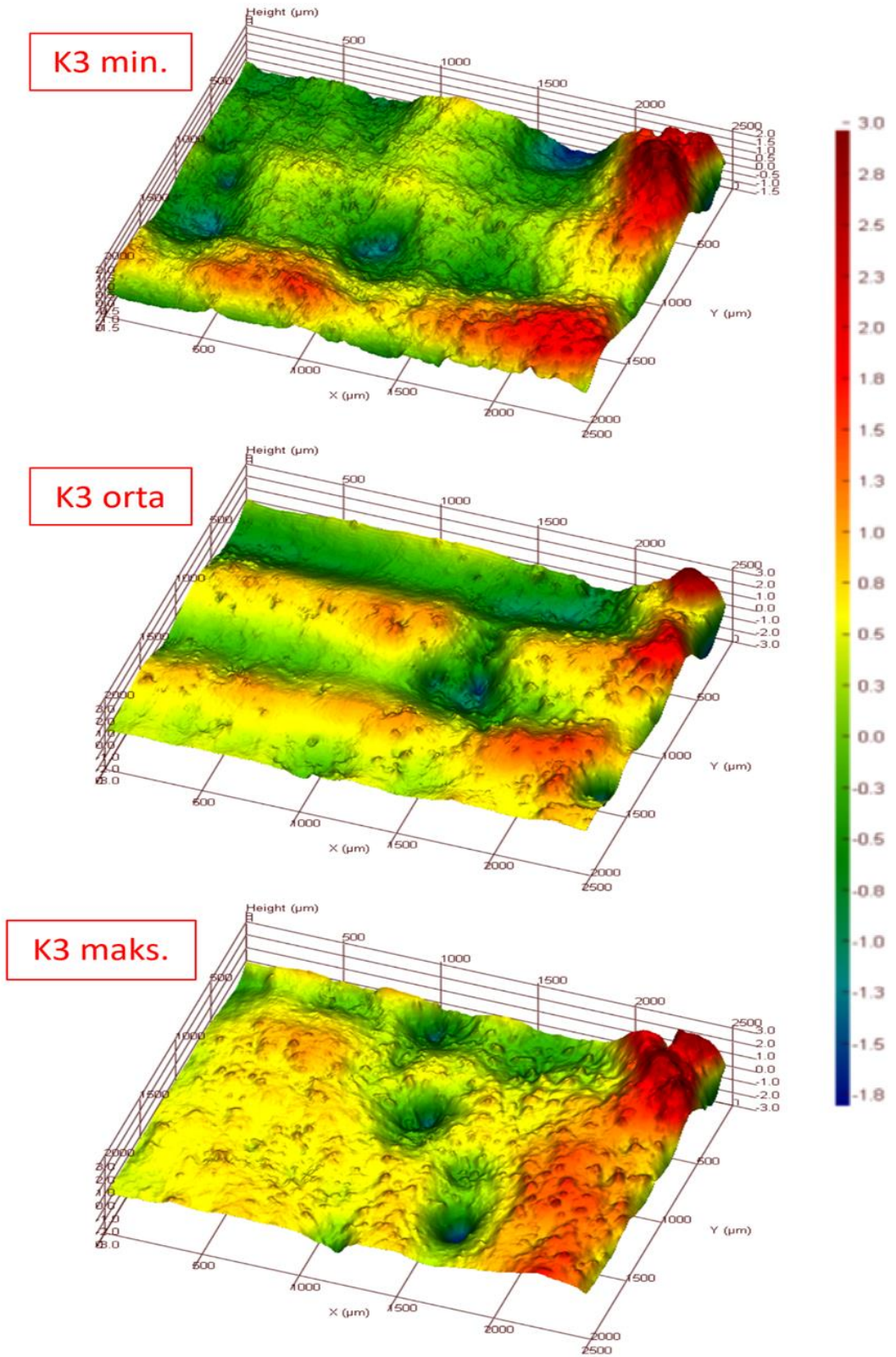
K1, K2 ve K3 numunelerinin Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49’da (yukarıdan aşağı sırasıyla) düşük, orta ve yüksek akım-vurum süresi parametreleriyle işlenmiş yüzeylerinin topoğrafyaları verilmiştir.



Şekil 7.47. K1'in min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.

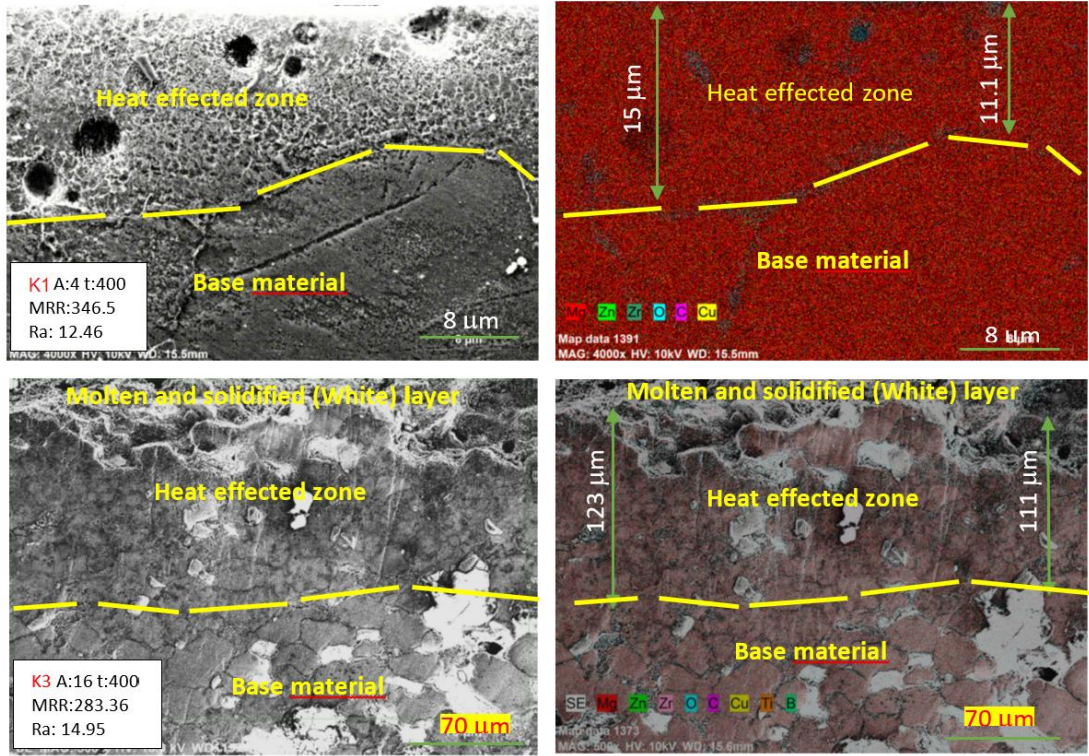


Şekil 7.48. K2'nin min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları.



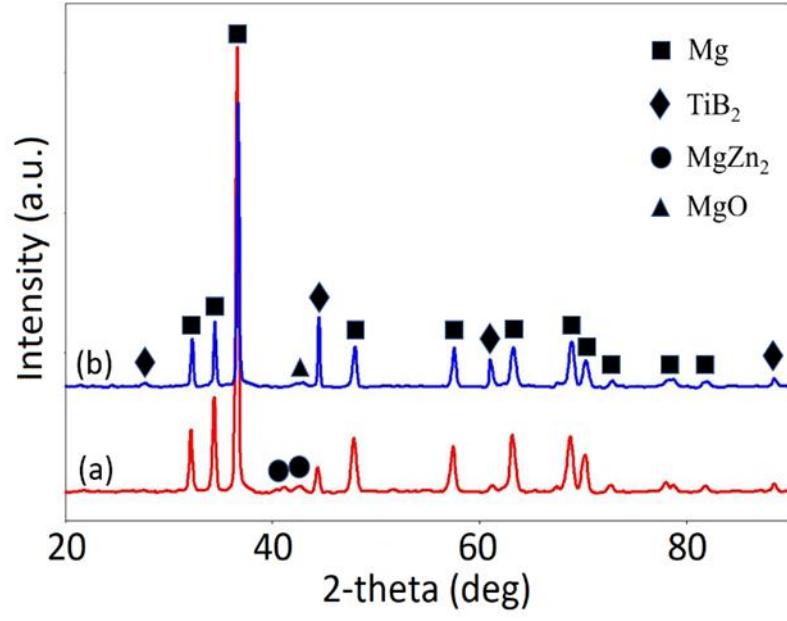
Şekil 7.49. K3'ün min., orta ve maks. parametreler ile işlenmiş yüzey topografyaları

Şekil 7.50 en düşük akım ve en yüksek vurum süresi parametreleri ile işlenmiş K1, en yüksek akım ve vurum süresi parametreleri ile işlenmiş K3 numunesinin beyaz tabaka mikroyapı fotoğraflarını göstermektedir. Anlaşıldığı üzere TKEEİ parametrelerinin artırılması ısının etkisini, dolayısıyla beyaz tabakanın (ergimiş ve katılmış tabaka) kalınlığını arttırmaktadır. Artan parametreler ile, özellikle akım artışı ile beyaz tabaka büyük ölçüde artmıştır [187].



Şekil 7.50. K1 ve K3 numunesinin farklı parametreler ile işlenmiş bölge kesitlerine ait beyaz tabaka mikrofotografaları (Sağ üstte EDS analizi).

Şekil 7.51'de verilen işlenmiş K3 numunesine ait XRD desenlerinden de görülebileceği gibi, TiB_2 'nin pik yoğunluğu artarken Mg ve $MgZn_2$ 'nin pik yoğunlukları azalmıştır. Buradan da anlaşılmaktadır ki TKEEİ tekniği ile işlenirken yapıdaki Mg ve $MgZn_2$ 'nin erime ve kaynama sıcaklıkları TiB_2 'den düşük olduğu için daha önceden eriyip buharlaşarak yapıdan ayrılmışlardır. TKEEİ işleminden sonra yapıda TiB_2 pikleri daha belirgin hale gelmiştir. İşleme sırasında açığa çıkan yüksek ısı, Mg'nin oksidasyonuna neden olmuş ve işlenen numunelerde MgO pikinin oluşmasına yol açmıştır [145,146,193].



Şekil 7.51. K3 numunesinin a) işleme öncesi ve b) işleme sonrası (400µs, 16A) yüzeylerinin XRD analizleri.

7.7. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

7.7.1. AZ61 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ Sonrası İstatistiksel Analizleri

7.7.1.1. S/N Oranlarının Analizi

İşleme parametreleri ile YP (Ra) ve MRR değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. L18 dizisi için işleme parametreleri ve S/N oranları.

Deney No	Vurum süresi (µs)	Akım (A)	Malzeme	R _a (µm)	S/N oranı (for Ra)	MRR (mm ³)	S/N oranı (for MRR)
1	6	4	A1	15,85	-24,00	315,70	49,98
2	6	4	A2	8,75	-18,84	261,80	48,35
3	6	4	A3	8,32	-18,40	292,60	49,32
4	6	8	A1	16,19	-24,18	280,28	48,95
5	6	8	A2	10,12	-20,10	244,86	47,77
6	6	8	A3	8,87	-18,95	221,76	46,91
7	6	16	A1	17,99	-25,10	369,61	51,35
8	6	16	A2	10,23	-20,19	289,52	49,23
9	6	16	A3	10,10	-20,08	300,30	49,55
10	400	4	A1	20,53	-26,24	320,32	50,11
11	400	4	A2	18,37	-25,28	270,55	48,64
12	400	4	A3	17,92	-25,06	303,38	49,63
13	400	8	A1	21,43	-26,62	284,90	49,09
14	400	8	A2	19,19	-25,66	261,80	48,35
15	400	8	A3	17,86	-25,03	255,64	48,15
16	400	16	A1	24,46	-27,76	315,70	49,98
17	400	16	A2	19,46	-25,78	261,80	48,35
18	400	16	A3	18,43	-25,31	292,60	49,32

Kontrol faktörlerinin (vurum süresi, akım ve malzeme), YP üzerindeki etkileri Çizelge 7.5'te S/N yanıt çizelgesi ile analiz edilmiştir. Giriş faktörleri için delta değerlerinin S/N oranı değerlerinden hesaplandığı bilinmektedir. Delta, S/N oranlarının en yüksek ve en düşük değerleri arasındaki farkı gösterir. Bir faktörün en büyük delta değeri, o faktörün çıktılar (sonuçlar) üzerindeki etkisinin en büyük olduğunu göstermektedir. Bir faktörün en yüksek delta değeri 1. sıra (Rank 1) olarak belirlenmektedir [194,195]. En yüksek delta değeri (Rank 1) vurum süresi için hesaplanmıştır. Bu, vurum süresinin YP üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Çizelge 7.6). İkinci ve üçüncü önemli parametreler sırasıyla malzeme ve akımdır. Çizelge 7.6 ayrıca en iyi koşulun (minimum YP için) 6 µs'lik vurum süresi, 4A akım ve A3 malzemesi

olduğunu göstermektedir. S/N oranlarının MRR için yanıtı Çizelge 7.7'de verilmiştir. Malzeme, akım ve vurum süresi delta değerleri sırasıyla 1.46, 1.43 ve 0.02 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar MRR üzerindeki en etkili parametrenin malzeme olduğunu göstermektedir. İkinci ve üçüncü önemli faktörler ise sırasıyla akım ve vurum süresi olarak belirlenmiştir.

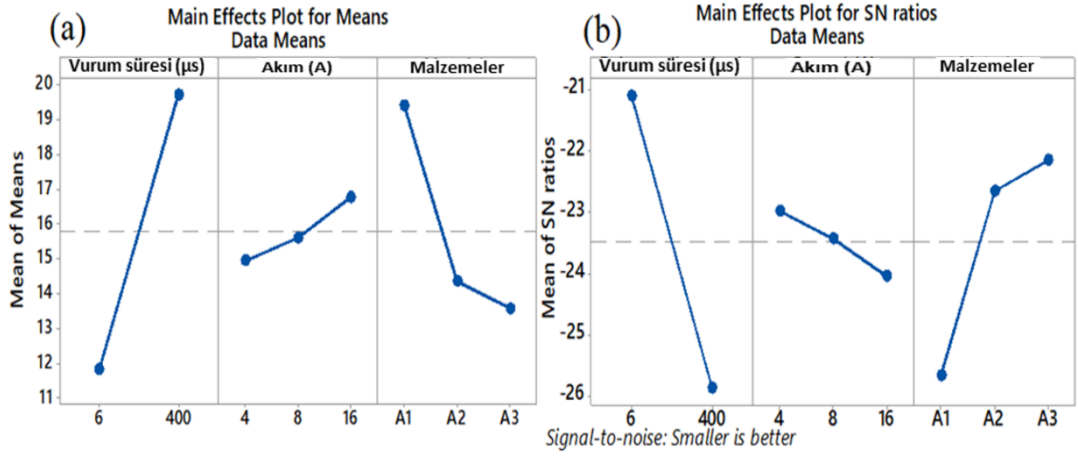
Çizelge 7.6. S/N oranlarının yanıtı (YP için).

