

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ZA27/GRAFEN/B₄C NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ
İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Makina Yük. Müh. Emre Deniz YALÇIN

HAZİRAN 2018

TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ZA27/GRAFEN/B₄C NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ
İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Makina Yük. Müh. Emre Deniz YALÇIN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28. 05. 2018
Tezin Savunma Tarihi : 28. 06. 2018**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

TRABZON 2018

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Emre Deniz YALÇIN Tarafından Hazırlanan

ZA27/GRAFEN/B₄C NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 05 /06/2018 gün ve 1756 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri


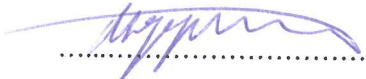
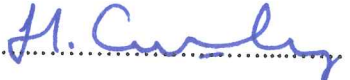


Başkan : Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

Üye : Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Üye : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI


.....

.....

.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Akademik çalışmalarında bana daima yol gösteren bilgisini ve hayat tecrübesini paylaşan sürekli yoluma ışık tutan çok değerli hocam tez danışmanım Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya; Doktora tez izleme komitesindeki hocalarım Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI ve Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK'e, akademik çalışmalarına katkılar sunan değerli dostum, arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Fatih ERDEMİR'e, laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım, Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK, Arş. Gör. Müslüm ÇELEBİ ve Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA'ya, ayrı ayrı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren çalışkan çabalayan her şeyin en iyisini layık gören gurur duyduğum değerli ailem, annem; Fatma YALÇIN, babam; Mehmet Hulki YALÇIN (merhum) ve kardeşim; Dr. Öğr. Üyesi Can Özgür YALÇIN' a teşekkür eder, en derin saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Emre Deniz YALÇIN

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ZA27/GRAFEN/B₄C NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç.Dr. Aykut ÇANAKÇI'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/06/2018

Emre Deniz YALÇIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	2
1.2.1. Metal Matrisli Kompozitler İçin Matris Malzemeleri	4
1.2.2. Zn-Al Matris Malzemesi	4
1.2.2.1. Zn-Al Alaşımların Fiziksel Özellikleri.....	6
1.2.2.2. Zn-Al Alaşımların Mekanik Özellikleri	7
1.2.2.3. Zn-Al İkili Faz Diyagramı.....	8
1.2.2.4. Zn- Al Alaşımlarda Korozyon ve Aşınma.....	9
1.2.3. Metal Matrisli Kompozitler İçin Takviye Malzemeleri	10
1.2.3.1. Grafen (Gr)	10
1.2.3.2. Bor Karbür (B ₄ C)	13
1.3. Nano Malzemeler	15

1.3.1.	Nanokompozitler	15
1.3.1.1.	Metal Matris Nanokompozitler	17
1.3.1.2.	Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretilmesi.....	17
1.4.	Toz Metalurjisi	18
1.4.1.	Toz Metalurjisi Üretim Safhaları.....	19
1.4.1.1.	Tozların Üretimi	19
1.4.1.2.	Tozların Karıştırılması	20
1.4.1.3.	Tozların Preslenmesi	21
1.4.1.4.	Sinterleme	22
1.5.	Mekanik Alaşımlama	23
1.5.1.	MA'nın Avantajları	23
1.5.2.	Öğütme Sistematiği	24
1.5.2.1.	Sünek-Sünek Sistem	24
1.5.2.2.	Sünek-Gevrek Sistem	25
1.5.2.3.	Gevrek-Gevrek Sistem	25
1.5.3.	Öğütücü Türleri	26
1.5.4.	Mekanik Alaşımlamada İşlem Parametreleri	28
1.5.4.1.	Değirmen Tipi	29
1.5.4.2.	Öğütme Kabı	29
1.5.4.3.	Başlangıç Toz Boyutu	29
1.5.4.4.	Öğütücü Malzeme	29
1.5.4.5.	Bilye-Toz Oranı	30
1.5.4.6.	Öğütme Atmosferi	30
1.5.4.7.	Öğütme Süresi	30

1.5.4.8.	Öğütme Hızı	31
1.5.4.9.	İşlem Kontrol Kimyasalı	31
1.6.	Metal Matris Nanokompozitlerin Özellikleri	31
1.6.1.	Metal Matris Nanokompozitlerde Sertlik	31
1.6.2.	Metal Matris Nanokompozitlerde Aşınma Davranışı	32
1.6.2.1.	Adhezif (Yapışma) Aşınması	33
1.6.2.2.	Abrazif Aşınma	35
1.6.2.3.	Delaminasyon Aşınması.....	37
1.6.2.4.	Aşınma Ölçüm Yöntemleri	37
1.6.3.	Metal Matris Nanokompozitlerde Korozyon Davranışları.....	38
1.6.3.1.	Çukurcuk Korozyonu	39
1.6.3.2.	Galvanik Korozyon	40
1.7.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	40
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	48
2.1.	Malzemeler	48
2.1.1.	Matris Malzemesi	48
2.1.2.	Takviye Malzemeleri.....	48
2.2.	Malzeme Bileşimleri.....	49
2.3.	Parçacık Boyutu.....	50
2.4.	Mekanik Alaşımlama.....	51
2.5.	Sıcak Presleme.....	52
2.6.	Gözenek Miktarı	52
2.7.	Sertlik Ölçümleri	53
2.8.	Çekme Mukavemeti Deneyleri.....	54

2.9.	Metalografik Çalışmalar	55
2.10.	Morfoloji ve İçyapı Analizleri	55
2.11.	Aşınma Testleri	56
2.12.	Korozyon Testleri	57
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	59
3.1.	ZA27/Grafen/B ₄ C Nanokompozit ve Hibrit Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri	59
3.1.1.	ZA27 Tozların Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri	59
3.1.2.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri.	61
3.1.3.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri	67
3.1.4.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri	70
3.2.	Gözenek Miktarı	73
3.2.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı.....	74
3.2.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı	75
3.2.3.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı	76
3.3.	Sertlik Sonuçları	78
3.3.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları	78
3.3.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları	89
3.3.3.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları.....	80
3.4.	Çekme Mukavemeti Sonuçları	82
3.4.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Çekme Mukavemeti Sonuçları.....	82
3.4.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin Çekme Mukavemeti Sonuçları	84
3.5.	XRD Analizi	85

3.5.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerin XRD Analizi	85
3.5.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin XRD Analizi.....	86
3.5.3.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerin XRD Analizi	87
3.6.	Aşınma Davranışları	88
3.6.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları	88
3.6.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları.....	93
3.6.3.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları	97
3.7.	Korozyon Davranışları	100
3.7.1.	ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları.....	100
3.7.2.	ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları	104
3.7.3.	ZA27/Grafen/B ₄ C Hibrit Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları	109
4.	SONUÇLAR.....	115
5.	ÖNERİLER	117
6.	KAYNAKLAR.....	118

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

ZA27/GRAFEN/B₄C NANOKOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Emre Deniz YALÇIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2018, 124 Sayfa

Bu çalışmada, üretim yöntemi olarak toz metalürjisi tekniği kullanılarak ZA27/Grafen/B₄C nanokompozitleri üretildi. Grafen ve B₄C takviyeli malzemeler için ağırlıkça %(0-3) oranlarında ZA27 matris içerisine katılarak ZA27/Grafen ve ZA27/B₄C nanokompozitleri üretimi gerçekleştirildi. Ağırlıkça %3 grafen miktarı sabit tutularak, %(0-3) B₄C oranlarında ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitleri üretildi. Öğütme işlemi 0-4 saat arasında gerçekleştirilerek mekanik alaşımlamanın kompozitlerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Öğütülen tozlar 250 MPa ön presleme işlemine tabi tutulduktan sonra sıcak pres yöntemi ile 435°C ve 500 MPa basınç altında preslenerek nanokompozit ve hibrit nanokompozitler üretildi. Üretilen nanokompozitlerin fiziksel (yoğunluk ve gözenek miktarı), mekanik (sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma), kimyasal (korozyon davranışları) ve karakterizasyon (mikroyapı, SEM, EDS ve XRD) özellikleri belirlenmiştir. Nanokompozitlerin aşınma davranışlarını belirlemek için ball on disk aşınma deney düzeneğinde (1-10)N yüklerinde aşınma deneyleri yapıldı. Nanokompozitlerin elektrokimyasal korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde elektrokimyasal korozyon testleri gerçekleştirildi. Yapılan mikroyapı incelemelerinde B₄C ve grafen partiküllerinin matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Artan takviye oranlarında (hem grafen hem de B₄C takviyeleri için) numunelerin gözenek miktarında artış gözlenirken mekanik özelliklerde (sertlik ve çekme mukavemeti değerleri) düşüş görülmüştür. En yüksek aşınma direnci 4 saatlik mekanik alaşımlama sonrası üretilen %3 grafen takviyeli nanokompozitlerde elde edilmiştir. En düşük korozyon hızı 1 saatlik mekanik alaşımlamayla üretilen %3 grafen takviyeli nanokompozitlerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZA27, B₄C, Grafen, Aşınma, Korozyon, Toz Metalurjisi, Nanokompozit, Hibrit Nanokompozit

Doctoral Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF ZA27/GRAFEN/B₄C NANOCOMPOSITORS BY POWDER
METALLURGY METHOD AND INVESTIGATION OF PROPERTIES

Emre Deniz YALÇIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2018, 124 pages

In this study, ZA27/Graphene/B₄C nanocomposites were produced using powder metallurgy technique as the production method. ZA27/Graphene and ZA27/B₄C nanocomposites were produced by adding ZA27 matrix in the ratio of 0-3% by weight for Graphene and B₄C reinforced materials. ZA27/Graphene/B₄C hybrid nanocomposites were produced at a rate of 0-3% B₄C, with a graphene content of 3%. Grinding was carried out for 0-4 hours to investigate the effects of mechanical alloying on the properties of composites. The milled powders were subjected to pre-pressing of 250 MPa, followed by hot pressing at 435 ° C and 500 MPa to produce nanocomposites and hybrid nanocomposites. The physical (density and porosity), mechanical (hardness, tensile strength and abrasion), chemical (corrosion behavior) and characterization (microstructure, SEM, EDS and XRD) properties of the nanocomposites produced were determined. In order to determine the wear behaviors of nanocomposites, abrasion tests were carried out on (1-10)N loads in ball on disk abrasion test system. Electrochemical corrosion tests of nanocomposites Electrochemical corrosion tests were carried out in 3.5% NaCl solution. In the microstructure studies, B₄C and graphene particles were homogeneously dispersed in the matrix. Mechanical properties (hardness and tensile strength values) decreased when increasing amounts of porosity were observed at increasing reinforcement ratios (both for graphene and B₄C reinforcements). The highest wear resistance was obtained in 3% graphene reinforced nanocomposites produced after 4 hours of mechanical alloying. The lowest corrosion rate was obtained in 3% graphene reinforced nanocomposites produced with 1 hour mechanical alloying.

Keywords: ZA27, B₄C, Graphene, Wear, Corrosion, Powder Metallurgy, Nanocomposite, Hybrid Nanocomposite

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı.....	9
Şekil 1.2. Grafenin bal peteği şeklindeki kristal yapısı	11
Şekil 1.3. Grafenin Diğer Metallerle Karşılaştırması	12
Şekil 1.4. Karbon Esaslı Malzemeler	13
Şekil 1.5. Nanokompozitlerin sınıflandırılması a)taneler arası, b)tane içi, c)hibrit d) nano/nano kompozitler	16
Şekil 1.6. Presleme işleminin basamakları	21
Şekil 1.7. MMK“lerin sinterleme mekanizması	22
Şekil 1.8. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	24
Şekil 1.9. Mekanik alaşımlamada sünek-gevrek öğütme sisteminin safhaları	25
Şekil 1.10. Gezegen tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi.....	26
Şekil 1.11. SPEX tipi bilyeli değirmen	27
Şekil 1.12. Attritör değirmenin şematik gösterimi	27
Şekil 1.13. Kitlesele üretim yapan ticari değirmen	28
Şekil 1.14. TM ile üretilen ve farklı basınçlarda preslenen MMNK'lerin sinterleme sıcaklığına bağılı olarak Brinell sertlik değerlerindeki değışim.....	32
Şekil 1.15. Adhezif aşınmanın temel mekanizması.....	33
Şekil 1.16. Döküm yöntemi kullanılan ZA27 alaşımlının aşınmanın mekanizması	34
Şekil 1.17. Abrasif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	35
Şekil 1.18. Isıl işlem uygulanmış ZA27 alaşımlının aşınmanın mekanizması.....	36
Şekil 1.19. Metal matrisli kompozitlerin korozyon dağılımı.....	38
Şekil 1.20. Şematik olarak çukurcuk korozyonunun gösterimi.....	39
Şekil 1.21. Şematik olarak galvanik korozyonunun gösterimi.....	40
Şekil 2.1. Partikül boyutu ölçüm cihazı.....	50
Şekil 2.2. Bilyeli öğütücü	52
Şekil 2.3. a) Sıcak presleme cihazı; b) Fırın ünitesi	52
Şekil 2.4. Sertlik ölçüm cihazı.....	54
Şekil 2.5. Üniversal çekme cihazı	55
Şekil 2.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	56

Şekil 2.7. XRD Analiz cihazı	56
Şekil 2.8. Ball-on-disk aşınma sistemi şematik gösterimi.....	57
Şekil 2.9. Ball-on-disk aşınma deney cihazı.....	57
Şekil 2.10. Korozyon deney düzeneği	58
Şekil 3.1. Başlangıç aşamasındaki ZA27 tozunun değişik büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a)250 X b) 1000 K X	59
Şekil 3.2. ZA27 başlangıç tozlarının partikül boyutu analizi	59
Şekil 3.3. 1 saatlik Mekanik Alaşım ile sonrasında üretilen ZA27 numunesi içyapı Görüntüleri	60
Şekil 3.4. 1 saatlik Mekanik Alaşım ile sonrasında üretilen ZA27 numunesi EDS analiz sonuçları	61
Şekil 3.5. Grafen nanolehva başlangıç tozlarının 10.00 K X büyütmelelerdeki Morfolojisi	62
Şekil 3.6. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi.....	62
Şekil 3.7. ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 1 saat mekanik alaşım ile işleminden sonra elde edilen SEM görüntüleri a) ZAG-0,5-1h b) ZAG-1-1h, c) ZAG-2-1h, d) ZAG-3-1h	63
Şekil 3.8. ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 4 saat mekanik alaşım ile işleminden sonra elde edilen 1.00 K X büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) ZAG-0,5-4h b) ZAG-1-4h, c) ZAG-2-4h d) ZAG-3-4h.....	64
Şekil 3.9. ZA27/Grafen nanokompozit numunelerin mikroyapı ve EDX analizleri kırmızı renkler karbon miktarını göstermektedir. : (a–b) ZAG-0,5-1h.; (c–d) ZAG-1-1h; (e–f) ZAG-2-1h; (e–f) ZAG-3-1h	65
Şekil 3.10. Başlangıç tozlarının 10.00 K X büyütmelelerdeki morfolojisi, a) ZA27, b) B ₄ C.....	66
Şekil 3.11. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi	67
Şekil 3.12. 1 Saatlik mekanik alaşım ile sonrasında üretilen ZA27//B ₄ C nanokompozitlerin içyapı görüntüleri	68
Şekil 3.13. Mekanik Alaşım ile sonrasında üretilen ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin numunesi EDS analiz sonuçları.....	69
Şekil 3.14. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit	

nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi.....	69
Şekil 3.15. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saat mekanik alaşımla işleminden sonra elde edilen 1.00 K X büyütmedeki SEM görüntüleri a) ZAGB-0,5-4h b) ZAGB-1-1h, c) ZAGB-2-1h d) ZAGB-3-1h	70
Şekil 3.16. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerinden ZABG-3-1h kodlu numunenin iç yapı görüntüsü	71
Şekil 3.17. 1 Saatlik mekanik alaşımla sonrasında üretilen ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin içyapı görüntüleri	72
Şekil 3.18. 1 saatlik Mekanik Alaşımla sonrasında üretilen ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin numunesi EDS analiz sonuçları	72
Şekil 3.19. ZA27/Grafen nanokompozitlerde mekanik alaşımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı.....	73
Şekil 3.20. ZA27/B ₄ C nanokompozitlerde mekanik alaşımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı.....	75
Şekil 3.21. ZA27/Grafen/B ₄ C nanokompozitlerde mekanik alaşımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı.....	76
Şekil 3.22. ZA27/Grafen nanokompozitlerde artan Grafen takviyesine göre sertlik Değeri	77
Şekil 3.23. ZA27/B ₄ C nanokompozitlerde artan B ₄ C takviyesine göre sertlik değeri	79
Şekil 3.24. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerde artan B ₄ C takviyesine göre sertlik değeri	80
Şekil 3.25. ZA27/Grafen nanokompozitlerde artan Grafen takviyesine göre çekme mukavemeti	81
Şekil 3.26. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri (a) ZA27, (b) ZAG-0,125-0h , (c) ZAG-0,5-0h. , (d) ZAG-1-0h, (e) ZAG-2-0h, (f) ZAG-3-0h	82
Şekil 3.27. ZA27/B ₄ C nanokompozitlerde artan B ₄ C takviyesine göre çekme mukavemeti	83
Şekil 3.28. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri.....	84
Şekil 3.29. ZA27/B ₄ C Nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri	85
Şekil 3.30. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri	86
Şekil 3.31. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 1N yük altında ağırlık kayıpları	87