Seviye	Vurum süresi (μ s)	Akım (A)	Malzeme
1	-21.10	-22.97	-25.65
2	-25.86	-23.43	-22.64
3	-	-24.04	-22.14
Delta	4.77	1.07	3.51
Rank	1	3	2

Çizelge 7.7. S/N oranlarının yanıtı (MRR için).

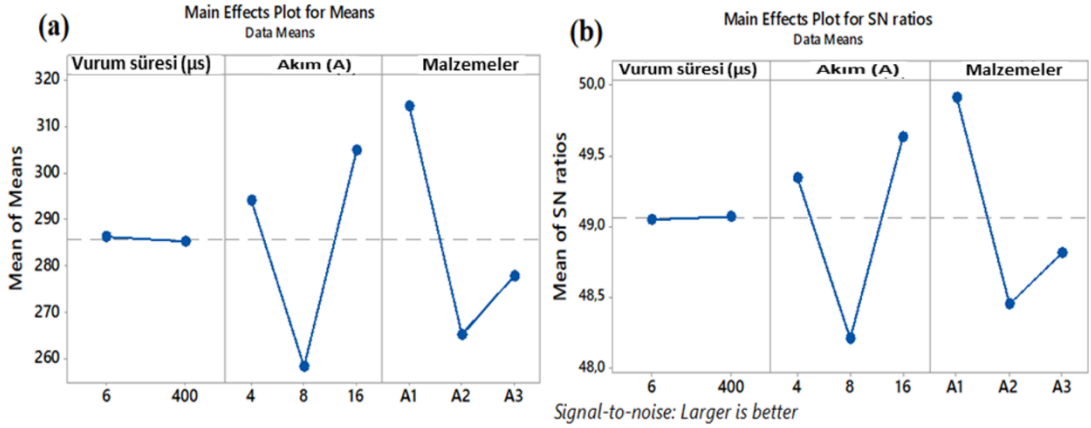
Seviye	Vurum süresi (μ s)	Akım (A)	Malzeme
1	49.05	49.34	49.91
2	49.07	48.21	48.46
3	-	49.63	48.82
Delta	0.02	1.43	1.46
Rank	3	2	1

Şekil 7.52, YP ortalama ve S/N oranları ana etki grafiklerini göstermektedir. Grafikler açıkça göstermektedir ki vurum süresi en etkili parametre iken, akım en az etkili parametredir. Şekil 7.52 (a)'dan, YP'nin vurum süresindeki artışla keskin bir şekilde arttığı ve artan akımla orta derecede yükseldiği görülebilir. YP'deki azalma A1'den A3'e geçiş olarak görülebilir. Taguchi optimizasyonu için optimum koşulun grafikte ilgili parametrenin en yüksek olduğu S/N oranında elde edildiği bildirilmektedir [89,152]. YP'yi en aza indirmek için A3 malzemesi, düşük vurum süresi ve akım parametre değerleri ile işlenmelidir. Bu şekilde en düşük YP ve en yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir.



Şekil 7.52. YP için ana etki grafikleri a) Ortalamalar ve b) S/N oranları

Şekil 7.53, MRR ortalama ve S/N oranları ana etki grafiklerini göstermektedir. Malzemenin MRR üzerindeki etkisi incelendiğinde ise farklı bir trend ortaya çıkmaktadır. A1'den A2'ye MRR azalırken, A2'den A3'e geçişte MRR artar. MEP grafikleri için, çizgi paralellikten X eksenine ne kadar uzaksa, bu faktörün etkisi o kadar büyük olur [31]. Bu bilgiler ışığında bu çalışma için MRR üzerinde en büyük etkiye malzeme faktörünün sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7.53. MRR için ana etki grafikleri a) Ortalamalar ve b) S/N oranları.

7.7.1.2. ANOVA Sonuçları

YP ve MRR üzerindeki kontrol faktörlerinin önemini bulmak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA çalışmaları %95 güven düzeyi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, vurum süresi, akım ve malzemelerin YP ve MRR üzerindeki katkı yüzdesini belirlemiştir. Yüzde katkısı, Denklem 3 [196] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X \text{ faktörünün katkısı (\%)} = (SS'_X/SS_T) \cdot 100 \quad (3)$$

$$\text{burada } SS'_X = SS_X - (V_e \cdot f_X)$$

burada SS'_X , X faktörünün karelerinin toplamıdır, SS_T tüm faktörlerin karelerinin toplamıdır, SS_X X faktörünün karelerinin toplamıdır, V_e hatanın varyansıdır ve f_X faktör X'in serbestlik derecesidir.

YP'nin ANOVA sonuçları Çizelge 7.6'da verilmiştir. ANOVA çalışmaları için, F değeri 4'ten büyükse, giriş faktörünün (vurum süresi, akım, malzeme) çıkış faktörünü (YP) önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. F değeri 4'ten küçük ise ilgili girdi önemsizdir ve ihmal edilebilir [197]. Çizelge 7.8, YP'nin %65,46'sına katkıda bulunan, baskın faktörün vurum süresinde olduğunu göstermektedir. Malzemeler ve mevcut katkılar sırasıyla %27,90 ve %2,37 idi. Girdi faktörlerinin etkileşimi incelendiğinde en önemli faktör %3,16'lık katkı ile vurum süresi ve malzeme üzerindeki etkileşimidir. Ancak vurum süresi-akım ve akım-malzeme üzerindeki etkileşimi istatistiksel olarak önemsizdir. ANOVA modelinin belirleme katsayısı %99,7 olarak bulunmuştur. İstatistiksel çalışmalar için modelin belirleme katsayısının (R^2) %90'ın üzerinde olması modelin başarısının çok yüksek olduğunu göstermektedir [152,158]. MRR'nin ANOVA sonuçları Çizelge 7.9'da verilmiştir. MRR'ye en yüksek katkıyı malzemelerin (%40,86) yaptığı, ardından akımın (%37,14) geldiği görülmektedir. Ancak vurum süresi (%0,03) MRR üzerinde en düşük katkıya sahiptir. Faktörlerin etkileşiminde en önemli faktör %10,02'lik katkı ile akım-vurum süresidir. MRR için modelin R^2 değeri %98.9 dur. Modelin performansının oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

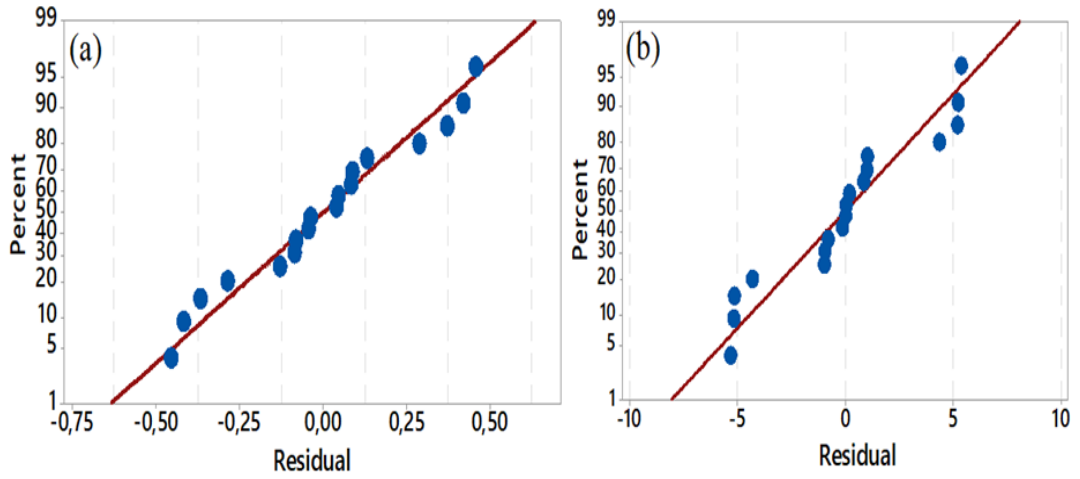
Çizelge 7.8. YP için ANOVA sonuçları.

Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vurum süresi (µs)	1	281,873	65,46	281,873	281,873	886,84	0,000
Akım (A)	2	10,221	2,37	10,221	5,110	16,08	0,012
Malzeme	2	120,153	27,90	120,153	60,077	189,02	0,000
Vurum süresi (µs)*Akım (A)	2	0,051	0,01	0,051	0,025	0,08	0,925
Vurum süresi (µs)*Malzemeler	2	13,601	3,16	13,601	6,801	21,40	0,007
Akım (A)*Malzemeler	4	3,443	0,80	3,443	0,861	2,71	0,179
Hata	4	1,271	0,30	1,271	0,318		
Toplam	17	430,613	100,00				
R-sq			99,7%				

Çizelge 7.9. MRR için ANOVA sonuçları.

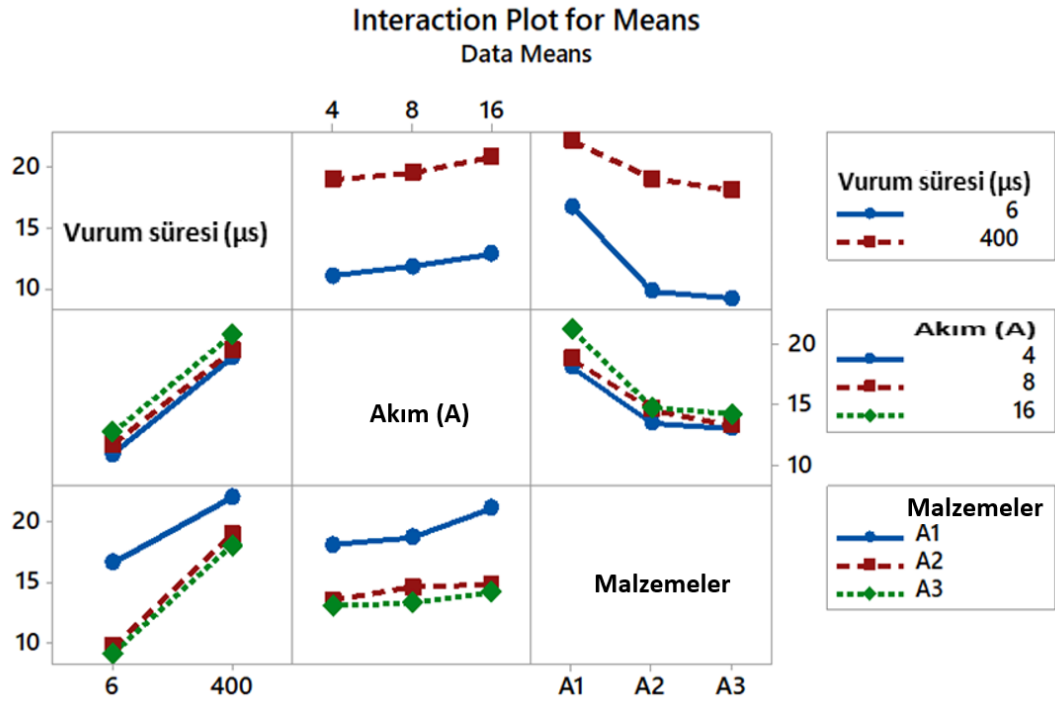
Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vurum süresi (µs)	1	5,3	0,03	5,27	5,27	0,10	0,766
Akım (A)	2	7171,3	37,14	7171,29	3585,65	69,28	0,001
Malzeme	2	7888,5	40,86	7888,46	3944,23	76,21	0,001
Vurum süresi (µs)*Akım (A)	2	1934,2	10,02	1934,17	967,09	18,69	0,009
Vurum süresi (ms)*Malzeme	2	555,7	2,88	555,66	277,83	5,37	0,074
Akım (A)*Malzeme	4	1546,1	8,01	1546,10	386,52	7,47	0,039
Hata	4	207,0	1,07	207,02	51,76		
Toplam	17	19308,0	100				
R-sq			98,9%				

Şekil 7.54, YP ve MRR için normal olasılık grafiklerini göstermektedir. Olasılık grafikleri, yanıtların (YP ve MRR) kalite özelliklerini kontrol etmek için kullanılır. ANOVA çalışmaları [194,198] ile ilgili parametreleri tahmin etmek için dağılım fonksiyonu dikkate alındığından, veri noktalarının dağılımı normal dağılıma dayalı olarak kanıtlanmıştır. Tüm yanıtların veri noktaları, hataların normal dağılımını gösteren düz bir çizgiyi takip etmektedir. Normal olasılık çizimleri de normal dağılımı doğrulamaktadır. Sonuç olarak, ANOVA modellerinin yüksek başarısı hem normal olasılık grafikleri ile hem de yüksek R^2 değerleri ile doğrulanmıştır.

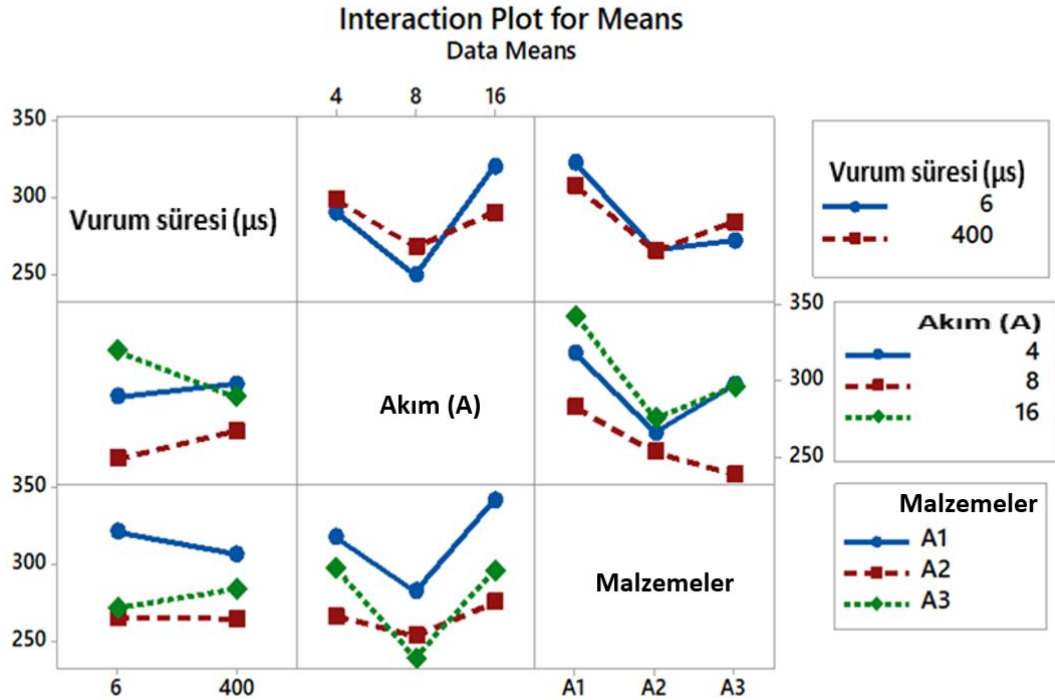


Şekil 7.54. a) YP ve b) MRR için normal olasılık grafikleri.

Şekil 7.55, YP'nin işlem parametreleri için etkileşim grafiklerini göstermektedir. Araştırmacıların sonuçları değerlendirmek için bu tür grafikleri kullandıkları rapor edilmiştir [81,152]. Etkileşim grafiklerinde, bir etkileşim grafiğinin çizgileri paralel değilse düşük etkileşim mevcuttur. Ayrıca, çizgilerin kesişimi, proses faktörleri [152,199] arasındaki sağlam etkileşimi temsil eder. Şekil 7.55, vurum süresi ve malzeme arasındaki önemli etkileşimi gösterirken, akım-malzeme ve vurum süresi-akım arasında düşük etkileşim olduğunu göstermiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere vurum süresinin YP'de en önemli faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 7.56, MRR parametrelerinin etkileşim grafiklerini temsil etmektedir. Akım ve vurum süresi arasında güçlü bir etkileşim olduğu görülmektedir. Akım-malzeme ve vurum süresi-malzeme arasında düşük etkileşimler kaydedilmiştir.

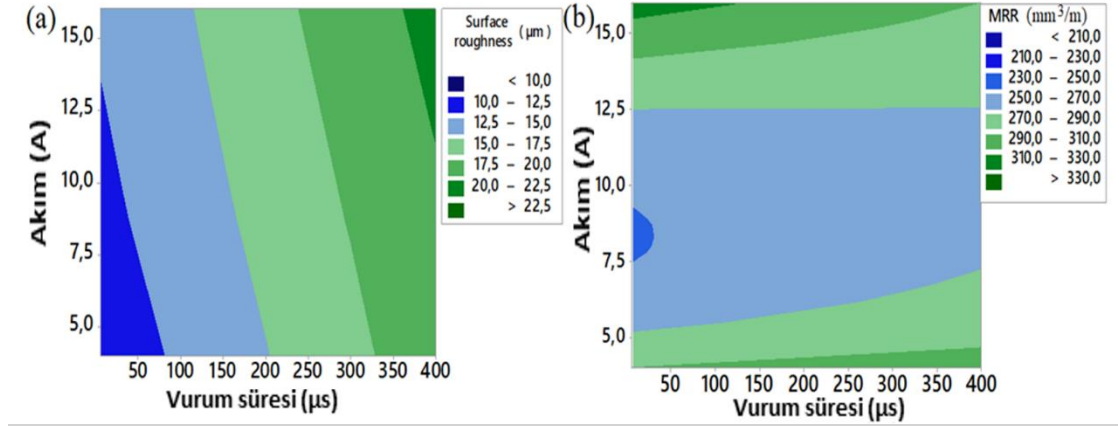


Şekil 7.55. Parametrelerin YP üzerindeki etkileşim grafiği.



Şekil 7.56. Parametrelerin MRR üzerindeki etkileşim grafiği.

YP ve MRR'nin harita grafikleri, akım-vurum süresine bağlı olarak Şekil 7.57'de verilmiştir. Şekil 7.57 (a), azalan akım ve vurum süresi ile YP'nin azaldığını göstermektedir. YP, 80 µs'den daha düşük vurum süresinde ve 13A'lık akımda minimum olur. Şekil 7.57 (b) için MRR, 16A'lık akımda ve 6 µs'lik vurum süresinde maksimumdur.



Şekil 7.57. (a) YP ve (b) MRR için harita grafikleri

7.7.1.3. Regresyon Denklemleri

Regresyon modelleri, gözlemlenen verilere doğrusal bir denklem oluşturarak bağımsız bir değişken ile bir yanıt değişkeni arasında ilişki verir. Regresyon denklemleri, vurum süresi ve akım gibi önemli parametreler ve bunların etkileşimleri arasında korelasyon oluşturur. Bu nedenle, istatistiksel çalışmalarda [200–202] regresyon modellerinin kullanımı çok önemlidir. Bu çalışmada, SR ve MRR'yi tahmin etmek için regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Vurum süresi, akım ve malzemeler bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Bağımlı değişkenler olarak SR ve MRR seçilmiştir.

A1;

$$YP = 14,203 + 0,01369 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) + 0,2561 \text{ Akım } (A) + 0,000019 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) * \text{ Akım } (A)$$

(4)

A2;

$$YP = 8,706 + 0,02344 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) + 0,0913 \text{ Akım } (A) + 0,000019 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) * \text{ Akım } (A)$$

(5)

A3;

$$YP = 8,082 + 0,0226 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) + 0,094 \text{ Akım } (A) + 0,000019 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) \\ * \text{ Akım } (A) \quad (6)$$

MRR değerlerini tahmin etmek için Denklemler 7-9 elde edilmiştir.

A1;

$$MRR = 381,5 + 0,0817 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) - 21,93 \text{ Akım } (A) + 1,234 \text{ Akım } (A)^2 \\ - 0,00904 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) \times \text{ Akım } (A) \quad (7)$$

A2:

$$MRR = 332,1 + 0,0817 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) - 21,93 \text{ Current } (A) + 1,234 \text{ Akım } (A)^2 \\ - 0,00904 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) \times \text{ Akım } (A) \quad (8)$$

A3:

$$MRR = 344,8 + 0,0817 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) - 21,93 \text{ Akım } (A) + 1,234 \text{ Akım } (A)^2 \\ - 0,00904 \text{ Vurum süresi } (\mu\text{s}) \times \text{ Akım } (A) \quad (9)$$

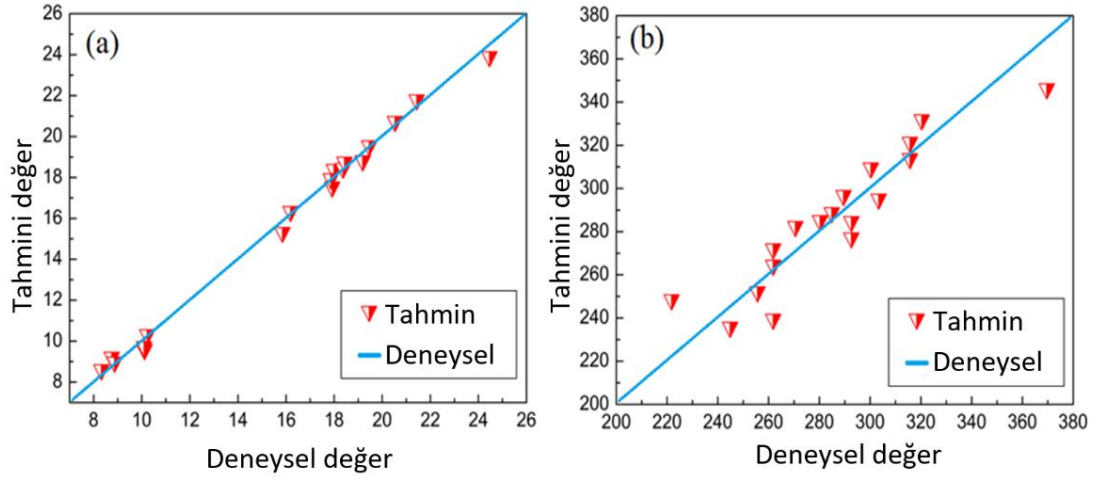
Regresyon modellerinin ve regresyon fonksiyonunun başarısını bulmak için doğruluk oranı belirleme katsayısı (R^2) hesaplanmıştır. Modelin R^2 değerinin 0 ile 1 arasında olduğu ve değerinin 1'e yakın olması gerektiği bilinmektedir [203]. R^2 değeri 0,8 ile 1 arasında ise modelin başarılı kabul edildiği de bildirilmektedir. R^2 denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [7,203].

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{P}_i)^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Burada e_i deneyseldir, p_i tahmin edilen değerdir, \bar{P}_i deneysel değerlerin ortalamasıdır ve n test sayısıdır.

Bu çalışma için regresyon modellerinin R^2 değeri YP ve MRR için sırasıyla 0,98 ve 0,85 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada oluşturulan modellerin başarılı olduğu ve tahmin için kullanılabilceği söylenebilir. Şekil 7.58, YP ve MRR için deneysel ve tahmin edilen sonuçları karşılaştırmaktadır. Modelin başarılı olabilmesi için veri noktalarının çapraz çizgiye yakın olması gerekmektedir. Tahmin edilen değerlerin

deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu görülebilir. Bununla birlikte, MRR için modelin hata aralığı, YP'nin regresyon modelinden daha yüksektir.



Şekil 7.58. Deneysel ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması a) YP ve b) MRR.

7.7.2. ZK60 Matrisli Kompozitlerin TKEEİ Sonrası İstatistiksel Analizleri

7.7.2.1. S/N Oranlarının Analizi

L18 dizisi verileri, işleme parametreleri ve S/N oranı ile birlikte Çizelge 7.10'da verilmektedir.

Çizelge 7.10. L18 dizisi, işleme parametreleri ve S/N oranı.

Exp. No.	Vurum süresi (µs)	Akım (A)	Malzeme	Ra (µm)	S/N oranı (for Ra)	MRR (mm ³ /min)	S/N oranı (for MRR)
1	6	4	K1	5,30	-14,4855	326,48	50,2771
2	6	4	K2	6,57	-16,3513	177,1	44,9644
3	6	4	K3	6,76	-16,5989	315,7	49,9855
4	6	8	K1	11,01	-20,8357	315,7	49,9855
5	6	8	K2	7,93	-17,9855	192,5	45,6886
6	6	8	K3	7,48	-17,4780	315,78	49,9877
7	6	16	K1	7,71	-17,7411	335,72	50,5195
8	6	16	K2	7,42	-17,4081	348,04	50,8326
9	6	16	K3	7,09	-17,0129	237,16	47,5008
10	400	4	K1	12,46	-21,9104	346,5	50,7941
11	400	4	K2	15,25	-23,6654	269,5	48,6112
12	400	4	K3	14,98	-23,5102	323,4	50,1948
13	400	8	K1	14,65	-23,3168	406,56	52,1825
14	400	8	K2	15,11	-23,5853	374,22	51,4625
15	400	8	K3	15,11	-23,5853	326,48	50,2771
16	400	16	K1	17,98	-25,0958	369,6	51,3546
17	400	16	K2	13,96	-22,8977	354,2	50,9850
18	400	16	K3	14,96	-23,4986	283,36	49,0468

Malzeme, vurum süresi ve akım parametrelerinin YP ve MRR üzerindeki etkisi incelenmiştir. YP için S/N oranlarının yanıtı Çizelge 7.11'de verilmiştir. Çıktıyı etkileyen parametrelerin kombinasyonu (pürüzlülük ve MRR), en yüksek S/N oranına sahipse istatistiksel analiz için en iyi sonuçları verdiği bilinmektedir. En önemli etkiye sahip parametre, S/N oranlarının ortalama farkı en önemli olduğunda geçerlidir [81] Delta, maksimum ve minimum S/N oranları arasındaki farkı vermektedir. Bir faktörün yüksek delta değeri, çıktı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu gösterir [204]. Çizelge 7.11'e göre, en yüksek delta değeri (6.13) vurum süresi için elde edilmiştir. Bu, vurum süresinin YP üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Akım ve malzemenin etkisi sırasıyla 2. ve 3. olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.12'ye göre

delta oranı en yüksek olan malzeme (2.09) parametresi MRR üzerinde en anlamlı etkiye sahiptir. Vurum süresi ve akımın önem sırası ise sırasıyla 2 ve 3'tür.

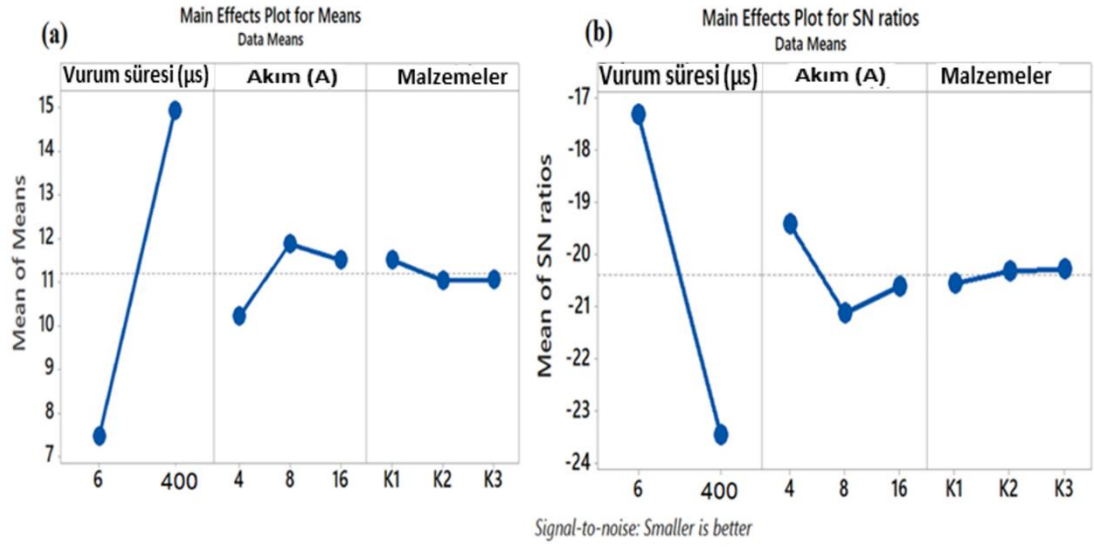
Çizelge 7.11. S/N oranları için yanıt (YP için).