Şekil 3.32. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 2N yük altında ağırlık kayıpları.....	89
Şekil 3.33. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 5N yük altında ağırlık kayıpları.....	90
Şekil 3.34. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 10N yük altında ağırlık kayıpları.....	90
Şekil 3.35. 1 saatlik MA yapılmış ZA27/Grafen nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki SEM ve EDS analizleri: (a–b) ZAG-0,5-1h; (c–d) ZAG-1-1h; (e–f) ZAG-2-1h; (e–f) ZAG-3-1h	91
Şekil 3.36. 0 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları.....	92
Şekil 3.37. 1 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları.....	93
Şekil 3.38. 4 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları.....	94
Şekil 3.39. 1 saatlik MA yapılmış ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki SEM görüntüleri: (a) ZAB-0,125-1h; (b) ZAB-0,25-1h; (c) ZAB-0,5-1h; (d) ZAB-1-1h; (e) ZAB-2-1h; (f) ZAB-3-1h.....	94
Şekil 3.40. 0 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları	95
Şekil 3.41. 1 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları	96
Şekil 3.42. 1 saatlik MA yapılmış ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki 200 X büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,125-1h; (b) ZAGB-0,25-1h; (c) ZAGB-0,5-1h; (d) ZAGB-1-1h; (e) ZAGB-2-1h; (f) ZAGB-3-1h	97
Şekil 3.43. 0 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	98
Şekil 3.44. 1 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	99
Şekil 3.45. 4 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	102
Şekil 3.46. 1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAG-0,25-1h; (b) ZAG-0,5-1h; (c) ZAG-1-1h; (d) ZAG-3-1h	102
Şekil 3.47. 0 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin potansiyodinamik	

	polarizasyon eğrileri	103
Şekil 3.48.	1 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	103
Şekil 3.49.	4 saatlik MA yapılan ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	106
Şekil 3.50.	1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAB-0,125-1h; (b) ZAB-0,25-1h; (c) ZAB-0,5-1h; (d) ZAB-1-1h; (e) ZAB-2-1h; (f) ZAB-3-1h;	106
Şekil 3.51.	0 saatlik MA yapılan ZA27 ve ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	107
Şekil 3.52.	1 saatlik MA yapılan ZA27 ve ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	108
Şekil 3.53.	1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,25-1h; (b) ZAGB-0,5-1h; (c) ZAGB-1-1h; (d) ZAGB-2-1h; (e) ZAGB-3-1h.....	111
Şekil 3.54.	1 saatlik MA yapılan ZA27 ve ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	111
Şekil 3.55.	0 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,125-0h; (b) ZAGB-0,25-0h; (c) ZAGB-0,5-0h; (d) ZAGB-1-0h; (e) ZAGB-2-0h; (f) ZAGB-3-0h.....	112
Şekil 3.56.	1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,25-1h; (b) ZAGB-0,5-1h; (c) ZAGB-1-1h; (d) ZAGB-2-1h; (e) ZAGB-3-1h.....	113

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Metal matris kompozit malzemeler ve uygulama alanları	3
Tablo 1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Bazı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri	6
Tablo 1.3. Çinko –Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikler.....	7
Tablo 1.4. Çinko –Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri	8
Tablo 1.5. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramındaki Önemli Dönüşümler.....	9
Tablo 1.6. Tek Tabakalı Grafenin Genel Özellikleri.....	12
Tablo 1.7. Bor Karbürün Genel Özellikleri.....	14
Tablo 1.8. Toz Metalurjisi Tarihindeki Önemli Gelişmeler	18
Tablo 2.1. ZA27 Alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık)	48
Tablo 2.2. Nanokompozit ve hibrit nanokompozit bileşimlerinin adlandırılması.....	49
Tablo 3.1. ZA27/Grafen nanokompozitlerin gözenek miktarları	74
Tablo 3.2. ZA27/ B ₄ C nanokompozitlerin gözenek miktarları	75
Tablo 3.3. ZA27/Grafen/ B ₄ C nanokompozitlerin gözenek miktarları	77
Tablo 3.4. ZA27/Grafen nanokompozitlerin sertlik değerleri.....	78
Tablo 3.5. ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin sertlik değerleri	80
Tablo 3.6. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin sertlik değerleri	81
Tablo 3.7. ZA27/Grafen nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri	101
Tablo.3.8. ZA27/B ₄ C nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri	105
Tablo.3.9. ZA27/Grafen/B ₄ C hibrit nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri	110

SEMBOLLER DİZİNİ

Al : Alüminyum

Zn : Çinko

Gr : Grafen

B₄C: Bor karbür

MA : Mekanik alaşımlama

TM : Toz metalurjisi

Tk : Takviye

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

MMK : Metal matrisli kompozit

MMNK : Metal matrisli nanokompozit

XRD: X-ışınları difraktometresi

d₅₀ : Ortalama toz boyutu

Hb : Brinell sertlik değeri

µm : Mikrometre

MPa : Mega paskal

N : Newton

mgr : Mili gram

I_{kor} : Korozyon akımı

E_{kor} : Korozyon potansiyeli

mpy : Korozyon hızı

ZAB : ZA27/B₄C

ZAG : ZA27/Grafen

ZAGB: ZA27/Grafen/ B₄C

ZAG-0,125-0h : 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,25-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,5-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-1-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-2-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-3-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,125-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,25-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,5-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-1-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-2-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-3-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,125-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,25-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-0,5-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-1-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-2-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAG-3-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen takviyeli ZA27/Grafen nanokompoziti

ZAB-0,125-0h : 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,25-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,5-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-1-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-2-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-3-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,125-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,25-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,5-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-1-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-2-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-3-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,125-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,125 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,25-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,25 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-0,5-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %0,5 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-1-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %1 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-2-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %2 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAB-3-4h: 4 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 B₄C takviyeli ZA27/B₄C nanokompoziti

ZAGB-0,125-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,125 B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-0,25-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,25 B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-0,5-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,5 B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-1-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %1 B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-2-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %2 B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-3-0h: 0 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %3 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-0,125-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,125 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-0,25-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,25 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-0,5-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %0,5 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-1-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %1 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-2-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %2 B₄C takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

ZAGB-3-1h: 1 saatlik MA yapılan ağırlıkça %3 Grafen ve %3 takviyeli
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompoziti

1. GENEL BİLGİLER

1.1.Giriş

1950’li yıllardan itibaren, teknolojinin çok hızlı gelişmesi neticesinde geleneksel malzemelere oranla daha üstün ve belirgin özelliklere sahip yeni malzemeler üretilmeye hızlı bir şekilde başlanılmıştır. Araştırmacı mühendis ve tasarımcılar özellikle havacılık, uzay, savunma, elektronik ve tıp alanlarındaki gelişmeler doğrultusunda ortaya çıkan malzeme ihtiyacını karşılamak için çalışmalar yürütmektedirler. Otomotiv, savunma ve havacılık gibi sektörlerin ihtiyaç duyduğu malzemelerin özelliklerine ulaşmak geleneksel metal ve alaşım malzemelerle mümkün olmamış ve yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur [1].

ZA27 alaşımlarının üstün özellikleri, araştırmacılara; farklı takviye malzemeleri kullanılarak, daha iyi mekanik ve tribolojik özelliklerin elde edilmesi için bu alaşımların güçlendirilmesi konusunda ilham vermiştir. Sonuç olarak, son yıllarda, ZA esaslı metal matrisli kompozitler (MMK), aşınma direnci yüksek ve daha hafif malzemeler olarak kullanılmaktadır. Ayrıca monolitik alaşımlarla kıyaslandığında sahip oldukları avantajların daha fazla olması sebebiyle dikkat çekmektedir.

İki veya daha fazla türde takviye içeren ortak bir metal matrisden oluşan kompozit malzemeler hibrit MMK malzemeler olarak adlandırılırlar. Diğer bir tanımla, hibrit MMK malzemeler, en az iki veya daha fazla farklı cins metal matris veya takviye elemanı içeren kompozitlerdir. Hibrit kompozit malzemeler iki fonksiyonlu kompozitler olarak da isimlendirilebilir. Bu malzemelerin özelliklerinin kullanılmadan önce optimize edilmesi gerekir. Örneğin, bir malzeme yüksek sıcaklıkta kullanılacaksa; o malzemenin, hem yüksek sıcaklıkta kullanım esnasında yük taşıma kabiliyetinin iyi olması aynı zamanda da uzun süre kullanılabilme özelliklerine sahip olması gerekir. Bunu amaç edinerek, ilk adım olarak malzemenin yüksek mukavemet kazanması, daha sonra da bu mukavemetini kaybetmemesi beklenir. İstenen bu durumun elde edilebilmesi için mikro yapısı iki işlevli olarak üretilmelidir. Hibrit kompozitlerin üretilme amacı, malzemelerin, istenilen tasarıma uygun olarak özelliklerini iyileştirmek için bir bileşenin olumsuz etkisini farklı bir bileşen ilavesiyle dengelemektir. Örneğin;

aşınma ortamında çalışan ve aynı zamanda yüksek ısı iletimi istenen bir bölgede bir MMK malzeme kullanılmak istenirse, malzemenin yüzey ısınmasını ve buna paralel olarak oksitlenmesini ve yük taşıma kabiliyetinin kaybolmasını engellemek gerekir. Bunun için en etkili yöntemlerden biri metal içine hem sürtünmeyi azaltacak bir bileşen ilavesi hem de yük taşıma kabiliyetini arttırıcı bir takviye fazı ilave etmektir [2].

Son yıllarda bakıldığı zaman, kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmaların büyük bir çoğunluğunu nano boyutlu ve/veya takviye fazı içeren nano kompozitlerin oluşturduğu görülmektedir [3]. Nanokompozitler, mikro kompozitlerle kıyaslandığında, daha üstün süneklilik gösterdiğine dikkat çekilmiş ve sünekliliğin çatlak ilerlemesini ertelemesinden dolayı bu durumun parçanın kullanım ömrünü arttıracağı belirtilmiştir. Bunun yanında, kullanılan nano-boyutlu parçacıkların yüzey alanı ve boy/en oranı değerleri çok yüksek seviyelerde olduğu için bu kompozitlerin mekanik, yanmazlık, ısıl ve bariyer özellikleri başarılı bir şekilde geliştirilebilmektedir [4].

1.2.Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler özellikle alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi hafif metal ve alaşımların matris işleviyle; karbon, bor ve diğer bazı çeşit metallerin elyaf, parçacık, plakacık, kıl-kristal (whisker) yapısında takviye fazını oluşturması ile meydana gelir. Bu karma malzemeler daha üstün mukavemet, aşınma, korozyon ve sertlik özellikleriyle nükleer güç ekipmanlarında, gaz türbinlerinde, uzay-havacılık, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılırlar [5].

Tablo 1.1. Metal matris kompozit malzemeler ve uygulama alanları [6]

Kompozit malzemeler	Endüstri	Uygulama alanları
B/ Al, SiC_w/ Al, Gr/Al Cam/ epoksi, C/ epoksi B/ epoksi, kevlar/ epoksi	Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar, döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları
Al₂O₃/ Mg, Gr/ Al, Gr/Mg B/ Al, Al₂O_{3w}/Al, SiC_w/ Al, B/ Al, Al₂O_{3p}/Al, Gr/ Al, SiC_p/ Al	Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları
B/ Al, B/ Mg, Gr/ Mg	Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları
Kevlar/ epoksi SiC_p/ Al, SiC_w/ Al SiC_w/ Al, B/ Al	Otomotiv	Gövde parçaları, tampon , aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları
Kevlar/ epoksi, Cam/ epoksi	Gemi	Gemi teknesi, güvertesi
Cam/epoksi, Karbon/epoksi	Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar
B/ epoksi, C/ epoksi B/ Al, Gr/ Al, SiC_w/ Al B/ Al, Gr/ Al, SiC/ Al	Spor	Oltalar, golf sopaları, yüzme havuzları, Tenis raketleri, Bisiklet ve motosiklet çerçevesi

Deneyisel çalışmalara bakıldığında çok farklı türlerin kullanıldığı göze çarpar. Yaklaşık olarak son 50 yıldır MMK'ler pek çok araştırmada yer almış ve literatürde çok takdir toplamıştır. Ancak bunların optimum kullanım şartlarının belirlenmesinde ve pratikte kullanılmasında temel bazı şartlar aranır. Bu şartlar aşağıda verilmiştir:

- a) Yüksek elastiklik modülü

- b) Yüksek mukavemet
- c) Yüksek tokluk ve darbe özellikleri
- d) Yüksek elektrik ve termal iletkenlike) Isıl şoklar ve sıcaklık değışikliklerine karşı düşük hassasiyet ve iyi sürünme direnci [7]

1.2.1. Metal Matrisli Kompozitler İçin Matris Malzemeleri

Matris malzemeleri takviye elamanını sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan sürekli fazı meydana getiren ana yapı malzemesidir ve takviye elemanlarını bir arada tutarak birkaç kritik fonksiyonu da yerine getirirler. Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparlarken takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korurlar. Takviye elemanlarından kırılğan çatlakların yayılmasını da engellerler ve kayma, basma, akma, sürünme, dielektrik ve termo mekanik özellikleri belirlerler. Kompozit malzemelerde matrinden beklenen özellikler başta hafiflik olmak üzere korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye elemanı ile uyumluluğudur [8]. Metal matrisler yüksek dayanımlı, yüksek modüllü, yüksek tokluk ve darbe dayanımı özelliklerine sahip ve sıcaklık değışimlerinden etkilenmeyen yapıya sahip malzemelerdir. Ayrıca atmosfer şartlarına karşın korozyon dayanımları oldukça yüksektir [9]. Kompozit malzemelerde metal matris olarak düşük yoğunluklu, tokluk ve mekanik özellikleri iyi olan hafif metaller ve alaşımlar kullanılmaktadır. En yaygın metal matris malzemesi olarak; alüminyum (Al) ve alaşımları, Çinko-alüminyum (ZA) alaşımları titanyum ve alaşımları ile magnezyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Bunların dışında nikel, bakır ve gümüş de kullanılmaktadır [9,10].

1.2.2. Zn-Al Matris Malzemesi

Zamak alaşımları olarak bilinen alüminyum çinko pres döküm alaşımları ilk kez ticari olarak 1920'li yıllarda dekoratif ve yapısal amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Zamak 2, Zamak 3 ve Zamak 5 olarak da bilinen bu alaşımlar iyi dökülebilirlik, düşük ergime sıcaklığı ve düşük maliyetli üretim özellikleri nedeniyle özellikle basınçlı döküm yöntemiyle üretilmede tercih edilmektedir. Diğer pek çok avantaja sahip olan Zamak alaşımları bu özellikler doğrultusunda yaygın bir kullanım alanına hitap etmektedirler [11].

1960'lı yıllarda plastik malzemelerin ortaya çıkması ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olması Zamak alaşımları kullanım alanlarını daraltmıştır. Ticari piyasadaki daralma ve çinko endüstrisindeki gelişmeler Uluslararası Kurşun Çinko Araştırma Birliği'nde yeni bir araştırma programının doğmasına neden olmuştur. ILZRO (International Lead Zinc Organization) adı altında kurulan bu organizasyon, yüksek sürünme dayanımına sahip iki yeni alaşımın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu program çerçevesinde, bu iki yeni alaşımın özellikleri iyileştirilerek, ILZRO-12 ve ILZRO-16 olarak adlandırılmıştır [12]. Bu alaşımlar içerisinde ILZRO 16'nın sürünme dayanımı daha yüksek olmasına rağmen, gerek ekonomik olmaması gerekse sıcak kamara yöntemiyle dökülebilir olmaması, bu alaşımın kullanım alanını daraltmıştır. Bunun yanında ILZRO-12 alaşımının mekanik özelliklerinin, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen Zamak alaşımlarından üstün olması, ZA12 adı altında bu alaşımın doğmasına neden olmuştur. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar geliştirilerek devam etmektedir [11].

1980'li yıllarda Noranda Research Center iki yeni döküm alaşımı ZA-8 ve ZA-27' i geliştirmiştir. İyi döküm özelliklerine sahip olan bu alaşımlar çok hızlı döküm hızına sahip olan basınçlı döküm yöntemi ile kolaylıkla dökülebilmeleri sağlanmıştır. Bu alaşımlar kum döküm, santrifüj döküm ve kokil döküm yöntemleri ile dökülebilmektedir. Fiziksel ve mekanik özelliklerinin yüksek olması bu alaşımların kullanım alanlarını genişletmektedir. Ayrıca Zamak alaşımlarının normal Zn döküm alaşımları ile kıyaslandığı zaman %50 daha fazla çekme dayanımı ve daha yüksek sürünme dayanımına sahip olması da bu alaşımların tercih edilmelerine sebep olmaktadır. Zamak alaşımları, alüminyum alaşımlarına göre daha düşük sıcaklıkta eriyip, iyi akışkan özelliğinden dolayı flakslama ve gaz gidermeye gerek duymamaktadır. Daha sert ve sağlam olan bu alaşımların sürünme dirençleri de alüminyum alaşımlarına göre daha yüksektir. Levha haline getirilebilme kabiliyeti alüminyumdan daha yüksektir [13].

Tablo 1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Bazı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri [14]

Alaşım	Bileşim oranı (% ağırlık)						
	Al	Cu	Mg	Fe	Pb	Ni	Zn
Zamak 3	3,5-4,3	0,25	0,02-0,05	0,1	0,005	-	Kalan
Zamak 5	3,5-4,3	0,75-1,25	0,03-0,08	0,07	0,005	-	Kalan
Zamak 7	3,5-4,3	0,25	0,005-0,02	0,1	0,003	0,005-0,02	Kalan
ZA8	8,0-8,8	0,8-1,3	0,015-0,03	0,07	0,004	-	Kalan
ZA12	10,5-11,5	0,5-1,25	0,015-0,03	0,1	0,004	-	Kalan
ZA27	25,0-28,0	2,0-2,5	0,01-0,02	-	0,004	-	Kalan

1.2.2.1. Zn-Al Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri Tablo 1. 3' de verilmiştir. ZA alaşımlarının yoğunlukları SAE-660 bronz, SAE-40 pirinç ve kır dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yoğunluklarından daha düşük olup, özgül mukavemetleri bu malzemelerden daha yüksektir. Bu nedenle ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda bu alaşımlar tercih edilmektedir. Ayrıca yoğunluğun azalması birim maliyeti de düşürmektedir.