Seviye	Vurum süresi (μ s)	Akım (A)	Malzeme
1	-17,32	-19,42	-20,56
2	-23,45	-21,13	-20,32
3	-	-20,61	-20,28
Delta	6,13	1,71	0,28
Rank	1	2	3

Çizelge 7.12. S/N oranları için yanıt (MRR için).

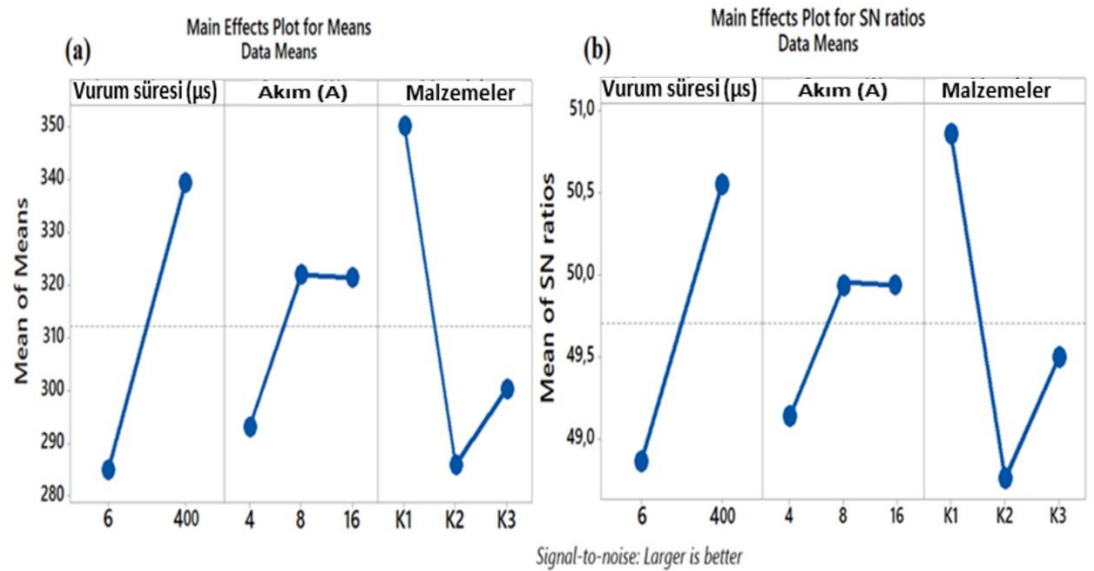
Seviye	Vurum süresi (μ s)	Akım (A)	Malzeme
1	48,86	49,14	50,85
2	50,55	49,93	48,76
3	-	50,04	49,50
Delta	1,69	0,90	2,09
Rank	2	3	1

Şekil 7.59, YP ortalama ve S/N oranları ana etki grafiklerini (MEP) göstermektedir. Doğrular X eksenine ne kadar dik olursa, karşılık gelen parametrenin en yüksek katkıya sahip olduğu bilinmektedir [158,205]. YP üzerinde en yüksek etkiye vurum süresinin sahip olduğu görülmektedir (Şekil 7.59 (a)). Artan vurum süresi ile YP'nin arttığı da anlaşılmaktadır. En iyi YP değeri; 6 μ s vurum süresi, 4 A akım ve K3 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 7.59 (b)'de, en yüksek S/N oranı minimum YP'yi ve maksimum yüzey kalitesini göstermektedir. Daha düşük YP ve iyi yüzey kalitesi elde etmek için en uygun parametrelerin 6 μ s vurum süresi, 4 A akım ve K3 numunesi olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 7.59. a) YP ve b) S/N oranları için ana etki grafikleri.

Şekil 7.60, MRR ortalama ve S/N oranları için ana etki grafiklerini göstermektedir. MRR üzerinde en yüksek etkiye malzeme faktörünün sahip olduğu görülmektedir. Bir istisna (16A-Akım) dışında, artan vurum süresi ve akım ile MRR'nin arttığı da görülebilmektedir. Şekil 7.60 (b)'de, maksimum MRR için en iyi parametrelerin 400 µs vurum süresi, 8A akım ve K1 numunesi olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 7.60. a) MRR ve b) S/N oranları için ana etki grafikleri.

7.7.2.2. ANOVA Sonuçları

YP için ANOVA sonuçları Çizelge 7.13'te verilmiştir. Vurum süresi, akım ve malzeme katkısı sırasıyla %87,58, %3,2 ve %0,3 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan, YP üzerinde en yüksek etkiye vurum süresinin sahip olduğu söylenebilmektedir. Bununla birlikte, malzeme içeriğinin YP üzerinde çok az etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Etkileşimlerin katkıları incelendiğinde akım ve malzemeler arasındaki etkileşim en yüksek etkiye (%4,42) sahiptir.

Çizelge 7.13. YP için ANOVA sonuçları.

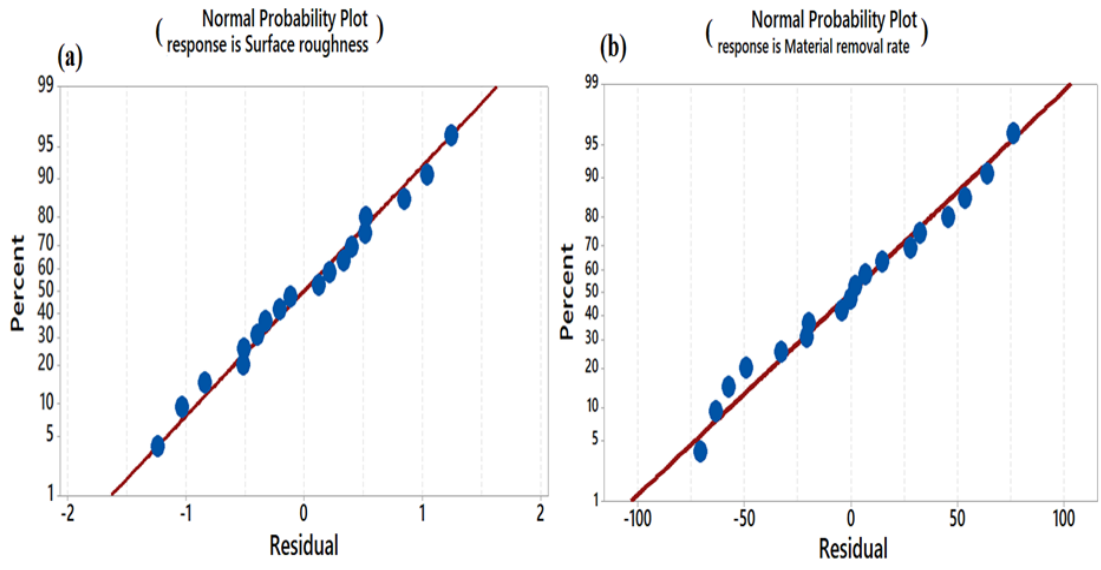
Source	D F	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vurum süresi (μ s)	1	250.80	87.58	250.8	250.80	119.83	0.000
Akım (A)	2	9.16	3.20	9.16	4.58	2.19	0.228
Malzemeler	2	0.87	0.3	0.87	0.43	0.21	0.820
Vurum süresi (μ s) x Akım (A)	2	3.92	1.37	3.92	1.96	0.94	0.463
Vurum süresi (μ s) x Malzemeler	2	0.58	0.20	0.58	0.29	0.14	0.874
Akım (A) x Malzemeler	4	12.64	4.42	12.64	3.16	1.51	0.350
Hata	4	8.37	2.92	8.37	2.09		
Toplam	17	286.38	100.00%				

MRR için ANOVA sonuçları Çizelge 7.14'te verilmiştir. Sonuçlara göre, MRR değerlerinde malzemenin ve vurum süresinin önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Malzeme ve vurum süresinin katkı yüzdesi sırasıyla %21,85 ve %21,39 olarak hesaplanmıştır. Akım, bireysel faktörlere kıyasla MRR'de en önemsiz faktördür. Akım ve malzeme arasındaki etkileşim, diğer etkileşimlere kıyasla MRR üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 7.14. MRR için ANOVA sonuçları.

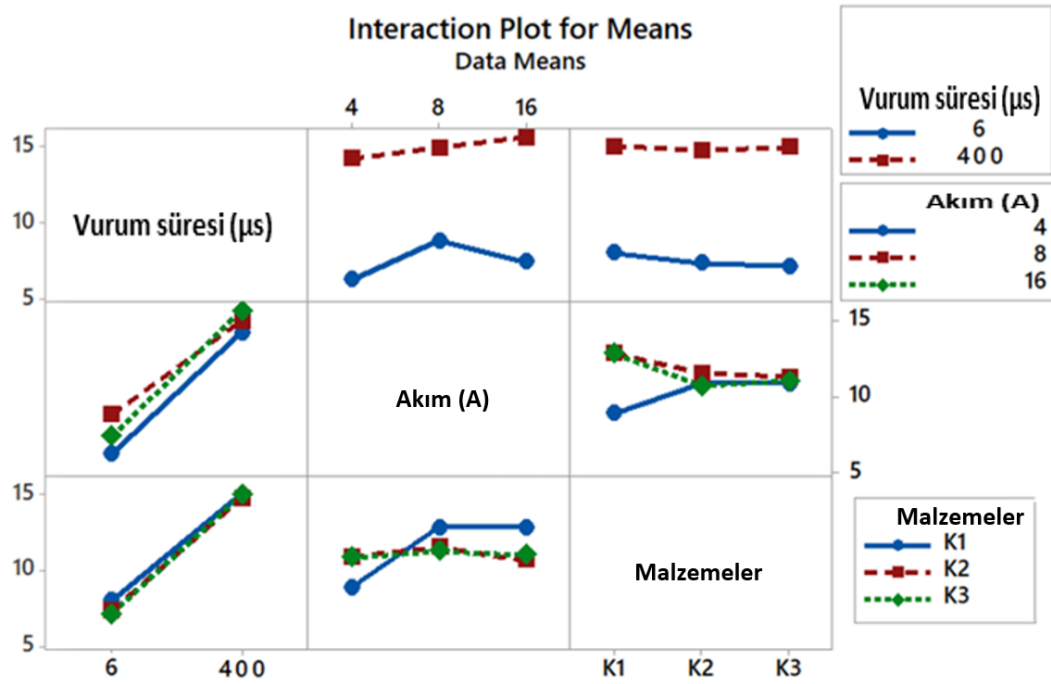
Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Vurum süresi (μ s)	1	13319	21.39	13319	13319	9.07	0.039
Akım (A)	2	3249	5.22	3249	1625	1.11	0.415
Malzemeler	2	13605	21.85	13605	6802	4.63	0.091
Vurum süresi (μ s) x Akım (A)	2	3700	5.94	3700	1850	1.26	0.376
Vurum süresi (μ s) x Malzemeler	2	3962	6.36	3962	1981	1.35	0.357
Akım(A) x Malzemeler	4	18551	29.80	18551	4638	3.16	0.146
Hata	4	5875	9.44	5875	1469		
Toplam	17	62260	100				

Şekil 7.61, YP ve MRR için normal olasılık grafiklerini göstermektedir. Bu grafiğin modelin yeterliliğini kanıtlamak için kullanıldığı bildirilmektedir. Veri noktaları, düz bir çizgi izliyorsa, model başarılı olarak kabul edilebilir [89]. Şekil 7.61 (a)'dan, noktaların çapraz çizgiye çok yakın olduğu açıkça görülebilmektedir. Şekil 7.61 (b)'deki noktalar yer yer diyagonal çizgiden ayrılrsa da genel olarak çok yakın oldukları görülmektedir. Bunlar, YP ve MRR için ANOVA modelinin yüksek doğruluğunun sonuçlarıdır. Bu grafikler Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14'teki R^2 değerleri ile uyumludur. ANOVA modellerinin YP ve MRR için R^2 değerleri sırasıyla %97,08 ve %90,56 olarak bulunmuştur. Yüksek R^2 , modelin yeterliliğini gösteren bir diğer kritik parametredir.

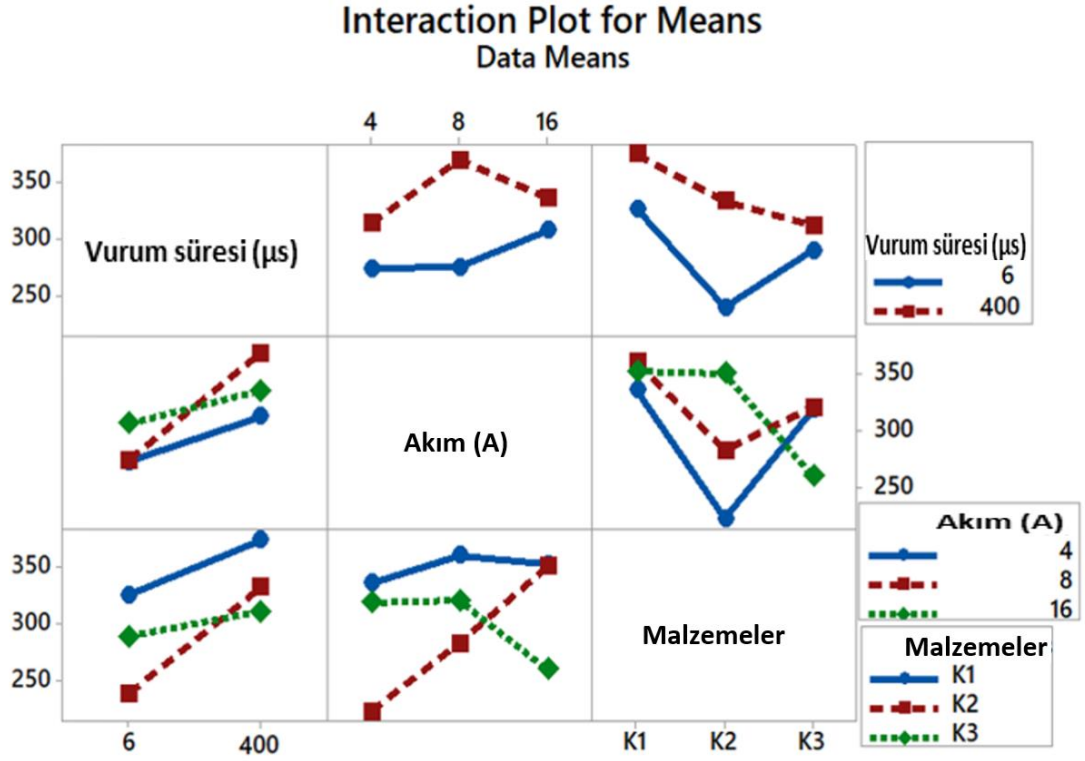


Şekil 7.61. a) YP ve b) MRR için normal olasılık grafikleri.

Şekil 7.62, YP üzerindeki parametrelerin etkileşim grafiklerini göstermektedir. Etkileşim grafiklerinde, etkileşim grafiğinin çizgileri paralel değilse çok az etkileşim oluşmaktadır. Ayrıca çizgilerin kesişimi parametreler arasındaki güçlü etkileşimi göstermektedir [202,206] . Şekil 7.62, akım ve malzemeler arasındaki güçlü etkileşimi gösterirken, vuruş süresi ve akım arasında orta düzeyde bir etkileşim elde edilmiştir. Şekil 7.63, MRR üzerindeki parametrelerin etkileşim grafiklerini göstermektedir. Akım ve malzeme arasında güçlü bir etkileşim gözlenmiştir.

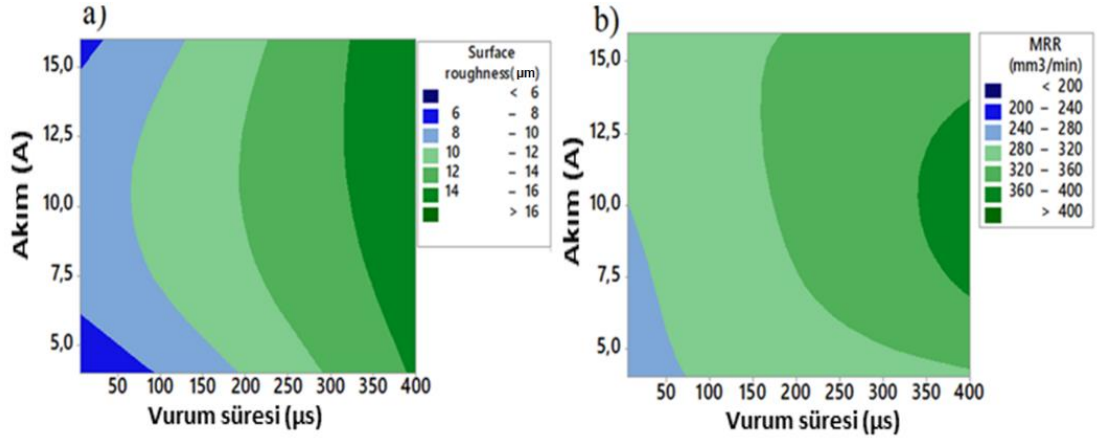


Şekil 7.62. Parametrelerin YP üzerindeki etkileşim grafiği.



Şekil 7.63. Parametrelerin MRR üzerindeki etkileşim grafiği.

Şekil 7.64, akım ve vurum süresine bağlı olarak YP ve MRR için harita grafiklerini göstermektedir. Mavi ve yeşil renkler, grafikler için düşük ve yüksek değerleri temsil etmektedir. Artan vurum süresi ile YP'nin arttığı görülmektedir (Şekil 7.64 (a)). Akım en düşük ve en yüksek değerlere sahip olduğunda (en düşük vurum süresi için) YP düşüktür. Şekil 7.64 (b)'de, en düşük MRR, vurum ve akım minimum olduğunda elde edilmiştir. Maksimum MRR, 10 A Akım ve 400 µs vurum süresi için elde edilmiştir.



Şekil 7.64. (a) YP ve (b) MRR için harita grafikleri.

7.7.2.3. Regresyon Denklemleri

YP'yi ve MRR'yi tahmin etmek için regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Vurum süresi, akım ve malzemeler bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Bağımlı değişkenler olarak YP ve MRR seçilmiştir. YP değerlerini tahmin etmek için 4-6 denklemleri elde edilmiştir.

Malzemeler

$$K1: YP(\mu m) = 5,50 + 0,01660 \text{ Vurum süresi } (\mu s) + 0,257 \text{ Akım (A)} + 0,000132 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım (A)} \quad (4)$$

$$K2: YP(\mu m) = 7,73 + 0,01772 \text{ Vurum süresi } (\mu s) - 0,057 \text{ Akım (A)} + 0,000132 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım (A)} \quad (5)$$

$$K3: YP(\mu m) = 7,18 + 0,01884 \text{ Vurum süresi } (\mu s) - 0,020 \text{ Akım (A)} + 0,000132 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım (A)} \quad (6)$$

MRR değerlerini tahmin etmek için 7-9 denklemleri elde edilmiştir.

Malzemeler

$$K1: MRR (\text{mm}^3/\text{min}) = 306,3 + 0,169 \text{ Vurum süresi } (\mu s) + 2,02 \text{ Akım(A)} - 0,00502 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım(A)} \quad (7)$$

$$K2: MRR (\text{mm}^3/\text{min}) = 131,8 + 0,284 \text{ Vurum süresi } (\mu s) + 11,36 \text{ Akım(A)} - 0,00502 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım(A)} \quad (8)$$

$$K3: MRR (\text{mm}^3/\text{min}) = 329,4 + 0,102 \text{ Vurum süresi } (\mu s) - 4,30 \text{ Akım(A)} - 0,00502 \text{ Vurum süresi } (\mu s) * \text{Akım(A)} \quad (9)$$

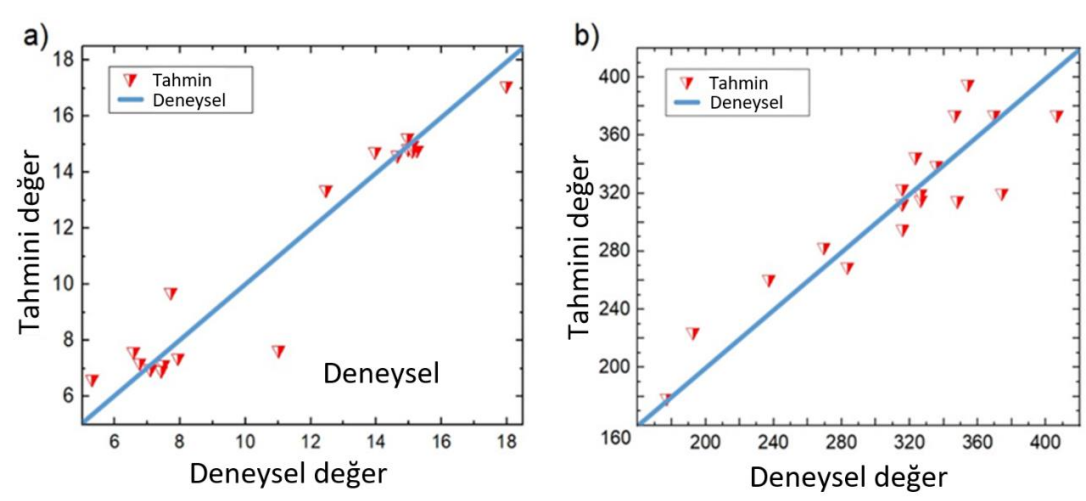
Regresyon denklemlerinin performansını değerlendirmek için belirleme katsayısı (R^2) kullanılmıştır. R^2 , Denklem 10 [89,204] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{P}_i)^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Burada e_i deneyseldir, p_i tahmin edilen değerdir, \bar{P}_i deneysel değerlerin ortalamasıdır ve n test sayısıdır.

R^2 değerinin 0 ile 1 arasında olduğu ve modelin başarılı olabilmesi için 1'e yakın olması gerektiği bildirilmektedir [203]. Başarılı bir regresyon denklemi için R^2 değerinin 0,8 ile 1 arasında olması gerektiği de belirtilmiştir [164]. Bu çalışma için, regresyon modellerinin R^2 değeri, YP ve MRR için sırasıyla 0,92 ve 0,83 olarak hesaplanmıştır. Regresyon modelleri bu çalışma için başarılı kabul edilebilmektedir.

Şekil 7.65, YP ve MRR için deneysel ve tahmin edilen değerleri karşılaştırmaktadır. Regresyon modeli tarafından tahmin edilen YP değerleri, 7 ve 11 numaralı deneyler dışında (Şekil 7.65 (a) için) deneysel değerlerle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7.65 (b)'de deneysel ve tahmin edilen MRR değerleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Modelin R^2 değerleri dikkate alındığında, regresyon modelinin YP tahmininin doğruluğu MRR tahmininden daha yüksektir.



Şekil 7.65. Deneysel ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması a) YP ve b) MRR.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Toz metalürjisi ile AZ61 ve ZK60 alaşımı ile, AZ61/15 TiB₂, AZ61/15 TiB₂+0.5 GNP, ZK60/15 TiB₂ ve ZK60/15 TiB₂+0.5 GNP kompozitleri üretilmiştir. Üretilen numuneler mikro yapı, yoğunluk, sertlik, basma ve tribolojik davranışlarına odaklanılarak incelenmiştir. Baskın hata mekanizmalarını ortaya çıkarmak için aşınmış ve kırık yüzey incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca işlenebilirlik kabiliyetini araştırmak için farklı akım ve vurum süresi koşulları altında toz katkılı elektro dalma erazyon yöntemi ile işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. İşleme testleri sonrası elde edilen geometri, görüntü ve yüzey kalitesi detaylı olarak incelenmiş ve beyaz tabaka tanımlanmaya çalışılmıştır. TKEEİ ile işleme sonrası veri analizi, makinenin parametrelerini etkileyen işleme deneysel sonuçları kullanılarak optimizasyon çalışması ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ANOVA, Taguchi ve regresyon analizlerinden yararlanılmıştır. Yapılan kapsamlı analiz, ölçüm ve değerlendirmeler sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Mikroyapı karakterizasyonu, GNP'ler dışında takviye parçacıklarının homojen bir dağılımını göstermiştir.
2. AZ61-ZK60 matrisli kompozitlerde %15 TiB₂ ve %15 TiB₂-0.5GNP takviyeleri için sertlik artışı sırasıyla %38.65-%13.9 ve %25.44-%7.6'dır. Sertlikteki artış, yerel matris deformasyonlarını önleyen takviyelerle ilişkilendirilmiştir.
3. Genel olarak en iyi aşınma direncini TiB₂ katkılı numune sağlarken, en kötü aşınma direncini orijinal alaşımlar göstermiştir.

4. Düşük yük altında abrasif aşınma, yüksek yük altında ise delaminasyon ve abrasif aşınma mevcuttur. Kompozit malzemelerin takviyesiz alaşıma göre daha düzgün ve hasarsız alanlara sahip olduğu görülmüştür.
5. AZ61 matrisli numuneler arasında, oda ve yüksek sıcaklıklar için basma dayanım değerleri en yüksekten düşüğe sırasıyla; A2, A3 ve A1 numunelerinde elde edilmiştir. ZK60 matrisli numuneler arasında ise, oda sıcaklığında basma dayanım değerleri en yüksekten düşüğe sırasıyla; K2, K3 ve K1 numunelerinde elde edilmiştir.
6. İşlenmiş yüzey incelemelerinde, numunelerde değişen oranlarda kraterler, küçük çatlaklar, döküntüler, üst üste binen metaller ve kimyasal bileşimde değişiklikler gözlemlendi. Alaşım numunesinde (A1) krater görünümleri, kompozit numunelere (A2, A3) göre daha yüksektir.
7. AZ61 alaşımı ile üretilen numunelerde en iyi yüzey kaliteleri en düşük değerlerde, 4 A akımda ve 6 µs vurum süresi elde edilmiştir. En yüksek MRR ise, vurum süresi minimum ve akım maksimum olduğunda elde edilmiştir.
8. TiB₂ parçacıklarından yük transferi, mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkıda bulunan birincil mekanizma olarak tanımlanmıştır.
9. Ayrıca, ANOVA sonuçlarında, AZ61 matrisli malzemelerde YP'ye 65.46% ile vurum süresi en yüksek katkıyı sağlarken, ZK60 matrisli malzemelerde YP'ye %87,58 ile yine vurum süresi en yüksek katkıyı sağlamıştır. MRR'ye AZ61 matrisli malzemelerde %45,79 ile en yüksek katkıyı malzeme çeşidinin yaptığı tespit edilirken, ZK60 matrisli malzemelerde 21.85% ile vurum süresi en yüksek katkıyı yapmıştır. Regresyon modellerinde, YP ve MRR'nin tahmini için belirleme (güvenilirlik) katsayısı sırasıyla AZ61 için 0,98-0,85 iken, ZK60 için 0.92 ve 0,83 olarak belirlenmiştir.

10. Sonuç olarak, EEİ işleme deneysel ve optimizasyon (ANOVA, TAGUCHI ve regresyon analizi) verileri uyumludur. Genel olarak artan EEİ akımı ve süresi, beyaz tabaka kalınlığını, YP'yi ve MRR'yi arttırmıştır.