Tablo 1.3. Çinko –Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikler [14]

Alaşım	Çinko –Alüminyum esaslı alaşımların fiziksel özellikler				
	Yoğunluk (kg/m ³)	Katılma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m°C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)
Zamak 3	6600	387-381	27,4	113	27
Zamak 5	6700	386-380	27,4	109	26
Zamak 7	6600	387-381	27,4	113	27
ZA8	6300	404-375	23,3	115	28
ZA12	6000	432-377	24,2	116	28
ZA27	5000	484-376	26,0	126	30
SAE-40 pirinci	8500	1010-855	18	72	15
SAE-660 bronz	8830	975-855	18	59	12
Kır dökme demir	7300	1260-1090	11,9	45	6

1.2.2.2. Zn-Al Alaşımların Mekanik Özellikleri

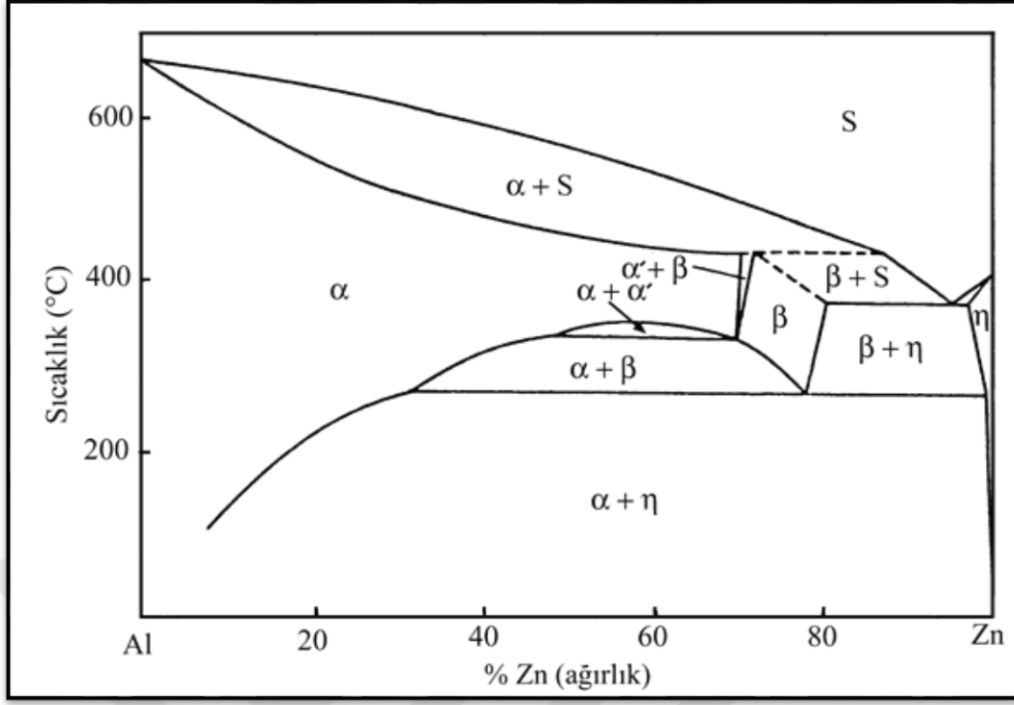
Tablo 1.4. incelendiği zaman ZA27 alaşımının çekme mukavemeti ve yorulma dayanımı en yüksek olduğu görülmektedir. ZA alaşımlarının ergime sıcaklığının düşük olması, döküm maliyeti açısından avantaj sağlarken; alaşımların sıcaklığa duyarlı hale gelmesine neden olmaktadır. Sıcaklık arttıkça bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri düştüğü için ZA27 alaşımını 120 °C, ZA8 ve ZA12 alaşımlarını 90 °C altındaki sıcaklıklarda kullanılmaları tavsiye edilir [14].

Tablo 1.4. Çinko –Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri [14]

Alaşım	Çinko –Alüminyum esaslı alaşımların Mekanik özellikleri					
	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD)	Yorulma dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)
Zamak 3	283	10	82	48	58	-
Zamak 5	331	7	91	56	65	-
Zamak 7	283	13	80	47	58	-
ZA8	221-255	1-2	80-90	103	20	12,4
ZA12	310-345	1-3	90-105	103	25	12
ZA27	400-440	3-6	110-120	173	47	10,9
SAE-40 pirinci	255	30	60	76	15	12
SAE-660 bronz	240	20	65	90	15	11,5
Kır dökme demir	214	-	210	97	-	13-16,4

1.2.2.3. Zn-Al İkili Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1.1.'de verilmiştir. Bu diyagramda alüminyumca zengin faz bölgesini α , çinkoca zengin faz bölgesinde η göstermektedir [15]. Diyagrama bakıldığında zaman alüminyum içerisinde bulunan çinko katı çözümleri %83 Zn oranına kadar uzanarak α , α' ve β olarak adlandırılan değişik faz bölgeleri meydana getirmektedir. Bahsi geçen α ve α' fazlarının kafes parametrelerinin birbirine oldukça yakın olmasından dolayı bu fazlar arasındaki sınır tam olarak belirlenememiştir. Yavaş soğutmanın sonucu olarak bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşmektedir [12].



Şekil 1.1 İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [14]

Tablo 1.5. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramındaki Önemli Dönüşümler [12]

Dönüşüm	Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik $S \leftrightarrow \beta + \eta$	95	382
Ötektoid $\beta \leftrightarrow \alpha + \eta$ $\alpha / \alpha' \leftrightarrow \alpha + \beta$	78 52	276 340
Peritektik $\alpha + S \leftrightarrow \beta$	71.6	443

1.2.2.4. Zn-Al Alaşımlarda Korozyon ve Aşınma

ZA alaşımlarının korozyon dirençleri çinko alaşımlarının korozyon dirençlerinden yüksek, alüminyum alaşımlarının korozyon dirençlerinden ise daha düşüktür. ZA8 ve ZA12, saf çinko ve Zamak 3 alaşımından daha yüksek korozyon direncine sahiptir. ZA alaşımlarının yüzeyinde oluşan pasif film tabakası alaşımı ortamın korozif etkilerinden

korumaktadır. Normal şartlarda yeterli olan pasif film tabakası şartların daha ağır kaldığı durumlarda yetersiz kaldığından korozyondan koruma için kromatlama, elektro kaplama, boyama veya çinko anotlama gibi koruyucu kaplama yapılır. ZA alaşımlarının diğer bir mühendislik özelliği de, yatak ve aşınma özelliklerinin endüstrideki diğer yatak malzemelerine kıyasla daha üstün olmasıdır. Genellikle yatak uygulamaları için ZA12 ve ZA27 alaşımları diğer alaşımlara göre özellikle kuru ve yağlı aşınma ortamlarında çok üstün performans gösterirler. Bu alaşımlar daha düşük sürtünme katsayısına, daha iyi yük taşıma kapasitesine, daha düşük çalışma sıcaklıklarına ve daha geniş hidrodinamik yağlama oranına sahiptir. Özellikle % 2 bakır içeren ZA alaşımlarının çok iyi aşınma özelliklerine sahip olduğu ve bunun nedenin boyutsal kararsızlıkların ortadan kaldırılması için uygulanan ısıtma işlemi sonucu meydana gelen çok fazlı yapı ile yatak yüzeyinde oluşan çinko oksit ve alüminyum oksitten kaynaklandığı söylenmektedir. Alüminyum oksidin sertliği alaşımın sertliğinden büyük olduğu için aşınma direnci de yüksektir. Çinko oksit ise çok daha yumuşak olup yatak mil arasında bir sıkışma olması halinde yatağı yağlama görevi görür [16].

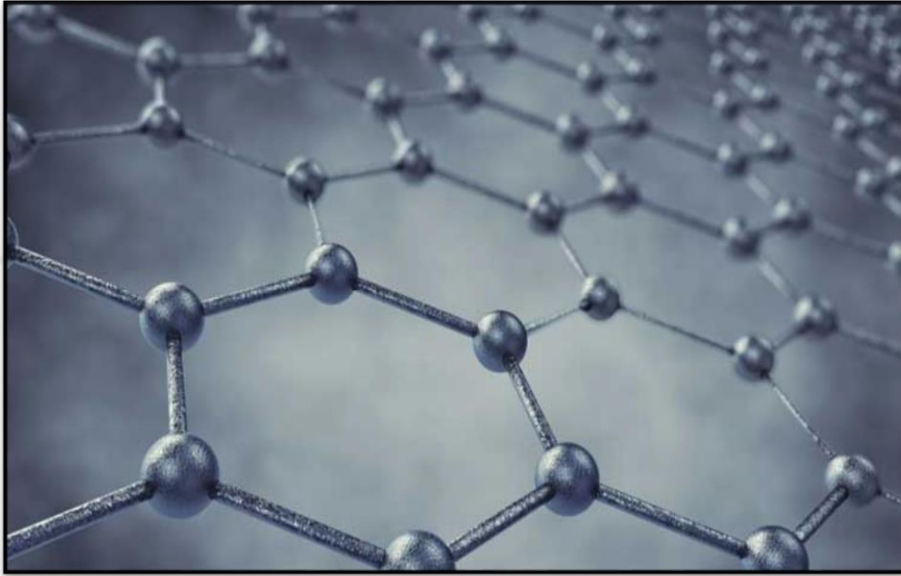
1.2.3. Metal Matrisli Kompozitler İçin Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, matris malzemesi ile uyumluluk, rijitlik, mukavemet ve yoğunluk değerleri açısından üstün bir birleşim oluşturan seramik malzemelerdir. Bu seramik malzemeler fiber, partikül ve visker formda olup, oksit, karbür, nitrür ve borür olarak kullanılabilir. Bunların yanında, tungsten ve çelik fiberler gibi metalik malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilir [17].

1.2.3.1. Grafen (Gr)

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş olduğu haldeki grafen formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini teşkil etmesinin yanında, grafene birçok olağanüstü özelliklerini de kazandırmaktadır. Elektronlar bu tek atom kalınlığındaki karbon tabakası içerisinde sanki hiç kütleleri yokmuşçasına hızlı hareket etmektedir. Grafen bilinen en ince malzeme olmasının yanında aynı zamanda en güçlü malzemedir. Şekil 1.3'de ki grafiklerde görüldüğü gibi çelikten 100 kat daha güçlü ve bilinen en iyi termal iletkenidir [18]. Grafen takviyeli kompozitlerle ilgili yapılan çalışmalar grafen

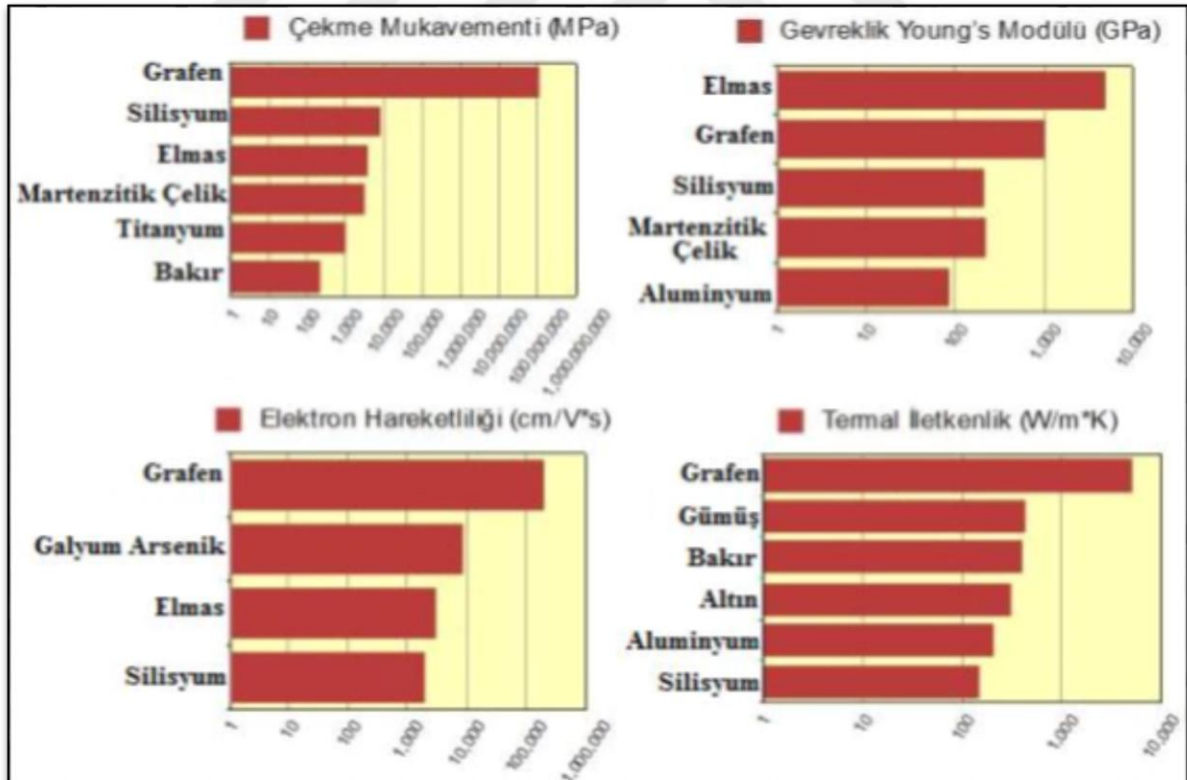
nanolevhaların grafen partiküllerine göre daha yüksek iletkenlik sağladığını ortaya koymuştur [19]. Bunun nedeni nanolevhaların iletim köprüsü oluşturma yeteneğinin grafen partiküllerine göre daha iyi olmasıdır [20]. Ayrıca termal iletkenlik yönünden grafen bakırdan daha iyidir. Bu özellik sayesinde maddenin kolayca ısı dağıtım imkanına olanak sağlar ve polimerin içine % 1 oranında grafen karıştırıldığında grafen, polimeri iletken hale getirmektedir. Buna ek olarak su ıslahı, petrol sızıntısı temizliği konularında da grafenin faydalı olabileceği öngörülmektedir. Son yapılan çalışmalar göstermiştir ki, grafenin 600/(m.k) termal iletkenliği olduğunu kanıtlamıştır. Grafenin 2630 1 m⁻¹ özgül yüzey alanı, karbon nanotüpe göre 1315 m² gr⁻¹ miktarına göre çok daha fazla avantajlı olduğu belirlenmiştir. Bu sayede malzeme daha fazla enerji toplama potansiyelinde olduğu anlamına gelir [21].



Şekil 1.2. Grafenin bal peteği şeklindeki kristal yapısı

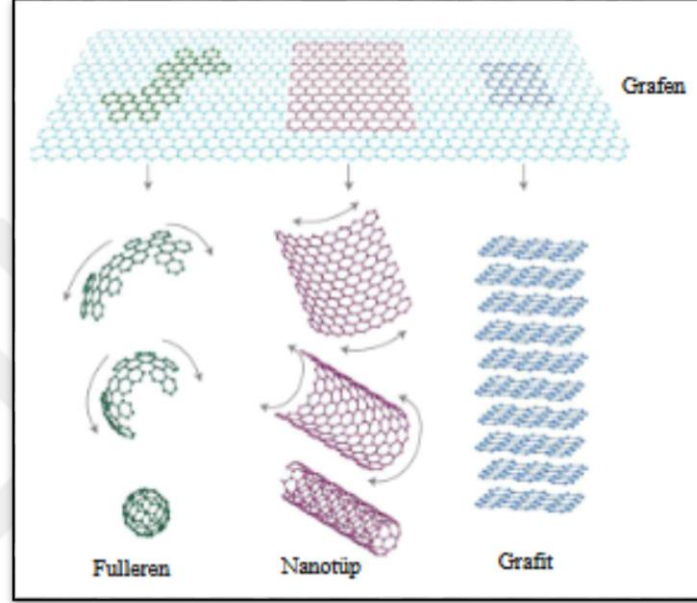
Tablo 1.6. Tek Tabakalı Grafenin Genel Özellikleri [22]

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp^2
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Safılık derecesi (%)	99
Kütleesel (bulk) yoğunluk (g/cm^3)	~ 0.3
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2.25
Kalınlık (nm)	$\sim 1-2$
Yüzey alanı (m^2/g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci	-75 $+200$ °C arasında özellikleri değişmiyor.
Termal iletkenliği ($WK^{-1}m$)	4840-5300
Elektron hareketliliği $cm^2/(V.s)$	$\sim 2.5 \times 10^5$
Elastisite modülü (TPa)	~ 1



Şekil 1.3. Grafenin Diğer Metallerle Karşılaştırması [18]

Yakın gelecekte grafenin en önemli kullanım alanlarından birisi olarak yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin geliştirilmesi olarak görülmektedir. Alüminyum, titanyum, magnezyum gibi matris malzemelerine grafen takviyesi yapılarak otomotiv alanı başta olmak üzere, hızlı tren, gemi, uçak, uzay, havacılık ve savunma sektöründe kullanılacak yeni nesil kompozitler üretilmektedir [23].



Şekil 1.4. Karbon Esaslı Malzemeler [23]

1.2.3.2. Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür ilk defa 1858 yılında bulunmuş olup; 1883'te Joly ve 1894' te Moissan B₃C ve B₆C isimli bileşiklerini sırasıyla hazırlamış ve tanımlamışlardır. Stokiyometrik bir bileşim olan B₄C, 1934' te bulunmuş ve kullanılmıştır. Ardından çeşitli yazarlar tarafından B₄.0C-B₁₀.5C formülleri ortaya atılmıştır. 1950 yılından sonra bor karbürün yapı ve özellikleri üzerine çok çeşitli geniş çalışmalar yapılmıştır [24].