KAYNAKLAR

1. Dey, A. and Pandey, K. M., "Magnesium metal matrix composites-a review", *Reviews On Advanced Materials Science*, 42 (1): 58–67 (2015).
2. Zhang, X., Chen, Y., and Hu, J., "Recent advances in the development of aerospace materials", *Progress In Aerospace Sciences*, 97: 22–34 (2018).
3. Srinivasan, V., Kunjiappan, S., and Palanisamy, P., "A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications", *International Nano Letters* 2021 11:4, 11 (4): 321–345 (2021).
4. Hirsch, J. and Al-Samman, T., "Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications", *Acta Materialia*, 61 (3): 818–843 (2013).
5. Rade, P., Tambe, S., Chaudhari, P., and Patil, R., "A Review on Escalation of Bike Chassis", *International Journal Of Mechanics And Design*, 8 (1): 1–7 (2022).
6. Tipan, N., Pandey, A., and Mishra, P., "Selection and preparation strategies of Mg-alloys and other biodegradable materials for orthopaedic applications: A review", *Materials Today Communications*, 31: 103658 (2022).
7. AYDIN, F. and DURGUT, R., "Estimation of wear performance of AZ91 alloy under dry sliding conditions using machine learning methods", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 31 (1): 125–137 (2021).
8. Tosun, G. and Kurt, M., "The porosity, microstructure, and hardness of Al-Mg composites reinforced with micro particle SiC/Al₂O₃ produced using powder metallurgy", *Composites Part B: Engineering*, 174: 106965 (2019).
9. Subramani, M., Tzeng, Y. C., Tseng, L. W., Tsai, Y. K., Chen, G. S., Chung, C. Y., and Huang, S. J., "Hot deformation behavior and processing map of AZ61/SiC composites", *Materials Today Communications*, 29: 102861 (2021).
10. Ponhan, K., Tassenberg, K., Weston, D., Nicholls, K. G. M., and Thornton, R., "Effect of SiC nanoparticle content and milling time on the microstructural

- characteristics and properties of Mg-SiC nanocomposites synthesized with powder metallurgy incorporating high-energy ball milling", *Ceramics International*, 46 (17): 26956–26969 (2020).
11. Aydin, F., Sun, Y., Ahlatci, H., and Turen, Y., "Investigation of Microstructure, Mechanical and Wear Behaviour of B4C Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composites by Powder Metallurgy", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 71 (4): 873–882 (2018).
 12. Guleryuz, F., Uzunsoy, D., and Ipek, R., "Dry sliding wear behavior of Al-B4C particulate reinforced composites produced by powder metallurgy method", *SAE Technical Papers*, 2: (2013).
 13. Aydin, F., Sun, Y., and Emre Turan, M., "Influence of TiC content on mechanical, wear and corrosion properties of hot-pressed AZ91/TiC composites:", *Journal Of Composite Materials*, 54 (2): 141–152 (2020).
 14. Xiu, K., Wang, H. Y., Sui, H. L., Wang, Y., Xu, C. L., Wang, J. G., and Jiang, Q. C., "The sliding wear behavior of TiCp/AZ91 magnesium matrix composites", *Journal Of Materials Science*, 41 (21): 7052–7058 (2006).
 15. Kumar, S. D., Ravichandran, M., Meignanamoorthy, M., Sakthivelu, S., Alagarsamy, S. v., and Chanakyan, C., "Investigations on properties of Mg-Al₂O₃ composites fabricated via stir casting route", *Materials Today: Proceedings*, 27: 1132–1136 (2020).
 16. Aydin, F. and Turan, M. E., "The Effect of Boron Nitride on Tribological Behavior of Mg Matrix Composite at Room and Elevated Temperatures", *Journal Of Tribology*, 142 (1): (2020).
 17. Aydin, F. and Sun, Y., "Investigation of wear behaviour and microstructure of hot-pressed TiB₂ particulate-reinforced magnesium matrix composites", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57 (4): 455–469 (2018).
 18. Zhou, H., Zhang, C., Han, B., Qiu, J., Qin, S., Gao, K., Liu, J., Sun, S., and Zhang, H., "Microstructures and Mechanical Properties of Nanocrystalline AZ31 Magnesium Alloy Powders with Submicron TiB₂ Additions Prepared by Mechanical Milling", *Crystals 2020, Vol. 10, Page 550*, 10 (6): 550 (2020).
 19. Khani, M., Ebrahimi, G., and Ezatpour, H., "Accumulative extrusion bonding of Mg-Mn-Ca/FA+GNP hybrid biocomposite: On microstructure evaluation,

- mechanical and corrosion properties", *Materials Today Communications*, 33: 104426 (2022).
20. Soni, S. K., Thomas, B., and Kar, V. R., "A Comprehensive Review on CNTs and CNT-Reinforced Composites: Syntheses, Characteristics and Applications", *Materials Today Communications*, 25: 101546 (2020).
 21. Wang, H. Y., Jiang, Q. C., Zhao, Y. Q., Zhao, F., Ma, B. X., and Wang, Y., "Fabrication of TiB₂ and TiB₂-TiC particulates reinforced magnesium matrix composites", *Materials Science And Engineering: A*, 372 (1-2): 109-114 (2004).
 22. Cui, K. and Li, Y., "Fabrication, mechanical properties and thermal shock resistance of laminated TiB₂-based ceramic", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 54: 148-153 (2016).
 23. Wang, H. Y., Jiang, Q. C., Wang, Y., Ma, B. X., and Zhao, F., "Fabrication of TiB₂ particulate reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy", *Materials Letters*, 58 (27-28): 3509-3513 (2004).
 24. Xiao, P., Gao, Y., Yang, C., Liu, Z., Li, Y., and Xu, F., "Microstructure, mechanical properties and strengthening mechanisms of Mg matrix composites reinforced with in situ nanosized TiB₂ particles", *Materials Science And Engineering: A*, 710: 251-259 (2018).
 25. Sun, Y., Cevik, E., Turen, Y., Ahlatci, H., Turan, M. E., Aydin, F., and Zengin, H., "Influence of GNPs and B₄C reinforcements on mechanical, thermal and wear properties of magnesium matrix composite produced by powder metallurgy:", <https://doi.org/10.1177/00219983211031641>, 55 (26): 3881-3891 (2021).
 26. Erdil, M. and Aydın, F., "Influence of graphene particles on the wear and corrosion performance of MAO produced AZ31 alloy", *Fullerenes Nanotubes And Carbon Nanostructures*, 29 (12): 998-1008 (2021).
 27. Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: Role of graphene nanoplatelets", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 19 (1): 463-469 (2016).

28. Jawahar, M., Sridhar Reddy, C., and Srinivas, C., "A review of performance optimization and current research in PMEDM", *Materials Today: Proceedings*, 19: 742–747 (2019).
29. Long, B. T., Phan, N. H., Cuong, N., and Jatti, V. S., "Optimization of PMEDM process parameter for maximizing material removal rate by Taguchi's method", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology 2016* 87:5, 87 (5): 1929–1939 (2016).
30. Jabbaripour, B., Sadeghi, M. H., Shabgard, M. R., and Faraji, H., "Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic", *Journal Of Manufacturing Processes*, 15 (1): 56–68 (2013).
31. Sathish, T., Mohanavel, V., Ansari, K., Saravanan, R., Karthick, A., Afzal, A., Alamri, S., and Ahamed Saleel, C., "Synthesis and Characterization of Mechanical Properties and Wire Cut EDM Process Parameters Analysis in AZ61 Magnesium Alloy + B₄C + SiC", *Materials 2021, Vol. 14, Page 3689*, 14 (13): 3689 (2021).
32. Anuraag, G. P. and Vijay Kumar Reddy, M., "Studies on the material removal rate of Al-SiC composites machined by powder-mixed EDM technique", *International Journal Of Engineering And Technology*, 8 (2): 829–836 (2016).
33. Roy, C., Syed, K. H., and Kuppan, P., "Machinability of Al/ 10%SiC/ 2.5%TiB₂ Metal Matrix Composite with Powder-mixed Electrical Discharge Machning", *Procedia Technology*, 25: 1056–1063 (2016).
34. Maniyar, K. G. and Ingole, D. S., "Investigation of EDM Process parameters for Hybrid Metal Matrix Composites", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 377 (1): (2018).
35. Tipan, N., Pandey, A., and Mishra, P., "Selection and preparation strategies of Mg-alloys and other biodegradable materials for orthopaedic applications: A review", *Materials Today Communications*, 31: 103658 (2022).
36. Jahan, M. P., Rahman, M., and Wong, Y. S., "Study on the nano-powder-mixed sinking and milling micro-EDM of WC-Co", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology 2010* 53:1, 53 (1): 167–180 (2010).

37. Talla, G., Sahoo, D. K., Gangopadhyay, S., and Biswas, C. K., "Modeling and multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining process of aluminum/alumina metal matrix composite", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 18 (3): 369–373 (2015).
38. Kumar, P. and Parkash, R., "Experimental investigation and optimization of EDM process parameters for machining of aluminum boron carbide (Al–B₄C) composite", [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10910344.2016.1168931](http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1168931), 20 (2): 330–348 (2016).
39. Tripathy, S. and Tripathy, D. K., "Surface Characterization and Multi-response optimization of EDM process parameters using powder mixed dielectric", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 2058–2067 (2017).
40. Gupta, A., Kumar, H., Nagdeve, L., and Arora, P. K., "EDM parametric study of composite materials: A review", *Evergreen*, 7 (4): 519–529 (2020).
41. Kumar Choudhary B, S. G., Kumar Choudhary, S., and Jadoun, R., "Review on Machining of Inconel Based Super Alloys by Electro Discharge Machining Process ", (2019).
42. Garg, R. K., Singh, K. K., Sachdeva, A., Sharma, V. S., Ojha, K., and Singh, S., "Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (5–8): 611–624 (2010).
43. Marinho, B., Ghislandi, M., Tkalya, E., Koning, C. E., and de With, G., "Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder", *Powder Technology*, 221: 351–358 (2012).
44. Pekguleryuz, M. O., Kainer, K., & Kaya, A. (Eds.). (2013). *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Elsevier.
45. Gupta, M., & Ling, S. N. M. (2011). *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. *John Wiley & Sons*.
46. Friedrich, H. and Schumann, S., "Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry", *Journal Of Materials Processing Technology*, 117 (3): 276–281 (2001).

47. Demir, B. and Durgutlu, A., "An investigation of tig welding of az31 magnesium alloy sheets", *Materialpruefung/Materials Testing*, 56 (10): 847–851 (2014).
48. Kainer, K. U. and von Buch, F., "The Current State of Technology and Potential for Further Development of Magnesium Applications", *Magnesium– Alloys And Technology*, 1–22 (2004).
49. King, J. F., "Magnesium: commodity or exotic?", [Http://Dx.Doi.Org/10.1179/174328407X154374](http://dx.doi.org/10.1179/174328407X154374), 23 (1): 1–14 (2013).
50. Mishra, R. K., Gupta, A. K., Rama Rao, P., Sachdev, A. K., Kumar, A. M., and Luo, A. A., "Influence of cerium on texture and ductility of magnesium extrusions", *Magnesium Technology*, 269–274 (2008).
51. Hassan, S. F. and Gupta, M., "Development of a novel magnesium/nickel composite with improved mechanical properties", *Journal Of Alloys And Compounds*, 335 (1–2): L10–L15 (2002).
52. Hassan, S. F. and Gupta, M., "Development of ductile magnesium composite materials using titanium as reinforcement", *Journal Of Alloys And Compounds*, 345 (1–2): 246–251 (2002).
53. Aydin, F. and Sun, Y., "Microstructure and Wear of a Sintered Composite with a Magnesium Alloy AZ91 Matrix Reinforced with ZrO₂ Particles", *Metal Science And Heat Treatment*, 61 (5–6): 325–329 (2019).
54. Powell, B. R., Rezhets, V., Balogh, M. P., and Waldo, R. A., "Microstructure and creep behavior in AE42 magnesium die-casting alloy", *JOM*, 54 (8): 34–38 (2002).
55. Kainer, K. U., "Magnesium Alloys and Technology", *DGM*, 285 (2003).
56. "Magnesium Alloy Market Size, Share, Report (2022 - 27)", <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/magnesium-alloy-market> (2023).
57. Dobrzański, L. A., "Stopy metali lekkich", *IMIiB, Gliwice.*, (2007).
58. Hussein, R. O. and Northwood, D. O., "Improving the performance of magnesium alloys for automotive applications", (2014).
59. Gwynne, B., "Fifth Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference Title: Magnesium Alloys in Aerospace Applications, Past Concerns, Current Solutions", .

60. Dziubińska, A., Gontarz, A., Dziubiński, M., & Barszcz, M. (2016). The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications", *Advances In Science And Technology Research Journal*, 10 (31): 158–168 (2016).
61. DEMİRCİ, M., VANLI, A. S., and AKDOĞAN, A., "Savunma Sanayinde Kullanılan Magnezyum Alaşımları ve Uygulama Alanları", *Uluslararası Muhendislik Arastirma Ve Gelistirme Dergisi*, 7 (4): 13–20 (2015).
62. Friedrich, H. E. and Mordike, B. L., "Magnesium technology: Metallurgy, design data, applications", *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*, 1–677 (2006).
63. "The Benefits of Magnesium Alloy for Medical Implants - Medical Design Briefs",
<https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/mdb/pub/features/articles/27329> (2023).
64. Temiz, A., Yaşar, M., & Koç, E. (2021). Fabrication of open-pore biodegradable magnesium alloy scaffold via infiltration technique", *International Journal Of Metalcasting*, 16 (1): 2022 .
65. Tsakiris, V., Tardei, C., and Clicinschi, F. M., "Biodegradable Mg alloys for orthopedic implants – A review", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 9 (6): 1884–1905 (2021).
66. "Taiwan Sporting Goods Manufacturers Association",
http://www.sports.org.tw/e/report_main.asp?a_table=03lightweigh (2023)
67. Internet: Morio, "Wikimedia Commons",
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A2012_Nikon_D4_magnesium-alloy_frame_2012_CP%2B.jpg (2023).
68. Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, and Wendelin J. Wright, "The Science & Engineering of Materials", (2010).
69. Vijayaram, T. R., Baskaralal, V. P. M., and Scholar, R., "A Review on the Processing Methods, Properties and Applications of Metal Matrix Composites", (2016).
70. Uslu, P., Demir, B., and Hayat, F., "Effect of the weld current on tensile shear properties of the RSW junctions of the AZ31 Mg alloy sheet.", (2011).

71. Demir, B., Koç, E., and Saud, A. N., "Effect of Weld Currents on Microstructure, Corrosion Behavior of AZ31 Magnesium Alloy", *Journal Of Bio- And Tribo-Corrosion*, 7 (2): 1–8 (2021).
72. Dieringa, H. and Kainer, K. U., "Magnesium Matrix Composites: State-of the-Art and what's the Future", *Advanced Materials Research*, 410: 275–278 (2012).
73. Aydın, F., Sun, Y., and Emre Turan, M., "The Effect of TiB 2 Content on Wear and Mechanical Behavior of AZ91 Magnesium Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy", *Powder Metallurgy And Metal Ceramics*, 57 (9–10): 564–572 (2019).
74. "Toz Metalurjisi Nedir? Malzeme Nasıl Üretilir? - Mühendis Alemi", <http://www.muhandisalemi.com/toz-metalurjisi-nedir-malzeme-nasil-uretilir/> (2023).
75. Aydın, F., Durgut, R., Mustu, M., and Demir, B., "Prediction of wear performance of ZK60 / CeO₂ composites using machine learning models", *Tribology International*, 177: 107945 (2023).
76. Turan, M. E., Sun, Y., Aydın, F., and Akgul, Y., "Influence of multi-wall carbon nanotube content on dry and corrosive wear performances of pure magnesium:", <https://doi.org/10.1177/0021998318762294>, 52 (23): 3127–3135 (2018).
77. Liu, J., Suryanarayana, C., Ghosh, D., Subhash, G., and An, L., "Synthesis of Mg–Al₂O₃ nanocomposites by mechanical alloying", *Journal Of Alloys And Compounds*, 563: 165–170 (2013).
78. Prabhu, B., Suryanarayana, C., An, L., and Vaidyanathan, R., "Synthesis and characterization of high volume fraction Al–Al₂O₃ nanocomposite powders by high-energy milling", *Materials Science And Engineering: A*, 425 (1–2): 192–200 (2006).
79. Suryanarayana, C., Ivanov, E., and Boldyrev, V. v., "The science and technology of mechanical alloying", *Materials Science And Engineering: A*, 304–306 (1–2): 151–158 (2001).
80. MİLLİ, A. (2017). Mekanik alaşımlama yöntemi ile (B₄C+ FeTi) takviyeli Fe esaslı kompozit üretimi (Master's thesis, Namık Kemal Üniversitesi).