Tablo 1.7. Bor Karbürün Genel Özellikleri [25]

Mol Ağırlığı (g/mol)	55,25	
Ergime Sıcaklığı (°C)	~2450	
Teorik Yoğunluğu (g/cm ³)	2,52	
Renk	Siyah	
Kristal Yapısı	Rombohedral	
Latis Parametreleri	a (nm)	0,561
	b (nm)	-
	c (nm)	1,212
Elektriksel Direnç ($\rho \times 10^8 \Omega\cdot\text{m}$)	~1000	
Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/\text{K}$)	298 – 773 K	4,78
	773 – 1273 K	5,54
	1273 – 1773 K	6,02
	1773 – 2273 K	6,53
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m·K)	298 – 773 K	28,0
	773 – 1273 K	16,0
Micko Sertlik, Hv (GPa)	0,1 N	35,8±0,6
	1,0 N	31,5±1,0
Young Modülü, E (GPa)	427	
Poisson Oranı, ν	0,17 – 0,21	
Eğme Mukavemeti, $\sigma_{\text{eğme}}$ (MPa)	340	
Basma Mukavemeti, σ_{basma} (MPa)	1660	
Çekme Mukavemeti, $\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	73	
Kırılma Tokluğu, K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	2,9 – 3,7	

Bileşikler içerisinde en kararlılardan biri olan bor karbür, asit ve bazlarda kolay bir şekilde çözünmez. Sadece hidroflorik asit – sülfürik asit (HF – H₂SO₄) veya hidroflorik asit- nitrik asit (HF – HNO₃) karışımında uzun süre içerisinde yavaş yavaş çözülür. Bor karbür yüksek sıcaklıklarda birçok metal oksit ile reaksiyona girerek metal borür ile karbon monoksit açığa çıkartır. Bor karbür metalik sodyuma karşı 500°C sıcaklıkta oldukça dirençli olup, hidrojen ile 1200°C sıcaklıkta yavaşça aşındırılır. Bu sıcaklıklarda kükürt, fosfor ve azottan etkilenmez. Bor karbür, 1800 °C üzerinde azot ile tepkimeye girerek bor nitrür oluşturur [26]. B₄C yaklaşık 600°C ve üzerinde klor ile, 800°C üzerinde ise brom ile kolaylıkla tepkimeye girer. Bu tepkimeler bor halojenür üretmek için kullanılmaktadır.

Bor karbür, herhangi bir bozulma olmaksızın karbon monoksit (CO) atmosferinde kolayca ergitilebilmektedir, fakat karbon dioksit (CO₂) ile 600 - 750°C arasında tepkimeye girerek B₂O₃ ve CO oluşturmaktadır. Bor karbürün hava ortamında oksitlenmesi 500°C

sıcaklıkta başlar ve 800-1000°C sıcaklıklarda oldukça şiddetlenmektedir. Bununla birlikte oksidasyon hasarı büyük ölçüde parçanın yüzey alanına bağlıdır ve bor karbür tozları parça bor karbürlerden daha kolay ve çabuk oksitlenmektedir. Toz bor karbürlerde oksitlenme sıcaklığın yanında büyük ölçüde yüzey alanı ile ilişkili olup tane boyutu küçüldükçe oksidasyonun hem hızını ve şiddeti artmaktadır [27].

1.3. Nano Malzemeler

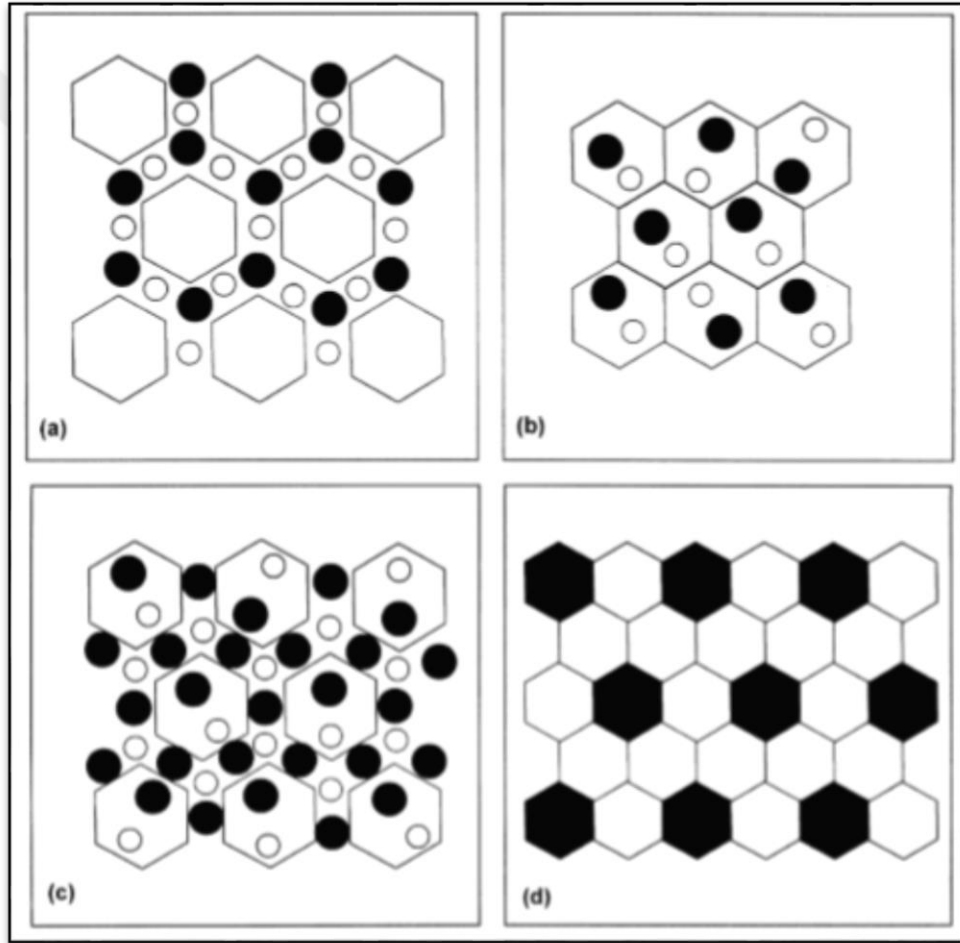
Çağımızda teknoloji kavramı sürekli gelişmekte olup daha dayanıklı ve işlevsel malzemelere duyulan ilgi günden güne artmaktadır. Nano parçacık takviyeli malzemeler, içerdikleri nano boyutlu yapılar sayesinde çok daha üstün özellikler kazanmaktadır. Teknolojide önemli potansiyele sahip olan nano teknoloji, özellikle sağlık, savunma, tekstil, enerji, elektronik ve bilişim teknolojileri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Nano parçacıkların özellikleri, boyutlarına bağlı olarak bir değişim göstermektedir. Nano parçacıkların en önemli özellikleri, hacimlerine bağlı olarak büyük bir yüzey alanına sahip olmalarıdır. Tane boyutlarının çok küçük olmasından dolayı, nano kristaldeki mikro yapıların büyük bir kısmı tane sınırlarındaki ara yüzeylerden oluşmaktadır. Diğer bir deyişle atomların büyük bir kısmı tane sınırlarında yer almaktadır. Büyük taneler içeren kristal yapılarla kıyaslandığı zaman nano kristalin malzemeler, daha yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek difüzyon hızı sergiler ayrıca toz metalürjisi üretiminde düşük sinterleme süresine olanak sağlar [28].

Nano malzemeler nano boyut ölçü modülasyonuna göre tabakalı veya lamelli, filamentli ve eş eksenli nano yapılar olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Taneler kristallerden meydana gelmişse malzeme nanokristalin olarak adlandırılır ve nano-kristalin yapılar nano yapı malzemelerin en yaygın olarak görülen türüdür. Fakat taneler yarı kristalin ya da amorf yapıdan oluşuyorsa bu yapılar nano camlar veya nano yarı kristaller olarak adlandırılır[28].

1.3.1. Nanokompozitler

Nanokompozit tanım olarak kompoziti oluşturan fazlardan en az birinin nano boyutta olduğu yeni bir malzeme çeşidi olarak tanımlanır. Nanokompozitler matris yapısına göre metal matrisli nanokompozitler, seramik matrisli nanokompozitler ve polimer matrisli

nanokompozitler olarak sınıflara ayrılabilirler. Mikro yapısına göre yapılan sınıflandırma, nanokompozitler tane içi, taneler arası, hibrit ve nano-nano kompozitler olarak dörde ayrılmaktadır.(Şekil 1.5). İlk üç sınıfta sadece takviye elemanı nano boyutlarda olurken son sınıfta hem matris hem de katkı elemanı nano boyutlardadır. Taneler arası nanokompozitlerde, nano boyutlarda olan takviye elemanı, mikron boyutta matris fazında tane sınırları boyunca dağılır. Tane içi nanokompozitlerde, takviye elemanı matris tanelerinin içinde bulunur, hibrit şekilli nanokompozitlerde ise takviye elemanı, hem matris taneleri içinde hem de tane sınırlarında bulunmaktadır [28].



Şekil 1.5. Nanokompozitlerin sınıflandırılması a)taneler arası, b)tane içi, c)hibrit d)nano/nano kompozitler [28].

Nanokompozitlere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Özellikle uzay, otomotiv ve savunma sanayileri gibi endüstri kollarında daha yüksek performans için duyulan ihtiyaç nanokompozit takviyeli malzemelerin geliştirilmesine sebep olmuştur.

1.3.1.1. Metal Matris Nanokompozitler

Katkı elemanlarının parçacık boyutu, MMK malzemelerin mukavemet ve sünekliliğinde önemli bir etkiye sahiptir. Mukavemet ve süneklilik artan partikül boyutuyla azalır. Bu sebepten dolayı seramik parçacık boyutundaki küçülme MMK malzemelerin mekanik özellikleri, parçacıkların mikron boyutundan nano boyutlara düşürülmesiyle daha da arttırılabilir. Bu şekilde nano boyutlu MMK malzemelere metal matrisli nanokompozit adı verilmektedir. Nanokompozitlerin deformasyon davranışı MMK malzemelerden belirgin şekilde üstündür. Nano malzemeler büyük miktarda yüzey alanından oluşmasından dolayı, tane sınırı aktivitesi mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Nanokompozitlerde istenilen özelliklerin elde edilmesinde önemli birçok etken vardır. Tane büyüklüğü kritik bir değerin altında olduğu zaman, dislokasyon yığılmaları meydana gelmez. Nanokompozitte istenilen mekanik özellikleri elde etmek için, nano takviye elemanları metal matris içerisinde homojen biçimde dağıtılmalıdır. Ayrıca seramik nano parçacıkların metal içerisinde homojen olarak dağıtılması oldukça zordur. Nano parçacıklar sıvı metalurjik işlemler sırasında kaba kümeler halinde aglomere olma eğilimindedir. Bu büyük yüzey alanlı nano parçacıkların zayıf ıslatma kabiliyetine sahip olmasından kaynaklanmalıdır. Bu durumda, eriyik içindeki nano seramik parçacıklarını homojen dağıtmak için yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar verimli olabilir. Ancak bu işlem hala gelişme aşamasındadır. Bu durumda homojen dağılım elde etmek için en uygun yöntem mekanik alaşımlama yöntemi olarak görülmektedir [28, 29, 30].

1.3.1.2. Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretilmesi

MMNK'lerin üretilmesinde farklı türden çeşitli matris ve takviye malzemelerinin kullanılması farklı üretim tekniklerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Üretim esnasında matrisin sıvı, katı veya buhar olmasına göre MMNK'lerin üretim yöntemleri aşağıdaki yöntemler gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemler:

1-Katı-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Difüzyonla Bağlama
- b) Toz Metalurjisi (TM)

2-Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Sıvı-Metal infiltrasyon

- b)Püskürtme
- c)Karıştırmalı döküm
- d)Kompo döküm
- e)Reaktif (In-situ) yöntemi
- f)Sıkıştırırmalı döküm
- 3-Buhar-Faz üretim yöntemleri
- a)Fiziksel Buhar çökeltme (PVD)

şeklinde sıranalabilir [31].

1.4. Toz Metalurjisi

T/M'nin çok uzun bir tarihi var olmakla birlikte ilk başlangıcı 5000 yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Birçok tarihi kaynakta bu metodun Yakın Doğu coğrafyasında başladığı anlaşılmaktadır. Orada; demiri ergitmeden karbonca zengin malzemelerle demir oksidi indirgeme yolunu geliştirmişlerdir. Oluşan bu “Yeni” malzemenin başlıca kullanım alanları silahlar, el aletleri ve süs eşyaları olmuştur. Bunun beraberinde geliştirilen bu teknoloji Avrupa, Hindistan ve Asya'ya yayılmıştır

Tablo 1.8. Toz Metalurjisi Tarihindeki Önemli Gelişmeler [32]

Tarih	Gelişme	Yer
M.Ö.3000	Alet yapımı için sünger demir	Mısır, Afrika ,Hindistan
M.S. 1200	Güçlendirilmiş platin taneleri	Güney Amerika
1781	Platin arsenik alaşımı	Fransa ,Almanya
1830	Metallerin sinterlenmesi	Avrupa
1900	Lamba telleri yapımı	Amerika
1920	Kendinden yağlamalı yataklar	Amerika
1940	Demir tozu teknolojisi	Avrupa
1970	Sıcak izostatik presleme	Amerika
1980	Toz enjeksiyon kalıplama	Amerika

Toz metalurjisi (TM), son şekle yakın geometride parça imal edilmesine ve ileri teknoloji alaşımlarının üretilmesine imkân sağlayan bir imalat yöntemidir. TM çeşitli metal ve seramik tozlarının üretilmesi, karakterize edilmesi, bu tozların mekanik deformasyonla

birleştirilmesi ve son ürüne dönüştürülmesini kapsamaktadır [33]. Bu dönüşüm başlıca, toz üretme, istenilen tozların homojen bir şekilde karıştırılması, toz karışımının kalıp içerisinde sıkıştırılması ve toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları için atmosfer kontrollü ve gerekli sıcaklıkta-sürede sinterleme işleminin yapılması basamaklarını içerir. Farklı boyut, tip, şekil ve sıkıştırılabilirlik özelliğine sahip tozların, % ağırlık oranlarının belirlenip homojen olarak karıştırılması, karışımın uygun ortamda sıkıştırılmasıyla istenilen şekle veya forma dönüştürülerek yoğunluk kazandırılması daha sonra mukavemet ve yoğunluğun artırılması için sinterleme yapılması esasları ile parça imal etme tekniği olarak nitelendirilmektedir. Tungsten, titanyum ve bu malzemelerin karbürleri ile birlikte alüminyum, nikel ve kobalt gibi metallere kompozit şeklinde üretimlerinde; çok sert, üstün mukavemet, aşınma ve korozyon dayanımı yüksek, üstün fiziksel ve mekanik özellikte malzemelerin üretiminde kullanılır. Farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesi ve bu sürecin ekonomik olarak sağlanması TM yöntemini cazip hale getirmiştir. Ayrıca, sahip olunan bu özellikler ile TM; yüksek verimlilik, düşük enerji ve kolay hammadde gibi özellikleriyle günümüz gereksinimlerini karşılar. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarına alternatif oluşturmaktadır [34,35]. TM uygulama alanları arasında karmaşık geometriye sahip parçaların ekonomik üretimine dayalı olması göze çarpmaktadır. Otomotiv endüstrisinde; yataklar, subap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi gibi parçalar TM yöntemi ile üretilmektedir. Gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, fonksiyonel tabakalı yapay kemikler, kontak alaşımları (bakır-krom) ve tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden kesici takımlar bunlara örnek olarak gösterilebilir [6].

1.4.1. Toz Metalurjisi Üretim Safhaları

1.4.1.1. Tozların Üretimi

Toz üretim yöntemi ile üretilen metal veya seramik tozlarının boyutu, şekli, saflığı, mikroyapısı, maliyeti ve diğer özellikleri değişmektedir. TM'nde kullanılan üretim yönteminin ekonomik olması ve üretilen tozun kullanım yerlerindeki ihtiyaçları karşılayacak özelliklere sahip olması gerekmektedir. Toz üretiminde, mekanik öğütme,

kimyasal ayrıştırma, elektrolitik biriktirme, sıvı ve gaz atomizasyonu gibi yöntemler kullanılır. Toz üretim yöntemleriyle farklı geometrik özelliklere sahip mühendislik tozları üretilmektedir. Bu geometrik özellikler; parçacık boyutu ve dağılımı, parçacık şekli, içyapısı ve yüzey alanı olarak sıralanabilir [33]. Parçacık boyutu dağılımının çok farklı şekilleri mümkündür. İki modlu dağılımda, maksimum miktara sahip belirli bir kritik boyut söz konusudur ve parçacık boyutları iki veya daha fazla dar bantlardan oluşur. Bu eğrilerin iki bandı arasında hiçbir parçacık bulunmamaktadır. Geniş dağılımda, hiçbir parçacık bu aralık dışındaki toz boyutlarına sahip değildir. Düzensiz dağılımda, nispeten geniş bir aralık söz konusu iken bu aralık içinde parçacık boyutu sürekli ve sonlu bir varyasyonu temsil etmektedir. Bu yüzden, parçacık boyutu dağılımı toz boyutunun bir ortalama değeri veya maksimum ya da minimum değerlerinin tam karakterizasyonu için gereklidir. Tozun şekli parçacıkların boyutluluğu ve yüzey alanı ile karakterize edilir. Pek çok toz parçacıkları eş eksenli olarak tanımlanan üç boyutludurlar. Küresel parçacıklar daha basit gösterilirken gözenekli parçacıklar yapısında bulunan poroziteler nedeniyle düzensiz parçacıklardan ayrılırlar. Çok sayıda bulunan gözenek miktarının artması şekil tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Toz şekilleri aynı olsa bile parçacık boyutları her bir toz için aynı olmayacaktır. Bu yüzden tozları tanımlarken boyut dağılımı ile birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Ortalama toz boyutunun ölçmek için çok sayıda method vardır [36].

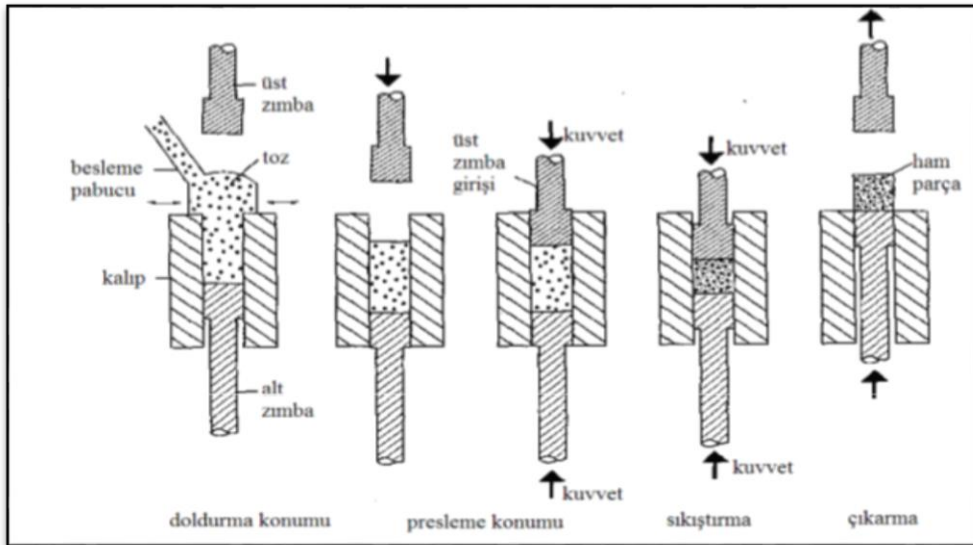
1.4.1.2. Tozların Karıştırılması

İki ya da daha fazla malzemeden oluşan tozlar ASTM B23 standartlarına göre karıştırılırlar. Parafin ve metalik stearit gibi yağlayıcılar %0,5-1,5 arasındaki oranlarda kullanılırlar. Karıştırma işleminde tozlar ve yağlayıcılar arasında homojen bir karışım elde edilir. Yağlayıcı kullanarak tozlar ile takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünme azaltılırken, daha düzgün bir yoğunluk dağılımına sahip parçalar elde edilir. Düzgün dağılım yapıldığında sinterleme esnasında atomlar difüzyonla taşınarak parçanın bütün bölgelerinde homojen bir kompozisyon sağlanmış olur. Alaşım (homojen karışım) sinterleme sırasında oluşur; konsantrasyon farklılıklarından kaynaklanan potansiyel kimyasal gradyant, atomların difüzyonu için itici kuvvet oluşturur [37]. Yağlayıcı kullanılmaması tozlar ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi artırdığından homojen olmayan basınç dağılıma sebep olur, sonuç olarak preslenen numunede gerilme farklılıkları

oluşur. Kompakt bünyesinde oluşan bu gerilme farklılıkları ise sinterleme esnasında distorsiyonlara neden olur. Kullanılan yağlayıcı miktarı %1,5'i geçerse sinterleme sırasında numune yüzeylerinde kabarcıklar oluşur ve bu durum yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler [35].

1.4.1.3. Tozların preslenmesi

Tozlar basınç uygulandığında önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak ve daha sonrada yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaştırılırlar. Yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Presleme esnasında, görünür yoğunluğun ham yoğunluğa dönüşmesi sıkıştırılabilirlik olarak adlandırılır. Parçacık boyutu sıkıştırılması oldukça önemli bir faktördür. Küçük parçacıkların görünür yoğunluğu düşük olup, çoğunlukla serttirler ve sıkıştırma esnasında hızlı bir pekleşmeye uğrarlar. Bu nedenlerden ötürü preslenmeleri oldukça zordur. Buna ilaveten küçük tozlar ve sünger tozlar kalıptan çıkartma esnasında daha fazla geri esneme yapacağından dolayı çatlak oluşturma ihtimalide yüksektir. Kalıpta presleme ile yüksek ham yoğunluğa sıkıştırılabilecek şekilde tasarlanmış tozlar genellikle yumuşak olup büyüktürler. Yüksek sertlik bütün presleme basınçlarında ham yoğunluğu düşürmektedir. Kuvvetli ve sert olan alaşımli tozlar, paslanmaz çelikler, takım çelikleri ve kompozitlerin preslenmesi için yüksek basınçlar gerekmektedir [38].

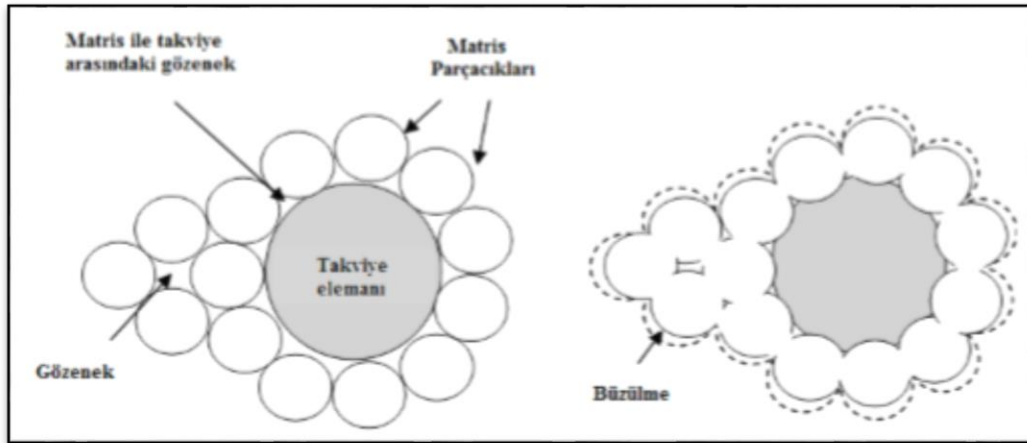


Şekil 1.6. Presleme işleminin basamakları [38]

1.4.1.4. Sinterleme

Karıştırılan tozların gözenekli bir şekilde sıkıştırılma işleminden sonra yüzey alanlarının küçülmesi ve temas noktalarının artması, buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesi ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı ile aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak adlandırılmaktadır. Sıkıştırılmış ham yoğunluktaki metal parçalar, mukavemeti düşük bir şekilde elde edilmektedir. Bu işlem sırasında beklenen mukavemet, kalıptan çıkarılma sırasında zorlamalara direnç göstermesidir. Bu nedenle, ham yoğunluktaki sinterleme, T/M ile üretilen parçalarına yoğunluk ve mukavemet kazandırmak amacıyla, ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklık noktasındaki uygulanan ısı işlemidir. Sinterleme işlemi, taneler arası temas noktalarının katı-hal bağına dönüşümü ile gerçekleşmektedir. İşlem sırasında nokta temas ile başlayan katı hal bağının gelişmesi ile devam eden süreçte çift-küre sinterleme modeli olarak devam etmektedir. Bu modelde, temas şeklinde olan tozların boyun büyümesi ile yeni tane sınırının oluşması ve iki toz parçacığının tek bir parça şeklinde birleşmesi gerçekleşmektedir [39].

Şekil 1.7’de MMK“lerin sinterleme esnasında takviye ve matrisdeki değişimleri göstermektedir. Matris tozlarının yüzey alanı azalırken büzülme olayı gerçekleşir. Sinterleme işlemi devam ederken porozitler küçülmekte, tane büyümesiyle takviye partikülleri etrafını matris tozları sarmaktadır [40].



Şekil 1.7. MMK“lerin sinterleme mekanizması [40]

1.5. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjiye sahip bilyeli değirmenler ile son derece homojen ve ince mikro yapılar elde etmek amacıyla toz parçacıklarının kuru, yaş, yüksek enerjili, bilyeli ve/veya çubuklu öğütme işlemleri ile soğuk kaynaklanması, kırılması ve tekrar kaynaklanmasını içeren bir toz metalurjisi (TM) tekniğidir [41]. Mekanik alaşımlama (MA) işlemi ilk olarak 1966 yılında John Benjamin ve arkadaşları (P.D. Merica Res. Lab. of the Nichel Comp Inco) tarafından geliştirilen bir yöntemdir. MA yöntemi ile ilk olarak, endüstriyel bir gereklilik olarak gaz türbin motoru parçalarının üretimi için oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş nikel esaslı süper alaşım üretilmiştir. MA denge dışı koşullar altında gerçekleştirilen üretim yöntemidir. MA, ekonomik ve önemli teknik avantajlar getiren basit ve çok yönlü bir teknolojidir [42].

1.5.1. MA'nın Avantajları

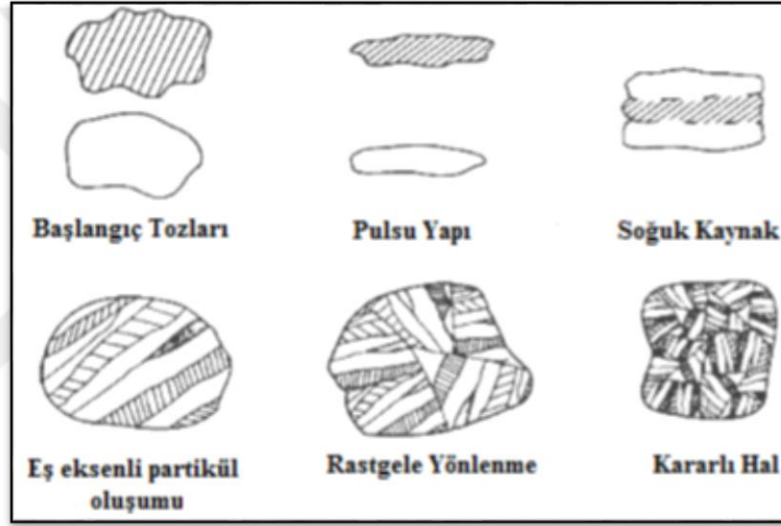
- 1.Süper korozyon dirençli alaşımları üretilebilmesi,
 - 2.Oldukça farklı ergime noktalarına sahip malzemelerden intermetalikler oluşturulabilmesi, 3.Üretilen kompozit tozların yapısında homojenlik elde edilmesi,
 4. Karmaşık şekilli ve hassas toleranslar dahilinde parça üretilebilmesi,
 - 5.Ergime derecesine yakın sıcaklıklarda çalışabilen malzemeler üretilebilmesi
 - 6.MA işlemi, bir katı hal işlemi olmasından dolayı, normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve/veya olanaksız olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesi,
 - 7-Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanması,
 - 8-Katı-sıvı-gaz şeklinde alaşımlama sırasında oksit, nitrür ve karbürlerin takviye edilebilmesi,
 - 9-Bir seferde oldukça fazla miktarda tozun üretilebilmesi ve alaşımlanması,
 - 10-Sinterleme ile birlikte kritik sıcaklıklarda ısıl işlem imkanının elde edilmesi
 - 11-Nano kristalli malzemelerin üretimine uygunluk
 - 12-İstenilen reaksiyonları oluşturması veya hızlandırması,
 - 13-Presleme ve sinterleme işlemleriyle %100'e yakın yoğunlukta parça üretilmesi.
- Bu yöntemin avantajları olarak kabul edilmektedir [43,44].

1.5.2. Öğütme Sistematiği

Mekanik alaşımlama sisteminde üç çeşit öğütme sistemi vardır; Sünek-Sünek sistem, Sünek-Gevrek sistem ve Gevrek-Gevrek sistem.

1.5.2.1. Sünek-Sünek Sistem

Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan tozlardan en az bir tanesi kaynaklaşmayı kolaylaştırmak amacıyla yumuşak olması şarttır. Mekanik alaşımlanan başlangıç tozları ve bu tozların alaşımlama boyunca deformasyon karakteristikleri Şekil 1.8’de gösterilmiştir.

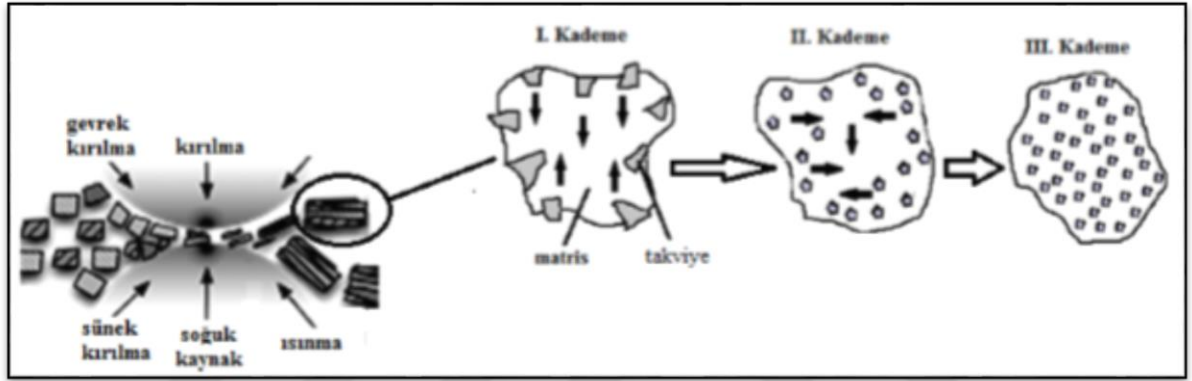


Şekil 1.8. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [42,45]

Öğütme işlemi sırasında bilyelerin birbirleriyle çarpışması sırasında bilyelerin merkezleri doğrultusunda arada kalan tozlar, darbe etkisiyle plastik deformasyona maruz kalırlar. Bunun sonucunda tozlarda ezilme olur ve tozlar lamelleşirler. Bu çarpışmalar esnasında arada kalan toza bir miktar darbe enerjisi yüklenir. Yüklenen darbe enerjisi sebebiyle toz parçacıkları levhalaşır, birbiriyle kaynaklaşır, kırılır ve tekrar kaynaklaşır. Bu darbe kuvveti toz parçacıklarını deformasyona uğratarak sertleşmelerine ve kırılmalarına sebep olur.

1.5.2.2. Sünek-Gevrek Sistem

Sünek-Gevrek sistemde ilk olarak sünek metal tozları bilye-toz-bilye çarpışmaları ile pulsu hale gelirken gevrek parçacıklar ise kırılırlar. Kırılan gevrek parçacıklar sünek bileşen içersine gömülürler. Gevrek bileşenler tabakalar arası boşluk boyunca yerleşirler. İlerleyen öğütme süreleri sonucunda tozlar deformasyon sertleşmesine uğrar tabakalar çoğalır ve daha küçük boyutlara inerler. Devam eden öğütme ile tabakalar daha da küçülür tabakalar arası boşluk artar ve gevrek parçacıklar eğer çözünebilir değilse düzenli olarak sünek matrise dağılırlar [46].



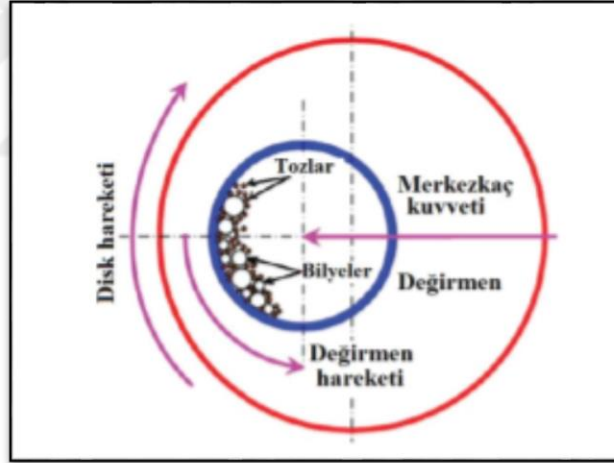
Şekil 1.9. Mekanik alaşımlamada sünek-gevrek öğütme sisteminin safhaları [46]

1.5.2.3. Gevrek-Gevrek Sistem

İki veya daha fazla gevrek malzemeden oluşan bir sistemde alaşımlamanın olması beklenmeyebilir. Çünkü sünek bileşenin olmaması herhangi bir kaynaklanmayı engeller ve bunun olmadığı durumda da alaşımlamanın olması beklenmez. Bununla beraber, Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlamanın olduğu da belirlenmiştir. Gevrek tozlar, öğütme sırasında parçalanır ve parçacık boyutları sürekli azalır. Bununla beraber çok küçük boyutlardaki toz parçacıklar sünek bir davranış gösterir ve daha sonra boyut azalması mümkün değildir. Bu ufalanma sınırı olarak adlandırılır. Gevrek malzemelerin öğütülmesi sırasında, malzeme transferine katkıda bulunan muhtemel mekanizmalar; sıcaklık artışı, hatasız yapıda mikro deformasyon, yüzey deformasyonu ve/veya öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim durumuyla oluşabilen plastik deformasyonu içerir [47].

1.5.3. Öğütücü Türleri

MA'nın önemli kısmını oluşturan eden öğütme işlemi, tane boyutunun küçültülmesi, harmanlama ve alaşımlama gibi evreleri kapsar. Bu aşamalarda amaca yönelik farklı öğütücüler kullanılır. Öğütücüler ve/veya değirmenler kapasiteleri, öğütme etkinlikleri, soğutma ve ısıtma gibi ek üniteleriyle farklılık gösterirler. MA için kullanılan öğütücü tiplerinden biri olan planet (gezegen) tip bilyeli öğütücülerdir. Bu öğütücülerin kapları gezegen benzeri hareket yaptıklarından dolayı adlarını da buradan almışlardır. Bu kaplar dönen bir taşıyıcı disk üzerine yerleştirilmiş ve özel bir mekanizma tarafından döndürülen bu disk üzerinde ve kendi merkezlerinde dönmektedirler. Hem taşıyıcı diskin oluşturduğu hem de kendi merkezinde dönmekte olan öğütücü kabın oluşturduğu merkez kaç kuvveti sebebiyle öğütme kabının içerisindeki ana malzeme ve öğütücü bilyeler hareketlenmektedir [42].



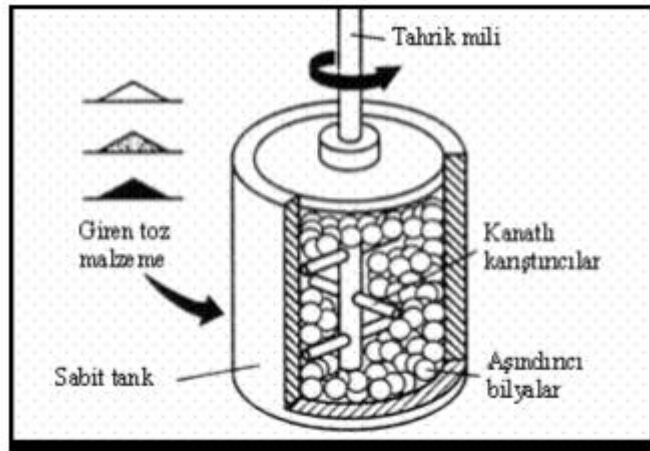
Şekil 1.10. Gezegen tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi [42].