81. Aydin, F., "Investigation of Elevated Temperature Wear Behavior of Al 2024-BN Composites using Statistical Techniques", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (11): 8560–8578 (2021).
82. Turan, M. E. and Aydin, F., "Wear and corrosion properties of low-cost eggshell-reinforced green AZ91 matrix composites", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 61 (2): 155–171 (2022).
83. Thomas, A. G. and Jones, H. J., "Hot pressing of ceramic powders", [Http://Dx.Doi.Org/10.1179/Pom.1960.3.6.010](http://dx.doi.org/10.1179/Pom.1960.3.6.010), 3 (6): 160–169 (2014).
84. Friedrich, D., "Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique", *Composite Structures*, 262: 113649 (2021).
85. Panda, A. and Dobránsky, J., "Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies", *353 Metalurgija*, 57: 353–356 (2018).
86. Aydin, F., "Effect of solid waste materials on properties of Magnesium matrix composites- A systematic review", *Journal Of Magnesium And Alloys*, (2022).
87. Prasanth, A. S., Krishnaraj, V., Nampoothiri, J., Sindhumathi, R., Sadik, M. R. A., Escobedo, J. P., and Shankar, K., "Uniaxial Compressive Behavior of AA5083/SiC Co-Continuous Ceramic Composite Fabricated by Gas Pressure Infiltration for Armour Applications", *Journal Of Composites Science 2022, Vol. 6, Page 36*, 6 (2): 36 (2022).
88. Ye, H. Z. and Liu, X. Y., "Review of recent studies in magnesium matrix composites", *Journal Of Materials Science 2004 39:20*, 39 (20): 6153–6171 (2004).
89. Turan, M. E., Aydin, F., Sun, Y., Zengin, H., and Akinay, Y., "Wear resistance and tribological properties of GNPs and MWCNT reinforced AlSi18CuNiMg alloys produced by stir casting", *Tribology International*, 164: 107201 (2021).
90. Zhang, C., Fan, T., Cao, W., Ding, J., and Zhang, D., "Size control of in situ formed reinforcement in metal melts-theoretical treatment and application to in situ (AlN + Mg₂Si)/Mg composites", *Composites Science And Technology*, 69 (15–16): 2688–2694 (2009).

91. Chen, L. and Yao, Y., "Processing, microstructures, and mechanical properties of magnesium matrix composites: A review", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27 (5): 762–774 (2014).
92. Yang, H., Chen, X., Huang, G., Song, J., She, J., Tan, J., Zheng, K., Jin, Y., Jiang, B., and Pan, F., "Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: Review and perspective", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 10 (9): 2311–2333 (2022).
93. Naser, M. Z. and Chehab, A. I., "Materials and design concepts for space-resilient structures", *Progress In Aerospace Sciences*, 98: 74–90 (2018).
94. Mustu, M., Demir, B., and Aydin, F., "An Investigation of Mechanical and Wear Performance of TiB₂/GNPs-Reinforced ZK60 Mg Matrix Composites Fabricated Via Powder Metallurgy", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, (2022).
95. Munro, R. G., "Material properties of titanium diboride", *Journal Of Research Of The National Institute Of Standards And Technology*, 105 (5): 709 (2000).
96. Natarajan, S., Narayanasamy, R., Kumaresh Babu, S. P., Dinesh, G., Anil Kumar, B., and Sivaprasad, K., "Sliding wear behaviour of Al 6063/TiB₂ in situ composites at elevated temperatures", *Materials & Design*, 30 (7): 2521–2531 (2009).
97. Dorri Moghadam, A., Omrani, E., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene – A review", *Composites Part B: Engineering*, 77: 402–420 (2015).
98. Yang, Y., Liu, M., Zhou, S., Ren, W., Zhou, Q., and Zhang, W., "Strengthening behaviour of continuous graphene network in metal matrix composites", *Carbon*, 182: 825–836 (2021).
99. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., and Asif, M., "Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method", *Progress In Natural Science: Materials International*, 24 (2): 101–108 (2014).
100. Thakur, S. K., Srivatsan, T. S., and Gupta, M., "Synthesis and mechanical behavior of carbon nanotube-magnesium composites hybridized with

- nanoparticles of alumina", *Materials Science And Engineering A*, 466 (1–2): 32–37 (2007).
101. Purohit, R., Dewang, Y., Rana, R. S., Koli, D., and Dwivedi, S., "Fabrication of magnesium matrix composites using powder metallurgy process and testing of properties", *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 6009–6017 (2018).
 102. Zhang, X., Liao, L., Ma, N., and Wang, H., "Mechanical properties and damping capacity of magnesium matrix composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 37 (11): 2011–2016 (2006).
 103. Du, X., Du, W., Wang, Z., Liu, K., and Li, S., "Ultra-high strengthening efficiency of graphene nanoplatelets reinforced magnesium matrix composites", *Materials Science And Engineering: A*, 711: 633–642 (2018).
 104. Ramezanzade, S., Ebrahimi, G. R., Parizi, M. T., and Ezatpour, H. R., "Microstructure and mechanical characterizations of graphene nanoplatelets-reinforced Mg–Sr–Ca alloy as a novel composite in structural and biomedical applications", <https://doi.org/10.1177/0021998319867464>, 54 (5): 711–728 (2019).
 105. Fu, J., Liu, K., Du, W., -, al, Zhao, G., Deng, Z., Jin, C., Pal Singh, B., Singh, R., Mehta, J. S., and Prakash, C., "Fabrication of Biodegradable Low Elastic Porous Mg-Zn-Mn-HA Alloy by Spark Plasma Sintering for Orthopaedic Applications", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 225 (1): 012050 (2017).
 106. Yuan, X., Zhu, H., Ji, H., and Zhang, Y., "Effect of CNT Contents on the Microstructure and Properties of CNT/TiMg Composites", *Materials 2019, Vol. 12, Page 1620*, 12 (10): 1620 (2019).
 107. Xue, Z., Han, X., Zhou, Z., Wang, Y., Li, X., and Wu, J., "Effects of Microstructure and Texture Evolution on Strength Improvement of an Extruded Mg-10Gd-2Y-0.5Zn-0.3Zr Alloy", *Metals 2018, Vol. 8, Page 1087*, 8 (12): 1087 (2018).
 108. Parande, G., Manakari, V., Koppaarthi, S. D. S., and Gupta, M., "Utilizing Low-Cost Eggshell Particles to Enhance the Mechanical Response of Mg–2.5Zn Magnesium Alloy Matrix", *Advanced Engineering Materials*, 20 (5): 1700919 (2018).

109. Ma, H., Wang, J., Wang, H., Dong, N., Zhang, J., Jin, P., and Peng, Y., "Influence of nano-diamond content on the microstructure, mechanical and thermal properties of the ZK60 composites", *Journal Of Magnesium And Alloys*, (2021).
110. Zhou, M. Y., Ren, L. B., Fan, L. L., Zhang, Y. W. X., Lu, T. H., Quan, G. F., and Gupta, M., "Progress in research on hybrid metal matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 838: 155274 (2020).
111. Gu, M., Wu, Z., Jin, Y., and Koçak, M., "The interfacial reaction and microstructure in a ZK60-based hybrid composite", *Journal Of Materials Science 2000 35:10*, 35 (10): 2499–2505 (2000).
112. Behnamian, Y., Serate, D., Aghaie, E., Zahiri, R., Tolentino, Z., Niazi, H., and Mostafaei, A., "Tribological behavior of ZK60 magnesium matrix composite reinforced by hybrid MWCNTs/B4C prepared by stir casting method", *Tribology International*, 165: 107299 (2022).
113. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., and Colijn, H., "Microstructure and synergistic reinforcing activity of GNPs-B4C dual-micro and nano supplements in Al-Si matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 806: 1230–1241 (2019).
114. Thirugnanasambandham, T. and Chandradass, J., "Fabrication and Characterization of Bagasse Ash Particle (BAP) Reinforced Magnesium (AZ91E) Alloy Composite by Vacuum Stir Casting", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 993 (1): 012133 (2020).
115. Pérez, P., Garcés, G., and Adeva, P., "Mechanical properties of a Mg–10 (vol.%)Ti composite", *Composites Science And Technology*, 64 (1): 145–151 (2004).
116. Hwang, S., Nishimura, C., and McCormick, P. G., "Compressive mechanical properties of Mg-Ti-C nanocomposite synthesised by mechanical milling", *Scripta Materialia*, 44 (10): 2457–2462 (2001).
117. Choubey, G., Suneetha, L., and Pandey, K. M., "Composite materials used in Scramjet- A Review", *Materials Today: Proceedings*, 5 (1): 1321–1326 (2018).
118. Zhao, Z. Y., Zhao, W. J., Bai, P. K., Wu, L. Y., and Huo, P. C., "The interfacial structure of Al/Al₄C₃ in graphene/Al composites prepared by selective laser

- melting: First-principles and experimental", *Materials Letters*, 255: 126559 (2019).
119. Nardone, V. C. and Prewo, K. M., "On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites", *Scripta Metallurgica*, 20 (1): 43–48 (1986).
 120. Mehmet Gençer, G., "Mühendis ve Makina cilt 62, sayı 705, s. 681-701", *Araştırma Makalesi Engineer And Machinery*, 62 (705): 681–701 (2021).
 121. Nie, K. B., Wang, X. J., Deng, K. K., Hu, X. S., and Wu, K., "Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles – A review", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 9 (1): 57–77 (2021).
 122. Taltavull, C., Torres, B., López, A. J., and Rams, J., "Dry sliding wear behavior of AM60B magnesium alloy", *Wear*, 301 (1–2): 615–625 (2013).
 123. López, A. J., Rodrigo, P., Torres, B., and Rams, J., "Dry sliding wear behaviour of ZE41A magnesium alloy", *Wear*, 271 (11–12): 2836–2844 (2011).
 124. Chen, H. and Alpas, A. T., "Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9 Zn (AZ91)", *Wear*, 246 (1–2): 106–116 (2000).
 125. Ilanaganar, E. and Anbuselvan, S., "Wear mechanisms of AZ31B magnesium alloy during dry sliding condition", *Materials Today: Proceedings*, 5 (1): 628–635 (2018).
 126. Aydın, F., "A review of recent developments in the corrosion performance of Aluminium matrix composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 169508 (2023).
 127. Aung, N. N., Zhou, W., and Lim, L. E. N., "Wear behaviour of AZ91D alloy at low sliding speeds", *Wear*, 265 (5–6): 780–786 (2008).
 128. Sieberg, P. M., Kurtulan, D., and Hanke, S., "Wear Mechanism Classification Using Artificial Intelligence", *Materials*, 15 (7): (2022).
 129. A.Gupta, H. K. L. N. P. K. A., "EDM parametric study of composite materials: A review.", *Evergreen*, 7: 519–529 (2020).
 130. Philip, J. T., Mathew, J., and Kuriachen, B., "Transition from EDM to PMEDM – Impact of suspended particulates in the dielectric on Ti6Al4V and other distinct material surfaces: A review", *Journal Of Manufacturing Processes*, 64: 1105–1142 (2021).

131. Joshi, A. Y. and Joshi, A. Y., "A systematic review on powder mixed electrical discharge machining", *Helvion*, 5 (12): e02963 (2019).
132. Tzeng, Y.-F. and Lee, C.-Y., "Effects of Powder Characteristics on Electrodischarge Machining Efficiency", *Int J Adv Manuf Technol*, 17: 586–592 (2001).
133. Hocheng, H., "Machining Technology for Composite Materials Principles and Practice", Woodhead Publishing in Materials, . (2012).
134. Thakur, S. S., Patel, B., Upadhyay, R. K., Bagal, D. K., and Barua, A., "Machining characteristics of metal matrix composite in powder-mixed electrical discharge machining – A review", <https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2030089>, (2022).
135. Kalamani, S., Yasar, H., Ekmekci, N., Opoz, T., and Ekmekci, B., "Powder Mixed Electrical Discharge Machining and Biocompatibility: A State of the Art Review", (2018).
136. Mustu, M., Demir, B., Aydin, F., and Gürün, H., "An investigation of the PMEDM processing and surface characterizations of AZ61 matrix composites via experimental and optimization methods", *Materials Chemistry And Physics*, 300: 127526 (2023).
137. Jeswani, M. L., "Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining", *Wear*, 70 (2): 133–139 (1981).
138. Jawahar, M., Sridhar Reddy, C., and Srinivas, C., "A review of performance optimization and current research in PMEDM", (2019).
139. Jabbaripour, B., Sadeghi, M. H., Shabgard, M. R., and Faraji, H., "Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic", *Journal Of Manufacturing Processes*, 15 (1): 56–68 (2013).
140. Mustika, D., Fisli, A., Joni, I. M., Langenati, R., and Setiawan, J., "Purification of Indonesian Natural Graphite by Acid Leaching Method as Nuclear Fuel Matrix: Physical Characterization", *International Journal Of Chemistry*, 11 (1): (2019).

141. Matsubara, K., Sugihara, K., and Tsuzuku, T., "Erratum: Electrical resistance in the c direction of graphite (Physical Review B (1992) 46, 3)", *Physical Review B*, 46 (3): 1948 (1992).
142. Ho, K. H. and Newman, S. T., "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 43 (13): 1287–1300 (2003).
143. Ranjith, R., Tamilselvam, P., Prakash, T., and Chinnasamy, C., "Examinations concerning the electric discharge machining of AZ91/5B4CP composites utilizing distinctive electrode materials", <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1628258>, 34 (10): 1120–1128 (2019).
144. Marinho, B., Ghislandi, M., Tkalya, E., Koning, C. E., and de With, G., "Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder", *Powder Technology*, 221: 351–358 (2012).
145. Peças, P. and Henriques, E., "Electrical discharge machining using simple and powder-mixed dielectric: The effect of the electrode area in the surface roughness and topography", *Journal Of Materials Processing Technology*, 200 (1–3): 250–258 (2008).
146. Ponappa, K., Aravindan, S., Rao, P. v., Ramkumar, J., and Gupta, M., "The effect of process parameters on machining of magnesium nano alumina composites through EDM", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology* 2009 46:9, 46 (9): 1035–1042 (2009).
147. Kansal, H. K., Singh, S., and Kumar, P., "Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology", *Journal Of Materials Processing Technology*, 169 (3): 427–436 (2005).
148. Arunkumar, L. and & Raghunath, B. K., "Electro discharge machining characteristics of Mg/SiCP metal matrix composites by powder metallurgy (P/M) techniques", *International Journal Of Engineering And Technology*, 5 (5): 4332–4338 (2013).
149. Kavimani, V., Prakash, K. S., and Thankachan, T., "Influence of machining parameters on wire electrical discharge machining performance of reduced

- graphene oxide/magnesium composite and its surface integrity characteristics", *Composites Part B: Engineering*, 167: 621–630 (2019).
150. Gopal, P. M. and Soorya Prakash, K., "Wire Electric Discharge Machining of Silica Rich E-waste CRT and BN Reinforced Hybrid Magnesium MMC", *Silicon*, 11 (3): 1429–1440 (2019).
 151. Pattnaik, S., Karunakar, D. B., and Jha, P. K., "Optimization of multiple responses in the lost wax process using Taguchi method and grey relational analysis.", [Http://Dx.Doi.Org/10.1177/1464420712464711](http://dx.doi.org/10.1177/1464420712464711), 227 (2): 156–167 (2012).
 152. Idrisi, A. H. and Mourad, A. H. I., "Wear Performance Analysis of Aluminum Matrix Composites and Optimization of Process Parameters Using Statistical Techniques", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 50 (11): 5395–5409 (2019).
 153. Kavimani, V., Prakash, K. S., and Thankachan, T., "Influence of machining parameters on wire electrical discharge machining performance of reduced graphene oxide/magnesium composite and its surface integrity characteristics", *Composites Part B: Engineering*, 167 (October 2018): 621–630 (2019).
 154. Purohit, R., Dewang, Y., Rana, R. S., Koli, D., and Dwivedi, S., "Fabrication of magnesium matrix composites using powder metallurgy process and testing of properties", *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 6009–6017 (2018).
 155. Muley, S. V., Singh, S. P., Sinha, P., Bhingole, P. P., and Chaudhari, G. P., "Microstructural evolution in ultrasonically processed in situ AZ91 matrix composites and their mechanical and wear behavior", *Materials & Design*, 53: 475–481 (2014).
 156. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., and Aamir, M., "Synergetic effect of graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotube (MW-CNTs) on mechanical properties of pure magnesium", *Journal Of Alloys And Compounds*, 603: 111–118 (2014).
 157. Hemanth, J., "Development and property evaluation of aluminum alloy reinforced with nano-ZrO₂ metal matrix composites (NMMCs)", *Materials Science And Engineering: A*, 507 (1–2): 110–113 (2009).

158. Aydin, F., "The investigation of the effect of particle size on wear performance of AA7075/Al₂O₃ composites using statistical analysis and different machine learning methods", *Advanced Powder Technology*, 32 (2): 445–463 (2021).
159. Turan, M. E., Zengin, H., and Sun, Y., "Dry Sliding Wear Behavior of (MWCNT + GNPs) Reinforced AZ91 Magnesium Matrix Hybrid Composites", *Metals And Materials International*, 26 (4): 541–550 (2020).
160. Turan, M. E., Sun, Y., Aydin, F., Zengin, H., Turen, Y., and Ahlatci, H., "Effects of carbonaceous reinforcements on microstructure and corrosion properties of magnesium matrix composites", *Materials Chemistry And Physics*, 218 (July): 182–188 (2018).
161. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., and Aamir, M., "Synergetic effect of graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotube (MW-CNTs) on mechanical properties of pure magnesium", *Journal Of Alloys And Compounds*, 603: 111–118 (2014).
162. Kevorkijan, V. and Davor Škapin, S., "Mg/B₄C composites with a high volume fraction of fine ceramic reinforcement", *Materials And Manufacturing Processes*, 24 (12): 1337–1340 (2009).
163. Jiang, Q. C., Wang, H. Y., Ma, B. X., Wang, Y., and Zhao, F., "Fabrication of B₄C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 386 (1–2): 177–181 (2005).
164. Paramsothy, M., Nguyen, Q. B., Tun, K. S., Chan, J., Kwok, R., Kuma, J. V. M., and Gupta, M., "Mechanical property retention in remelted microparticle to nanoparticle AZ31/Al₂O₃ composites", *Journal Of Alloys And Compounds*, 506 (2): 600–606 (2010).
165. Suneesh, E. and Sivapragash, M., "Behaviour of micro- and nano-alumina-reinforced Mg–3Zn–0.7Zr–1Cu alloy composites processed at different sintering temperatures", *Rare Metals*, 40 (1): 1–13 (2021).
166. Sun, J., Ding, D., Liu, W., Wu, G., Liu, H., Wei, G., and Liu, H., "Strength and elastic modulus enhancement in Mg–Li–Al matrix composites reinforced by ex situ TiB₂ particles via stir casting", *Journal Of Magnesium And Alloys*, (2022).
167. Turan, M. E. and Aydin, F., "Improved elevated temperature mechanical properties of graphene-reinforced pure aluminium matrix composites",

- Materials Science And Technology (United Kingdom)*, 36 (10): 1092–1103 (2020).
168. Sadooghi, A. and Rahmani, K., "Experimental study on mechanical and tribology behaviors of Mg-SiC nano/micro composite produced by friction stir process", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 35 (3): 1121–1127 (2021).
 169. Lim, S. C. and Brunton, J. H., "The unlubricated wear of sintered iron", *Wear*, 113 (3): 371–382 (1986).
 170. García-Rodríguez, S., Torres, B., Maroto, A., López, A. J., Otero, E., and Rams, J., "Dry sliding wear behavior of globular AZ91 magnesium alloy and AZ91/SiCp composites", *Wear*, 390–391: 1–10 (2017).
 171. Kumar, S., Panwar, R. S., and Pandey, O. P., "Effect of dual reinforced ceramic particles on high temperature tribological properties of aluminum composites", *Ceramics International*, 39 (6): 6333–6342 (2013).
 172. Mistry, J. M. and Gohil, P. P., "Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si₃N₄p reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process", *Composites Part B: Engineering*, 161: 190–204 (2019).
 173. Yao-hui, L., Jun, D., Si-rong, Y., and Wei, W., "High temperature friction and wear behaviour of Al₂O₃ and/or carbon short fibre reinforced Al–12Si alloy composites", *Wear*, 256 (3–4): 275–285 (2004).
 174. Sheng, L. Y., Yang, F., Xi, T. F., and Guo, J. T., "Investigation on microstructure and wear behavior of the NiAl-TiC-Al₂O₃ composite fabricated by self-propagation high-temperature synthesis with extrusion", *Journal Of Alloys And Compounds*, 554: 182–188 (2013).
 175. Dieter, G. E. , & B. D., "Mechanical Metallurgy", New York: McGraw-Hill, (1976).
 176. Prasad, Y. V. R. K., Rao, K. P., and Gupta, M., "Hot workability and deformation mechanisms in Mg/nano–Al₂O₃ composite", *Composites Science And Technology*, 69 (7–8): 1070–1076 (2009).
 177. Tjong, S. C., "Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties", *Advanced Engineering Materials*, 9 (8): 639–652 (2007).

178. Rahmani, K., Nouri, A., Wheatley, G., Malekmohammadi, H., Bakhtiari, H., and Yazdi, V., "Determination of tensile behavior of hot-pressed Mg–TiO₂ and Mg–ZrO₂ nanocomposites using indentation test and a holistic inverse modeling technique", *Journal Of Materials Research And Technology*, 14: 2107–2114 (2021).
179. Cerri, E., Leo, P., and de Marco, P. P., "Hot compression behavior of the AZ91 magnesium alloy produced by high pressure die casting", *Journal Of Materials Processing Technology*, 189 (1–3): 97–106 (2007).
180. Fleck, N. A., Ashby, M. F., and Hutchinson, J. W., "The role of geometrically necessary dislocations in giving material strengthening", *Scripta Materialia*, 48 (2): 179–183 (2003).
181. Ozben, T., Kilickap, E., and Çakir, O., "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC", *Journal Of Materials Processing Technology*, 198 (1–3): 220–225 (2008).
182. Nyanor, P., El-Kady, O., Yehia, H. M., Hamada, A. S., and Hassan, M. A., "Effect of Bimodal-Sized Hybrid TiC–CNT Reinforcement on the Mechanical Properties and Coefficient of Thermal Expansion of Aluminium Matrix Composites", *Metals And Materials International*, 27 (4): 753–766 (2021).
183. Liu, Z. Y., Xu, S. J., Xiao, B. L., Xue, P., Wang, W. G., and Ma, Z. Y., "Effect of ball-milling time on mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 43 (12): 2161–2168 (2012).
184. Rashad, M., Pan, F., Zhang, J., and Asif, M., "Use of high energy ball milling to study the role of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes reinforced magnesium alloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 646: 223–232 (2015).
185. Rahmani, K. and Majzoobi, G. H., "The effect of particle size on microstructure, relative density and indentation load of Mg-B₄C composites fabricated at different loading rates", *Journal Of Composite Materials*, 54 (17): 2297–2311 (2020).
186. Nyanor, P., El-Kady, O., Yehia, H. M., Hamada, A. S., Nakamura, K., and Hassan, M. A., "Effect of Carbon Nanotube (CNT) Content on the Hardness, Wear Resistance and Thermal Expansion of In-Situ Reduced Graphene Oxide

- (rGO)-Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Metals And Materials International*, 27 (5): 1315–1326 (2021).
187. Gözde Keskin, Gökhan Küçüktürk, Muharrem Pul, Hakan GÜRÜN, V. B., "The Effect of Discharge Current and Reinforcement Ratio on the Microstructure and The roughness of the Machined Surface in the Machining of AA7075 Matrix B4C+SiC Reinforced Hybrid Composites by Powder Reinforced EDM Method", *International Journal Of Engineering Research And Development*, 13 (2): 489–495 (2021).
 188. Zhao, W. S., Meng, Q. G., and Wang, Z. L., "The application of research on powder mixed EDM in rough machining", *Journal Of Materials Processing Technology*, 129 (1–3): 30–33 (2002).
 189. Leão, F. N. and Pashby, I. R., "A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1–3): 341–346 (2004).
 190. Hussain SYED, K. and Palaniyandi, K., "Performance of electrical discharge machining using aluminium powder suspended distilled water", *Env. Sci*, 36: 195–207 (2012).
 191. Malhotra, P., Singh, N. K., Tyagi, R. K., and Sikarwar, B. S., .
 192. KUŞ, A., MOTORCU, A. R., and EKİCİ, E., "Wire Electrical Discharge Machining of a Hybrid Composite: Evaluation of Kerf Width and Surface Roughness", *Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering*, 21 (1): 245 (2016).
 193. Czerwinski, F., "Oxidation characteristics of magnesium alloys", *JOM*, 64 (12): 1477–1483 (2012).
 194. Sardar, S., Karmakar, S. K., and Das, D., "High stress abrasive wear characteristics of Al 7075 alloy and 7075/Al₂O₃ composite", *Measurement*, 127: 42–62 (2018).
 195. Palanikumar, K., "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites", *Measurement*, 44 (10): 2138–2148 (2011).
 196. Basavarajappa, S., Chandramohan, G., and Paulo Davim, J., "Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behaviour of metal matrix composites", *Materials & Design*, 28 (4): 1393–1398 (2007).

197. Koksai, S., Ficici, F., Kayikci, R., and Savas, O., "Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB₂/Al composite based on Taguchi's method", *Materials & Design*, 42: 124–130 (2012).
198. Dehnad, K., "Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method", *Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software*, 309 (1989).
199. Rana, R. S., Purohit, R., Sharma, A. kumar, and Rana, S., "Optimization of Wear Performance of Aa 5083/10 Wt. % Sic Composites Using Taguchi Method", *Procedia Materials Science*, 6: 503–511 (2014).
200. Nanjappan, N., Natarajan, N., Moorthy, A. A., Sivakumar, R., Manojkumar, M., and Suresh, M., "Dry Sliding Wear and Mechanical Behavior of Aluminium/Fly ash/Graphite Hybrid Metal Matrix Composite Using Taguchi Method", *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2 (3): 1224–1230 (2012).
201. Stojanović, B., Babić, M., Veličković, S., and Blagojević, J., "Tribological Behavior of Aluminum Hybrid Composites Studied by Application of Factorial Techniques", *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10402004.2015.1091535*, 59 (3): 522–529 (2016).
202. Idrisi, A. H. and Mourad, A. H. I., "Wear Performance Analysis of Aluminum Matrix Composites and Optimization of Process Parameters Using Statistical Techniques", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 50 (11): 5395–5409 (2019).
203. He, Z., Shi, T., Xuan, J., and Li, T., "Research on tool wear prediction based on temperature signals and deep learning", *Wear*, 478–479: 203902 (2021).
204. Sardar, S., Karmakar, S. K., and Das, D., "High stress abrasive wear characteristics of Al 7075 alloy and 7075/Al₂O₃ composite", *Measurement*, 127: 42–62 (2018).
205. Miloradović, N., Vujanac, R., Stojanović, B., and Pavlović, A., "Dry sliding wear behaviour of ZA27/SiC/Gr hybrid composites with Taguchi optimization", *Composite Structures*, 264: 113658 (2021).
206. Koksai, S., Ficici, F., Kayikci, R., and Savas, O., "Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB₂/Al composite based on Taguchi's method", *Materials & Design*, 42: 124–130 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa MUŞTU 2009 yılında Karabük Üniversitesi Makina Mühendisliği Otomotiv Programında öğrenime başlamış, 2014 yılında 3,16 ortalama ile mezun olmuştur. 2014 yılı aralık ayında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başlamış ve Haziran 2018 yılında yüksek lisanstan mezun olmuştur. Halen Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.