Diğer bir öğütücü çeşitide SPEX tipi öğütücülerdir ve bu öğütücüler bir kerede yaklaşık 10-20 gr arasında toz öğütebilen ve laboratuvar çalışmaları için kullanılan öğütücülerdir. Şekil 1.11.'de SPEX tipi bir öğütücü görülmektedir. Bu türdeki değirmenlerin ortak özelliği numuneyi ve öğütme bilyelerini içeren bir kaplarının olmasıdır. Bu kaplar mengene ile sıkıştırılmış ve güvene alınmış ve 1200 d/d ortalama hızıyla üç yönde toz mikroyapısını incelterek dönmektedir [42,48].



Şekil 1.11. SPEX tipi bilyeli değirmen [42]

Yukarıda adı geçen öğütücü tiplerinden farklı olarak birde 0,5 kg ‘dan 40 kg kadar toz öğütebilen atritör tipi öğütücüler mekanik alaşımlama işleminde kullanılan öğütücüler vardır. Tipik bir atritör haznesi yarıya kadar küçük bilyelerle dolu, karıştırıcı kolları kendi eksenini etrafında dönen ve haznesinde atmosfer kontrolü sağlanabilen bir yapıya sahiptir. Karıştırıcı kolların bulunduğu mil döndükçe bilyeler metal tozlarına ve alaşımlama haznesinin iç cidarına çarparlar.



Şekil 1.12. Atritör değirmenin şematik gösterimi [48]

Bunlara ilaveten Ticari değirmenler ise, yukarıda bahsedilen diğer değirmenlerden çok daha büyük boyutlarda ve yüzlerce kilogram tozu tek zamanda öğütebilecek kapasitede değirmenler olup, kitlesel üretim için mekanik alaşımlamada bilye ağırlıkları 1250 kg'a kadar çıkabilmektedir [42]. Şekil 1.13'de kitlesel üretim yapan ticari değirmen fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 1.13. Kitlesel üretim yapan ticari değirmen [42]

1.5.4. Mekanik Alaşımlamada İşlem Parametreleri

- Değirmen tipi
- Öğütme kazan
- Başlangıç toz boyutu
- Öğütücü malzeme
- Bilye-toz oranı
- Öğütme atmosferi
- Öğütme süresi

- Öğütme hızı
- İşlem kontrol elemanları [42]

1.5.4.1. Değirmen Tipi

MA yapmak için çeşitli türlerde değirmenler bulunmaktadır. Bu değirmenler kapasitelerine, işlem hızlarına ve öğütme sıcaklığını değiştirerek işlemi kontrol etme ve tozların kirlenmesini azaltma kabiliyetine göre farklılıklar gösterirler. Toz çeşidine, toz miktarına ve gerekli olan son içeriğine bağlı olarak, uygun bir değirmen seçilebilir. Üretilen malzemenin aktif ve reaktiflik durumuna göre koruyucu ortam seçimi de çok önemlidir. Bütün bu değişiklikler değirmen her değirmen çeşidinde farklılık gösterir [41,49].

1.5.4.2. Öğütme Kabı

MA'da yüksek hızda dönen karıştırıcı kollar haznenin ve karıştırıcı kolların aşınmasına neden olmaktadır. Bu durum ise tozun kirlenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle öğütme haznesinin sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik ve rulman çeliği kullanılmaktadır [41,50].

1.5.4.3. Başlangıç Toz Boyutu

MA işleminde, başlangıç tozları 1 μm ile 200 μm arasında değişen boyutlarda, saf veya alaşım tozları kullanılır. Toz boyutu mekanik alaşımlamadaki en önemli parametrelerden biridir. Toz boyutu arttıkça MA süresi de artmaktadır. Bu durumda aşırı kirlenme ortaya çıkar ve bu durum ise yapı içerisinde istenmeyen farklı fazların ortaya çıkmasına neden olur [51].

1.5.4.4. Öğütücü Malzeme

Öğütme ortamı sert ve aşınmaya dayanıklı olan malzemeler olan takım çelikleri, temperlenmiş çelikler, paslanmaz çelikler, tungsten karbür, zirkonyum oksit, cam, çakmak

taşı gibi bilyeler kullanılır. İri bilyeler öğütme gücünü artırır fakat bilyeler arası boşluk arttığından yeteri miktarda toz bilyeler arasında sıkışmaz bu durumu engellemek için geniş bilye dağılımı kullanılır [41].

1.5.4.5. Bilye-Toz Oranı

Bilye/toz oranı öğütme işleminin önemli bir değişkenidir. Bu oran birçok araştırmacı tarafından 1/1 oranı ile 220/1 oranına kadar çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Spex tipi değirmenlerde genelde 10/1 oranında, büyük kapasiteli atritör benzeri bir değirmende 50/1 ile 100/1 oranlarında değişmektedir. Bu oranın artması alaşımlama zamanını azaltırken tozların kirlenmesi gibi olumsuz etkileri hızlandırmaktadır [42].

1.5.4.6. Öğütme Atmosferi

Normal hava ortamında metal tozların öğütülmesi malzemelerin kirlenmesine neden olur. Bu durumu engellemek amacıyla öğütme işlemi ya vakum ortamında ya da argon, helyum gibi gazlar gönderilerek toz partiküllerin oksitlenmesi engellenir. Özel uygulamalar için öğütme sırasında farklı atmosferlerde kullanılmıştır. Nitrür elde etmek için azot ve amonyak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen gazı ise hidrid üretmek amacıyla kullanılmaktadır [49].

1.5.4.7. Öğütme Süresi

Kullanılan değirmen tipine bağlı olarak en önemli işlem parametrelerindedir. Gerekli olan MA öğütme süresi değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilye toz oranına öğütme sıcaklığına, tozların kaynaklanma-kırılma eğilimine bağlı olarak değişir. Kullanılan bu parametreler her bir toz parametresi için ayrı ayrı belirlenir. Toz gereğinden fazla öğütülürse istenmeyen fazların oluşacağı ve kirlenmelerin artacağı unutulmamalıdır [51].

1.5.4.8. Öğütme Hızı

Yüksek devirli değirmenlerde toz enerji girişi daha fazla olur. Bu sebepten değirmen tasarımında çalışabileceği maksimum devir sınırı göz önünde bulundurulur. Örneğin, geleneksel bilyeli değirmende dönme hızı artışı bilyelerin hareket hızını artırır ve belli bir hızın üzerinde, bilyelerle kabın duvarına yapışarak çarpma kuvveti ile aşağı düşmeyecektir. Bu yüzden, maksimum hızda, maksimum çarpma enerjisini üretmek amacıyla bilyelerin maksimum yükseklikten aşağı düşmesi için kritik hız değerinin biraz altında olmalıdır. Bir diğer hususta öğütme hızı ortamın sıcaklığını etkilemektedir. Farklı tür değirmenlerde açığa çıkan sıcaklıkta sıcaklık değişikliği göstermektedir. Sıcaklığın olumsuz etkilerinden kaçınmak için sistemin tümüne soğutma sıvısı veya gazı kullanılabilir [52].

1.5.4.9. İşlem Kontrol Kimyasalı

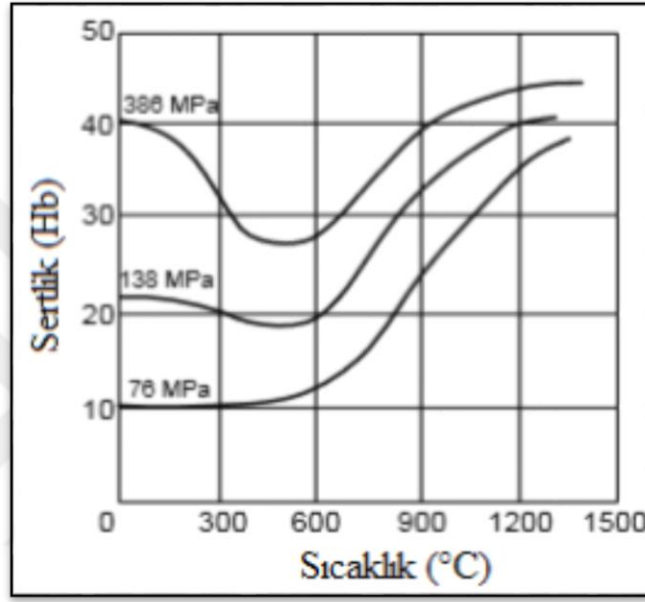
MA esnasında tane boyutunu küçültmek, ya da kontrol altına almak amacıyla çeşitli işlem kontrol elemanları kullanılmaktadır. Metal olmayan (organik) bu maddelerin ilavesi öğütme davranışını önemli derecede etkiler. Böyle malzemeler tanelerin yüzeylerinde film oluşturarak soğuk kaynaklaşmayı kontrol altına alır, tane büyümesini ve safsızlıkların topaklaşmasını önler. İşlem kontrol elemanları olarak çeşitli yağlar, sabunlar, alkoller ve bazı asitler (stearik asit gibi) genel olarak kullanılmaktadır [51].

1.6. Metal Matris Nanokompozitlerin Özellikleri

1.6.1. Metal Matris Nanokompozitlerde Sertlik

Metal matris nanokompozitlerin sertlik ölçümlerinde genellikle brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Ergitme ile üretilen MMNK'lerin sertlik ve çekme mukavemetleri arasında doğrusal bir ilişki olmasına karşın, aynı durum toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen MMK için geçerli değildir. TM ile üretilen MMNK'ler gözenekli yapıya sahip olmaları nedeniyle sertlik değeri, ölçümün alındığı noktaların bulunduğu bölgedeki gözenek miktarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. TM parçaların sertlik değeri, parçayı sıkıştırma basıncına göre de birtakım farklılıklar

gösterebilir. Yüksek presleme basıncı kullanılarak üretilen numunelerde yüksek brinell sertlik değerleri görülmektedir. Sinterleme sıcaklıklarının artışına paralel olarak numuneler hacimce küçülür ve buna bağlı olarak yoğunluk artışından dolayı sertlik de artar. Düşük basınçlarda sıkıştırılan numunelerin sertlikleri, sinterleme sıcaklığına bağlı olarak artar. Çünkü sıcaklık artışının yoğunluğun artması üzerinde etkisi oldukça fazladır [53].



Şekil 1.14. TM ile üretilen ve farklı basınçlarda preslenen MMNK'lerin sinterleme sıcaklığına bağlı olarak Brinell sertlik değerlerindeki değişim [53]

1.6.2. Metal Matris Nanokompozitlerde Aşınma Davranışı

Aşınma; malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde, mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen yüzey bozulmasının meydana gelmesi şeklinde tanımlanmaktadır [54].

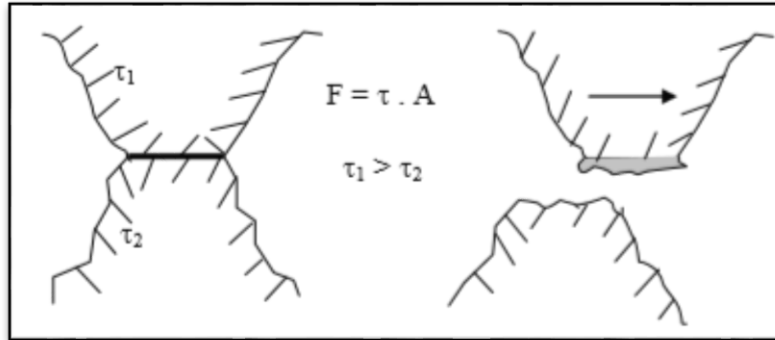
Makinalarda ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinden birisi aşınmadır. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise, aşınmada tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden dünyada her yıl önemli ölçüde maddi kayıplar meydana gelmekte olup kayıpların önlenmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır [55].

Aşınma olayının gerçekleşmesinde aşınan, aşındıran, ara malzeme, yük ve hareket olarak beş farklı parametre söz konusudur. Bu parametrelerin yanı sıra sıcaklık da, altıncı parametre olarak değerlendirilebilir. Aşınan ve aşındıran malzemelerin bir araya gelmesiyle “aşınma çifti” oluşmaktadır. Aşınma çifti ile sert parçacıklı sıvı, gaz ve buhar (ara malzemelerinin tamamı), aşınma kombinasyonu olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, aşınma sonucu meydana gelen parçacıklar da, ara malzemelerle birlikte aşınmaya ilave bir etki yapmaktadır [56].

Malzemelerde meydana gelen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için, bazı şartların oluşması gerekmektedir. Bunlar, mekanik bir etken, sürtünme (bağlı hareket), hareketin sürekli olması ve malzemenin yüzeyinde değişikliklerin meydana gelmesidir [57].

1.6.2.1. Adhezif (Yapışma) Aşınması

Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre relatif hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Basınç altında bir araya getirilen malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin oluşturduğu relatif teğetsel hareket, bağ kuvvetinin en güçsüz olduğu noktadan kopmasına neden olur. Bunun neticesinde Şekil 1.15’de görüldüğü gibi bir yüzeyden diğerine malzeme transferi meydana gelir [58].



Şekil 1.15. Adhezif aşınmanın temel mekanizması [58]

Archard, adhezif aşınmanın ağırlıklı olduğu hallerde, bu aşınma tipi için aşağıdaki bağıntıyı deneylerden çıkarmıştır.

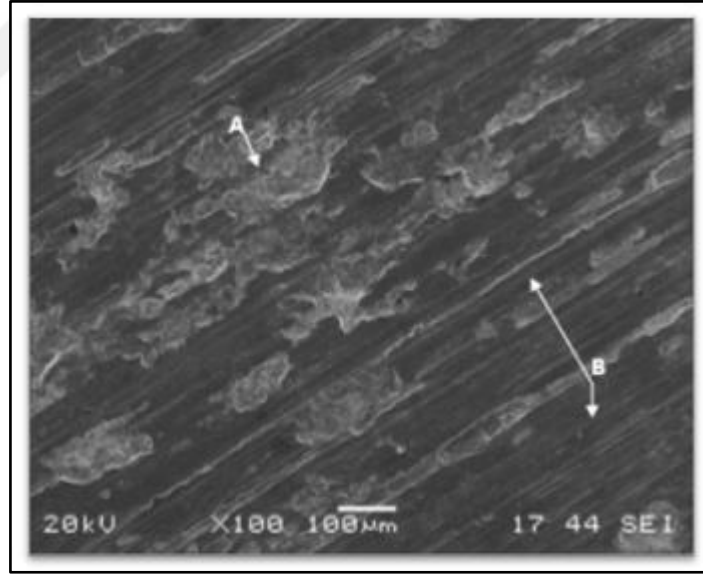
$$V = \frac{K \cdot W \cdot s}{H}$$

(1.1)

Burada; V = Aşınma hacmi, K = Malzemeye ait bir sabit, W = Normal kuvvet (yük), H = Malzemenin sertliği, s = Kayma yolu.

Bu konuda yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ile teorik yaklaşımlardan elde edilen veriler hemen hemen aynı sonuçlara vermiştir. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

- a) Adhezif aşınma miktarı, uygulanan yük ve kayma yolu ile doğru, malzemenin plastik akma mukavemeti ve sertliği ile ters orantılıdır.
- b) Sonuçlardaki farklılıklar, sadece malzeme sabitleri diyebileceğimiz katsayılarla olmaktadır.
- c) Yüksek hız, yüksek sıcaklık ve aşırı yükleme durumlarında, bu bağıntılarda sapmalar olabilir [59].



Şekil 1.16. Döküm yöntemi kullanılan ZA27 alaşımının aşınmanın mekanizması [59]

Şekil 1.16'da ZA27 alaşımının 2mm/sn kayma hızında oluşan aşınma izleri incelendiğinde adhezif aşınmanın tipik karakteri olan malzemenin koparak yüzeye sıvanması A ile gösterilen bölgelerde çok açık görülürken B ile gösterilen bölgelerde de abradif aşınmanın karakteri olan yiv oluşumu çok açık görülmektedir [60].

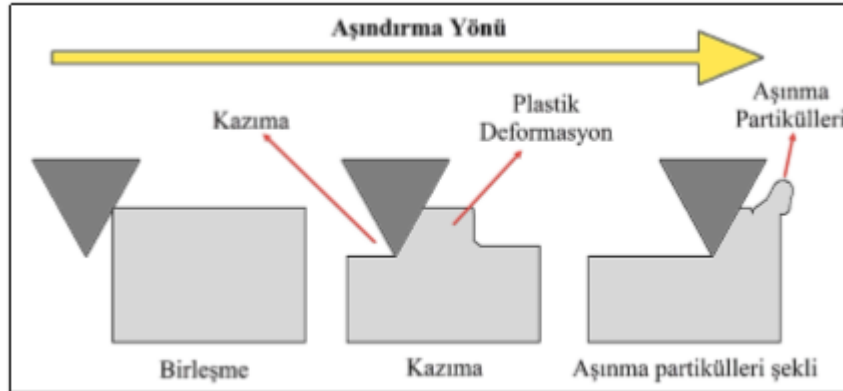
1.6.2.2. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle temasta olması ve sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması ile meydana gelir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adhezif aşınma ürünleri olarak sistem içinde ortaya çıkar. Buna göre, abrazif aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olarak gerçekleşir. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu oluşur. Üç elemanlı abrazif aşınma ise, ana ve karşı malzeme arasında aşınma sonucunda yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmalarıyla oluşur. Sert bir yüzey yumuşak bir yüzey üzerine bastırıldığında, sert yüzey üzerindeki pürüzler yumuşak malzeme üzerinde lokal plastik akış meydana getirir. Teğetsel hareketin etkisiyle sert yüzey yumuşak yüzeyden malzeme kaldırır [61]. Abrazif aşınma mekanizmasında, sertlik aşındırıcı tane veya pürüzün boyut ve şekli, uygulanan normal yük, kayma hızı ve malzemelerin kırılma tokluğu önemli faktörlerdir.

Hutchings (1992), abrazif aşınma mekanizmasının plastik deformasyon veya gevrek kırılma olmak üzere iki şekilde meydana geldiğini belirlemiştir. Malzeme kaybı birinci durumda metallerdeki gibi plastik deformasyonla, ikinci durumda ise özellikle seramiklerde ve düşük kırılma tokluğuna sahip malzemelerde olduğu gibi gevrek kırılma ile meydana gelmektedir. Çatlaklar, uygulanan yük kritik bir değeri (W^*) aştıktan sonra meydana gelmekte ve bu değer malzemelerin kırılma tokluğu ve sertliğine bağlı olarak

$$W^* \propto \left(\frac{K_c}{H} \right)^3 K_c \quad (1.2)$$

şeklinde değişim göstermektedir [62].



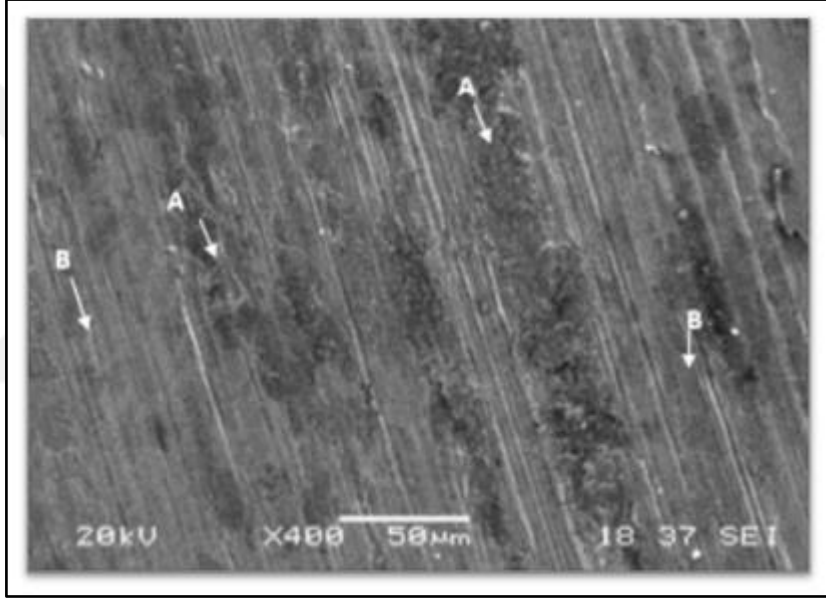
Şekil 1.17. Abrazif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [63]

Abrasif aşınma sırasında iki tür malzeme kullanılmaktadır.

1-Abrasif aşınma sırasında aşındırıcı olarak kullanılan malzeme.

2-Abrasif aşınma hızının engellendiği, ancak abrasif aşındırıcıların mevcut olduğu durumda kayma malzemesi olarak kullanılan malzemeler.

Aşındırıcı olarak kullanılan malzemenin en önemli özelliği sertliktir. Aşındırıcı malzemenin sertliği, aşınan malzemenin sertliğinden en az 3 kat fazla olmalıdır. Aşındırıcı olarak kullanılan malzeme için diğer önemli bir özellik ise, çok yüksek aşınma hızına ulaşmadan aşınma hızını koruyan bir aşındırıcı olmasıdır.



Şekil 1.18. Isıl işlem uygulanmış ZA27 alaşımının aşınmanın mekanizması [60]

Şekil 1.18’de görüldüğü gibi ZA27 alaşımında B ile gösterilen yerlerde abrasiv aşınmanın karakteri olan yiv oluşumu açık bir şekilde görülmektedir. MMK’de matris içersinde partiküllerin topaklanması ile ayrıca matris ile takviye arasında zayıf arayüzey gibi nedenlerden ötürü aşınma esnasında partiküllerin matris içersinden çıkarlar ve çıkan partiküller aşındırıcı gibi davranır [6].

1.6.2.3. Delaminasyon Aşınması

Aşındırıcı uç temas ettiği yüzeyin altında kesme gerilmelerinin etkisiyle plastik deformasyon gerçekleşir. Bu deformasyonun sonucunda aşınma yüzeyinde küçük meydana gelir ve çatlakların ilerlemesi ile delaminasyon aşınması gerçekleşir. Bu aşınma türünde ilk olarak yüzey teğet yükler ve arayüzey tabakaları ise düşey yükler tarafından plastik deformasyona maruz kalır, sonra ise deforme olmuş tabakalarda inklüzyonlarla çatlak çekirdeklenir. Çatlaklar yüzeye paralel olarak ilerleyip son olarak ince, uzun aşınma parçacıklarının oluşumu ve çatlakların yüzeye ulaşması ile bu parçacıkların yerlerinden ayrılması ile aşınma sonlanır [6].

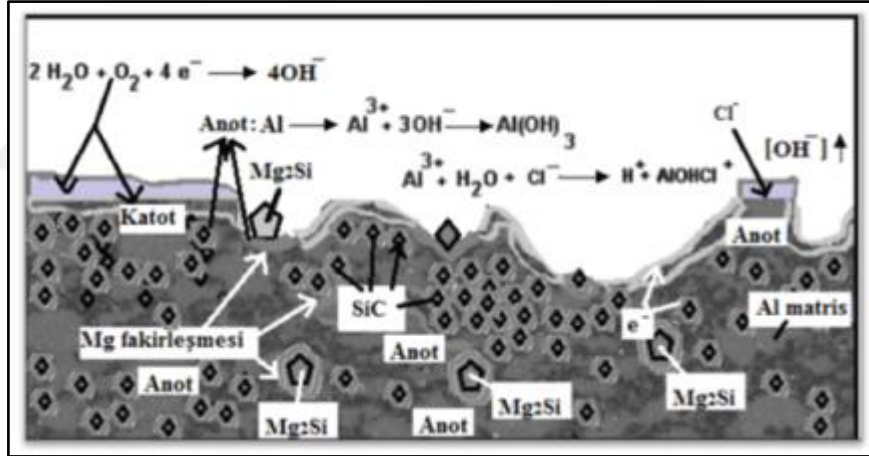
1.6.2.4. Aşınma Ölçüm Yöntemleri

Aşınma miktarının ölçülmesinde, her ölçme sisteminde olduğu gibi yeterli hassasiyet, kolay ve seri uygulanabilirlik, ekonomik ve standartlaştırılmış bir yöntem kullanılmalıdır. Bu esaslar çerçevesinde, imkânlar ve sistemin yapısına göre farklı aşınma miktarı ölçme yöntemleri kullanılmaktadır.

Ağırlık farkı ile ölçme yöntemi, ölçüm cihazının oldukça hassas olması ve ekonomik olması nedeni ile yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ölçüm yapılan numunelerde, fazla zaman kaybına sebep olmaktadır. Ağırlık kaybının ölçülmesi için, 10-4 veya 10-5 hassasiyetindeki hassas teraziler kullanılmaktadır [63]. Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilirken, alınan yol metre veya kilometre olarak kaydedilmektedir. Kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma mesafesine karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (gr/km), (mgr/m) ile ifade edilmektedir. Ağırlık kaybı birim alanı için (gr/cm²) olarak hesap edilmektedir. Deneyler sırasında elde edilen ağırlık kaybının hacimsel olarak belirtilmesi istendiğinde, ağırlık kaybının yanı sıra, malzemenin yoğunluğu da göz önüne alınarak hesaplama yapılmaktadır [63]. Aşınma testleri sırasında meydana gelen boyut değişikliğinin ölçülerek, başlangıç değeriyle karşılaştırılmaktadır. Kalınlık olarak belirlenen değer, hacimsel olarak hesaplanarak, birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilmektedir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile (1 µm hassasiyetinde) yapılmaktadır [64].

1.6.3. Metal Matris Nanokompozitlerde Korozyon Davranışları

Korozyon, bir elementin sıfır veya düşük valans değerinden pozitif ya da daha yüksek valans değerine dönüşmesi olayıdır. Altın ve platin gibi asal metallerin haricinde diğer metallerin çoğu oksit bileşikler halinde bulunur. Bir metalin en kararlı hali oksitli halidir. Korozyon kavramı daha genel ve geniş bir anlamda; metal malzemelerin veya bu malzemelerin alaşımlarının doğada kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu termodinamik açıdan kararlı olduğu bileşiklerine dönüşme eğilimi olarak tanımlanır. Bu malzemelerin çevresi ile bir etkileşim içerisinde taşıdığı fazla enerjiyi dışarı vermesi, entropi küçültmesi ve doğada kararlı bileşiklerine dönüşmesi şeklinde gerçekleşen doğal bir olaydır. Korozyon; korozyona uğrayan metale, korozif ortam türüne, korozyon mekanizmasına ve korozyondan korunma yöntemine göre, farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır [65,66].

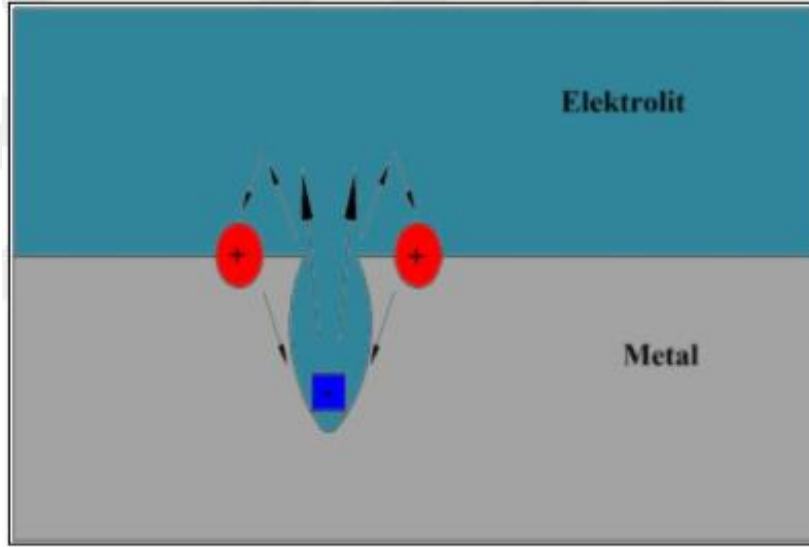


Şekil 1.19. Metal matrisli kompozitlerin korozyon dağılımı

MMK'nin elektrokimyasal korozyonunda anodik bölgelerinde oksidasyon, katodik bölgelerinde ise redüksiyon tepkimeleri meydana gelir. Oksidasyon sonucu oluşan elektronlar anodik bölgelerden katodik bölgelere doğru geçerler. Katodik ve anodik bölgeler arasındaki potansiyel fark (mV) bu reaksiyonların aktive edilmesini sağlar. İyon hareketleri sonucunda oluşan elektrik akımı ile korozyon başlamış olur (Şekil 1.19). Artan pil oluşumları ile birlikte matriste metal kayıpları başlar [67,68].

1.6.3.1. Çukurcuk Korozyonu

Çukurcuk korozyonu, malzemenin pasif filmi sebebiyle korozyon boşluklarının veya çukurların oluşmasına sebep olan, bölgesel bir korozyon çeşididir. Çukurcuk korozyonu (deniz yapılarında en yaygın olmakla birlikte) genelde paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum, bakır, magnezyum ve nikel alaşımları gibi malzemelerde gerçekleşmektedir. Bu korozyon türü oldukça tehlikeli olup tahrip edicidir [69]. Çukurcuk korozyonunda anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin bir şekilde ayrılmaktadır. Anot bölgesi, malzemenin korozyona uğrayan yüzeyindeki herhangi bir bölgede açılan çukurun içerisindeki dar bir bölge olarak, katot bölgesi ise çukurun çevresindeki çok geniş bir bölge olarak ayrılır. Süreç içerisinde çukur gittikçe büyüyerek, o bölgedeki deformasyonun artmasına ve ince parçaların o bölgeden delinmesine neden olmaktadır [70]. Şekil 1.20.'de şematik olarak çukurcuk korozyonu gösterilmektedir.

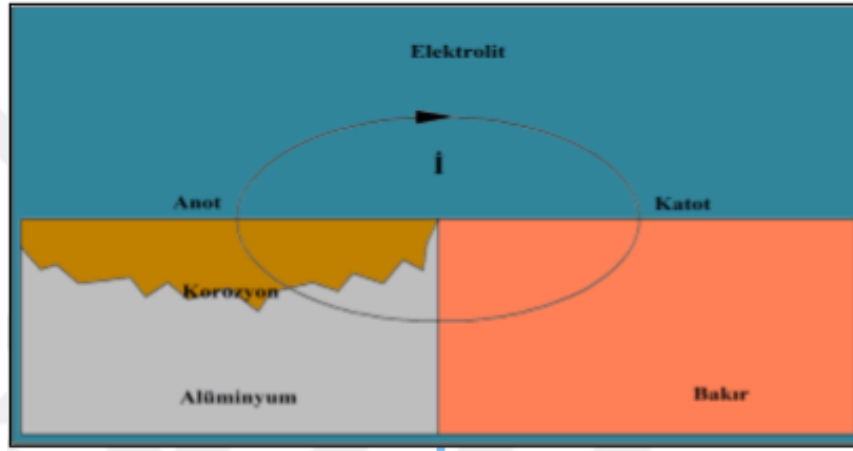


Şekil 1.20. Şematik olarak çukurcuk korozyonunun gösterimi [71]

Çukurcuk korozyonu, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek Cl konsantrasyonu bulunan ortamlarda aktif hale gelmektedir. Çukurcuk potansiyeli ve çukurlaşma direnci, artan pH klorür konsantrasyonu ile birlikte artmaktadır. Ayrıca yüzey pürüzlüğü de, çukurcuk korozyonunu etkileyen faktörlerden biridir [72,73].

1.6.3.2. Galvanik Korozyon

İki farklı metalden oluşan bir yapıda, metallere daha soy olanı katot, daha aktif olanının anot görevini üstlenerek, korozyon hücresi oluşturan ve anot olan metalin korozyona uğradığı bir korozyon çeşididir. Metallerin bulunduğu ortamların korozyon dereceleri, metallere arası mesafe, katot ve anot yüzey oranı galvanik korozyonu oluşturan nedenlerden birkaçıdır. Şekil 1.20’de şematik olarak galvanik korozyon gösterilmektedir [71].



Şekil 1.21. Şematik olarak galvanik korozyonun gösterimi [71]

1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Çinko alaşımları içerisinde bir alt sınıfını oluşturan Zn-Al alaşımları (ZA27) uzun zamandan beri teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ağırlıkça % 27 alüminyum içeren ZA27 alaşımı, ZA alaşımları içerisinde en yüksek mukavemete ve en düşük yoğunluğa sahiptir. Yapılan araştırmalar sonucunda ZA27 alaşımının fiziksel, mekanik ve teknolojik özelliklerin (düşük ergime derecesi, yüksek mukavemet, mükemmel dökülebilirlik, yüksek korozyon direnci, kolay işlenebilirlik, yüksek aşınma dayanımı ve mükemmel yatak özellikleri) mükemmel bir kombinasyon sağladığı görülmüş ve bu nedenle pek çok uygulamada döküm alaşımı olarak kullanılmıştır. ZA27 alaşımları otomobil motor parçaları, hareket aktarım organlarındaki kaymalı yataklar, tarım makineleri ve çeşitli ekipmanlarda yaygın bir şekilde kullanılırlar ve genellikle basınçlı

döküm aracılığıyla üretilirler. ZA27 alaşımları aynı zamanda düşük maliyetleri ve üstün yatak performansları nedeni ile bronz yatak ve burçların yerine kullanılmaktadır

Zhu ve arkadaşları [74] tarafından 1994 yılında yapılan başka bir araştırmada ise tekstil ve otomotiv sektöründe kullanılan burç ve yataklarda Zn-Al alaşımlarının kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Parasad tarafından 2005 yılında yapılan bir çalışmada bu alaşımların benzer uygulamalar için tercih edilebileceğini bu tercihin ana sebeplerinin ise diğer demir dışı metallerle karşılaştırıldığında düşük maliyet, iyi döküm özellikleri, uzun servis ömrü ve mükemmel aşınma direnci olduğu ifade edilmiştir [75].

Bununla birlikte Gervais [76] ve Zhu [74] gibi bazı araştırmacılar Zn-Al alaşımlarının düşük mukavemete sahip olduğunu ve yeterince sünek olmadığını dolayısıyla bu olumsuzlukların Zn-Al alaşımlarının kullanım alanlarını sınırlayacağını belirtmişlerdir. Bu olumsuzlukları gidermek ve Zn-Al alaşımlarının özelliklerini geliştirmek için araştırmacılar yoğun bir çaba içerisine girmişlerdir. Araştırmacılar ilk olarak kimyasal bileşimi dolayısıyla mikroyapıyı değiştirerek özellikleri geliştirmeye çalışmışlardır.

Savaşkan ve arkadaşlarının [77,78] 2004 ve 2005 yıllarında yaptıkları iki farklı araştırmada Zn-Al alaşımlarının kimyasal bileşimine alaşım elementi olarak bakır (Cu) ve silisyum (Si) ilavesi yapılarak mekanik özellikler ve aşınma direnci artırılmaya çalışılmıştır.

Parasad [79] tarafından 2000 yılında yapılan başka bir çalışmada ise alaşım elementi olarak Ni ilavesi ile mekanik özellikler ve aşınma direnci geliştirilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte bu alaşımların ana dezavantajları 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üstün tribolojik özelliklerden sapma ve boyutsal kararlılığın bozulmasıdır. Bu çalışmalar sonucunda birtakım ilerlemeler sağlansa da Zn-Al alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda çalışma performansı geliştirilememiştir. Buradan hareketle araştırmacılar Zn-Al alaşımları içersine termal kararlılığı yüksek seramik fazları katarak yeni bir malzeme grubu olan çinko esaslı kompozit malzemeleri geliştirmişlerdir. Bu araştırmalarda seramik faz olarak genellikle Al₂O₃, SiC, ZrO₂ ve grafit partikülleri matris bünyesine katılarak fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişim incelenmiştir.

Mishra ve Biswas tarafından yapılan bir çalışmada Zn-Al alaşımına hacimce %3, %6, %9 oranında SiC katılarak üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik ve gerilme değerleri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucuna göre artan SiC takviyesi ile yoğunluk ve sertlik değerleri artmıştır [80].

Seah ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada Zn-Al matris içersine ağırlıkça %1,%3 ve%5 oranında grafit katılarak üretilen kompozitlere pin on disk aşınma cihazında kuru sürtünme uygulanarak aşınma özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda artan grafit takviyesi ile malzeme sertliğinin azaldığı buna karşın grafitin yağlayıcılık etkisi nedeniyle aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir [81].

El khair ve Lotfy (2010) tarafından yapılan bir çalışmada Zn-Al matrisi SiC, ZrO₂ ve C ile takviyelendirilerek mikroyapısı, termal davranışları ve mikroyapısı incelenmiştir. Bu çalışmanın neticesinde görülmüştür ki hacimce katılan %5 SiC takviyesi, termal davranışı geliştirmekle beraber Zn-Al matrisinin %5.4 olan uzamasını %1.4'e düşürmüştür [82].

Girish ve arkadaşları (2011) tribolojik uygulamalar için Zn-Al matrisini grafit ile takviyelendirip kuru sürtünme ortamında aşınma davranışını incelemiştir. Yapılan bu çalışmada Zn-Al matrisi içine ağırlıkça %0, %4, %6, %8 oranında grafit eklenmiş olup araştırma sonucunda aşınmaya karşı direncin en iyi %4 ile %6 grafit takviyesi ile sağlandığı tespit edilmiştir [83].

Prasad (2007) [84] tarafından yapılan bir çalışmada SiC ile takviye edilmiş Zn alaşımının kuru ve yağlı ortamda aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda aşınma oranının kuru ve yağlı sürtünmede artan yüklerle beraber arttığı ifade edilmiştir. Yağlı sürtünme ortamında kullanılan SAE40 yağı aşınma oranını ve hacim kaybını azaltmıştır. Yağın içersine katılan grafit takviyesi %6'ya kadar aşınma oranını düşürmüştür. SiC takviyesinin aşınmaya karşı yumuşak matrisi sertleştirdiği gözlemlenmiş yağlı ortamda yağ içine aktarılan grafit parçalarının yağa karışarak yüzeyde oluşan aşınmayı azalttığı görülmüştür. Sonuç olarak kompozit malzemelerin matris malzemesinden daha iyi tribolojik performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu araştırma çalışması kapsamında mekanik dayanımı artırmak ve termal kararlılığı yükseltmek için B₄C seramik partikülleri kullanılacaktır. SiC (3.21gr/cm³) ve Al₂O₃ (3.98 gr/cm³) seramik partikülleri yerine B₄C partiküllerinin kullanılmasının en önemli sebebi SiC ve Al₂O₃ partikülleri ile kıyaslandığında B₄C (2.52 gr/cm³) partiküllerinin oldukça düşük yoğunluğa sahip olması ve bundan dolayı B₄C partikülleri kullanılarak üretilen kompozit ve nanokompozitlerin daha yüksek özgül mukavemet değerine sahip olmasıdır. B₄C partiküllerine SiC ve Al₂O₃ partiküllerine göre üstünlük sağlayan diğer bir özellikte yüksek ergime sıcaklığına bağlı olarak yüksek kimyasal kararlılığa sahip olmasıdır. B₄C partiküllerinin ergime derecesi (2763°C) ile Al₂O₃ partiküllerinin ergime derecesi (2072 °C) arasında yaklaşık olarak 700°C'lik bir fark bulunmaktadır. B₄C partiküllerinin (3200 kg/mm²) SiC (2800 kg/mm²)

ve Al_2O_3 (2000 kg/mm^2) partiküllerine göre diğer bir üstünlüğü de yüksek sertliğe sahip olmasıdır. Böylelikle daha düşük takviye oranı kullanılarak istenilen mekanik dayanım kolaylıkla elde edilebilir [85].

Varol ve Canakci 2013 yılında yaptıkları bir çalışmada $Al_{2024}-B_4C$ metal matrisli kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine takviye miktarının etkisini araştırmışlar ve ağırlıkça %10 takviye miktarının üstün fiziksel ve mekanik özellikler için optimum bir miktar olduğunu tespit etmişlerdir [86].

Wu ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada Al_{7075} matrisi içersine ağırlıkça %7.5 B_4C ilave etmişlerdir. Çalışma sonucunda optimum sinterleme koşullarında 181.6 Hv sertlik, 1100.3 MPa eğilme mukavemeti, 878 MPa basma mukavemeti ve 469.3 MPa kırılma tokluğu değerleri elde etmişlerdir [87].

Dou ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada ağırlıkça %20 B_4C seramik partikülleri ile takviye edilmiş Al_{6061} alaşım matrisli kompozitlerin aşınma davranışını incelemiş ve aşınma işleminin başlangıcında aşınma kaybının fazla olduğunu aşınma hızı arttıkça bu kaybın azaldığını ve oksit oluşumlarının aşınma davranışını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir [88]. Bununla birlikte sünek matris içersine katılacak olan sert seramik fazların matrisin yağlayıcılık özelliğini azaltacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle hibrit kompozit uygulamaları kaçınılmaz hale gelmektedir. Hibrit kompozitlerle ilgili çalışmalar incelendiğinde ucuz olmasından dolayı yağlayıcılığı artırmak için grafit kullanımı dikkat çekicidir.

Baradeswaran ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada Al_{6061} ve Al_{7075} alaşımlarına B_4C ve grafit ilave ederek hibrit kompozitler üretmişler ve B_4C takviyesi ile mekanik özellikleri geliştirirken grafit takviyesi ile de yağlayıcılık özelliklerini korumuşlardır. Bununla birlikte grafit gibi yağlayıcı malzemeler aşınma dayanımını artırırken fiziksel ve mekanik özellikleri azaltmaktadır [89].

Rajkumar ve Aravindan (2009) [90] tarafından bir çalışmada ağırlıkça % 5'den % 30 kadar grafit takviyeli ve yatak malzemelerinde de kullanılan bakır esaslı kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen malzemelerin yoğunluk miktarları ile sertlik değerleri araştırılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre artan grafit miktarı ile yoğunluk ve sertlik değerleri değerleri azalmıştır. Sinterlenmiş yoğunluk değerleri yaklaşık olarak 7.6 gr/cm^3 den 6.6 gr/cm^3 değerine sertlik değeri ise yaklaşık olarak 85Hv'den 55 Hv değerine gerilemiştir. Rajkumar ve Aravindan yoğunluk değerlerindeki azalışın sebebini artan grafit miktarı ile yapıdaki grafit partiküllerinin oluşturduğu topaklanma bölgelerinin sayısındaki

artışa sertliğin azalışını ise grafitin düşük sertliğine bağlamışlardır. Yukarıda ifade edilen iki çalışmada olduğu gibi grafit kullanımı katı bir yağlayıcı olarak aşınma dayanımını artırmakta bununla birlikte fiziksel ve mekanik özellikleri düşürmektedir. Dolayısıyla literatürde doldurulması gereken boşluklardan biri aşınma dayanımını iyileştirirken fiziksel ve mekanik özelliklerden fazla taviz vermeyen yada onları da geliştiren yeni bir hibrit kompozit bileşiminin geliştirilmesidir. Rajkumar ve Aravindan yukarıdaki çalışmalarının bilimsel sonuçlarını bilim dünyası ile paylaştıktan sonra 2013 yılında grafit kullanımının olumsuzluklarını gidermek adına yeni bir çalışma yapmışlardır.

Rajkumar ve Aravindan (2013), yaptıkları bu çalışmada nanogرافit tozu kullanarak ürettikleri bakır-grafit kompozitlerinin fiziksel, mekanik, elektriksel ve aşınma özelliklerini grafit partikülleri kullanılarak ürettikleri diğer grup malzemelerle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ağırlıkça % 15'e kadar nanogرافit kullanımında hem fiziksel ve mekanik özelliklerde hemde aşınma özelliklerinde grafitte göre oldukça fazla gelişim sağlanmıştır. Rajkumar ve Aravindan (2013), nanogرافit tozlarının ısıyı emme yeteneklerinden dolayı bu malzeme grubu için sinterleme işleminin daha verimli olduğunu dolayısıyla daha az gözenekli parçalar üretilebileceğini vurgulamışlardır. 2013 yılında yapılan bu çalışma açık bir şekilde nano boyutlu karbon türevlerinin malzeme özelliklerine olan etkisini göstermesi bakımından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Nanogرافen'in sahip olduğu üstün fiziksel ve mekanik özelliklerden dolayı son yıllarda bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır. İlk yapılan çalışmalar bu malzemelerin kullanımı ile mekanik özelliklerin artırılmasına yöneliktir [91].

Wang ve arkadaşları (2012), grafen nanolevha takviyeli Al matrisli kompozit üretimi yaparak grafen nanolevhaların çekme mukavemeti üzerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ağırlıkça % 0.3 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin saf Al alaşımından üretilen malzemeye göre çekme mukavemetinin % 62 oranında artarak 249 MPa değerine yükseldiğini göstermiştir. Bu sonuç grafen ve türevlerinin metal matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak büyük bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermesi açısından son derece önemlidir [92].

Chen ve arkadaşları (2012) Mg-Grafen nanolevha metal matrisli kompozit malzemelerini üreterek bu malzemelerin içyapılarını ve özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre hacimce % 1,2 grafen nanolevha takviyeli kompozitlerin sertlik değerinin grafen nanolevha kullanılmayan Mg alaşımından % 78 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [93].

Bustamante ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada mekanik alaşımlama yöntemi ile sentezlenen Al ve grafen nanolevha (GNP) kompozitinin sertliğini ve mikroyapısal davranışlarını incelemiştir. Çalışmada Al matrisi içerisine ağırlıkça 0.25, 0.50 ve %1 olmak üzere grafen nanolevha katılarak üretim yapılmıştır [94].

Rashad ve Pan (2013) toz metalurjisi yöntemi ile Mg-Al-Sn alaşımına grafen nanolevha takviyesi yaparak yeni bir kompozit üretmişler ve yaptıkları bu araştırmanın sonucunda grafen nanolevha takviyesinin alaşımının mekanik özelliklerini, kopma uzaması ve gerilme uzamasını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir [95].

Seah ve arkadaşları (1997) Zn-Al alaşım matrisi içerisine ağırlıkça %0,%1,%3,%5 grafit ekleyerek ürettikleri kompozitlerin HCl çözeltisi içerisinde asidik korozyon değerlerini incelemiştir. Korozyon testleri oda sıcaklığında 12 ile 60 saat aralığında yapılmıştır. Bu çalışmada görülmüşürki aşınma HCl çözeltisi içerisinde azalırken, grafit eklenmesiyle artmaktadır [96].

Bobic ve arkadaşlarının çalışmasında, sodyum klorür çözeltisi içinde kompozit dökümle üretilen ZA27/SiCp kompozitlerinin yüzey görünümü ve mikroyapı üzerindeki korozyon etkisini incelendi. Çalışmada ZA27 matrisindeki SiC partikülü oranı arttıkça korozyon hızı artmıştır [97].

Çuvalcı ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptıkları çalışmada ZA27 matrisi içerisine hacimce %4 oranında nano A_2O_3 ve %1,%2,%3,%4 oranında nano grafit ekleyerek oluşturulan hibrit nanokompozitlerin blok on disk aşınma deney düzeneğinde kuru ortamda 10N yük altında aşınma davranışlarını incelemişlerdir. En düşük aşınma kaybını ZA27 matrisine %4 A_2O_3 ve %4 grafit katılarak oluşturulan hibrit kompozitten; en yüksek aşınma kaybında ZA27 matris malzemesinden elde etmişler. Elde edilen hibrit nanokompozitlerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiği zaman adhezyon aşınmasının olduğu görülmüştür [98].

Güler ve arkadaşları ZA27 matris alaşımına hacimce %1 oranında grafit ve %1,%2,%3,%4 oranında nano alümina (A_2O_3) ekleyerek üretilen hibrit nanokompozitlerin blok on disk aşınma deney düzeneğinde kuru ortamda 10-15-20 ve 25N yükler altında 100-150-200 ve 250 dev/dk hızında aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak artan alümina miktarı ile hibrit kompozitlerin aşınma direnci artış göstermiş en iyi aşınma direnci %1 grafit ve %4 alümina katılan ZA27 matrisinde görülmüştür. Ayrıca ZA27 matris alaşımı aşınma mekanizmasında plastik deformasyon görülürken hibrit nanokompozitler mikro çatlaklar ve delaminasyon aşınması göstermiştir [99].

Dalmış ve arkadaşları ZA27 matris içerisine ağırlıkça %0,5-%1-%1,5 ve %2 oranında nano B₄C ilavesi yaparak 2 saat mekanik alaşımla süresi ile nanokompozitler üreterek fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini inceledi. Özellikle %1-%1,5 ve %2 oranında nano B₄C takviyesinin sertlik ve çekme mukavemeti değerlerini düşürerek gözenek miktarı artırdığı ve tane sınırlarında aglomerasyona sebep olduğunu gösterdi [100].

Dalmış ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ZA27 matris içerisine ağırlıkça %0,5-%1-%1,5 -%3- %5 ve %7 oranında nano grafit ilave ederek 4 saat mekanik alaşımlama ve sıcak pres yöntemi ile oluşturdukları kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini inceledi. Sonuç olarak artan grafit takviyesinin numunelerin sertlik değeri ve çekme mukavemetini düşürdüğü, gözenek miktarını artırdığı vurgulandı [101].

Yapılan bu çalışma bünyesinde yukarıdaki literatür özetinde belirtildiği gibi ZA27 alaşımının üstün tribolojik özellikleri B₄C partiküllerin üstün mekanik özellikleri ve termal kararlılığı ile grafenin üstün iletkenlik ve yağlayıcılık özellikleri ile birleştirilerek yeni ve özgün bir hibrit nanokompozitler geliştirilmesi planlanmıştır.

Bilimsel araştırmalarda kullanılan malzemelerin özgünlüğü yanında kullanılacak yönteminde malzemelerin üstün özelliklerini ön plana çıkaracak şekilde seçilmiş olması gerekmektedir. Dolayısıyla üretim yöntemi veya yöntemleri ile ilgili bir literatür araştırması verilmelidir. Yatak malzemelerinin üretim yöntemleri incelendiğinde geleneksel yatak malzemelerinde döküm yönteminin, çok fazla bileşene sahip alaşımlı yatak malzemeleri ve kompozit yatak malzemelerinde ise toz metalurjisi yönteminin ön plana çıktığı görülmektedir. Bu malzemelerde toz metalurjisi yöntemini ön plana çıkaran sebepler olarak üretim kolaylığı, aynı anda çok sayıda yatak malzemesinin üretilmesi, hurda kayıplarının olmaması, yoğunluk ve ergime noktasındaki farklılıklar nedeniyle başka yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım ve kompozit üretiminin yapılabilmesi sayılabilir. Döküm yöntemi gibi sıvı faz yöntemlerdeki en büyük problemlerden biri ergitme ve döküm işlemleri esnasında yüksek sıcaklıklara çıkıldığından istenmeyen metaller arası bileşiklerin oluşmasıdır. Bu metaller arası bileşikler yatak performansını olumsuz bir şekilde etkileyebilir. Ayrıca döküm yöntemi ile takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımını sağlamak oldukça zordur. Toz metalurjisi yönteminde bu tür olumsuzlukların olmaması bu yöntemin yatak malzemelerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Bu tez çalışmasının başlıca amaçları;

- (1) Grafen ve B₄C takviyeli çinko- alüminyum esaslı ZA27 matrisi ile nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemelerin; malzeme üretiminde önemli bir yere sahip toz metalürjisi ve mekanik alaşımlama teknikleri ile birleştirilerek üretilmesi.
 - (2) Mekanik öğütme yöntemi ile Grafen ve B₄C parçacıkları ZA27 matris malzemesi içine homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlamak.
 - (3) Üretilen yeni malzemelerin fiziksel, içyapı ve mekanik (sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı) özelliklerinin araştırılması
 - (4) ZA27/B₄C ve ZA27/Grafen nanokompozit ve ZA27/Grafen/B₄C malzeme gruplarının birbirleri ile karşılaştırılması ve üstünlüklerinin belirlenmesi
 - (5) Üretilen nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemelerin en iyi mekanik özelliklerin hangisinde olduğunun belirlenmesi
- olarak belirlenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

2.1.1. Matris Malzemesi

Matris malzemesi olan ZA27 alaşımının üretimi kokil döküm yöntemi ile gerçekleştirildi. Döküm işlemlerinde %99,9 saflıkta çinko, elektrolitik bakır ve ticari saflıkta (%99,5) alüminyum ve magnezyum kullanıldı. Ergitme işlemini düşük sıcaklıklarda yapabilmek için öncelikle intermetalik bakır-alüminyum alaşımı (AlCu50) dökülmüştür. Dökülen AlCu50 bileşiği toz haline getirilerek daha sonra ergitme işlemi, kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de verilen oranlar doğrultusunda, sıcaklığı ayarlanabilen elektrikli bir pota fırınında gerçekleştirildi. Bu safhada toz halindeki intermetalik AlCu50 bileşiği, eriyik haldeki karışıma katılarak ergitilen ZA27 bileşimi 700 °C’de kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı.

Elde edilen alaşım İKİ-EL METAL TOZLARI A.Ş.’ de gaz atomizasyon yöntemi kullanılarak toz haline getirildi. Sonrasında bu tozlar 63 µm elek ile elenerek ortalama tane boyutu (d50) 40,404 µm olan matris tozları elde edilmiştir. ZA27 alaşım tozlarının bileşimi Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. ZA27 Alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Alaşım	Zn	Al	Cu	Mg	Pb
ZA27	70.8	27.2	2.01	0.02	0.04

2.1.2. Takviye Malzemeleri

Takviye malzemesi olarak kullanılan B₄C (2,52 g/cm³ yoğunluk, ortalama tane boyutu 50nm, saflık %99) ve Grafen tozları (2,25 g/cm³ yoğunluk, ortalama kalınlık 5-10nm, ortalama çap 5-10nm, saflık %99) sarf malzeme olarak (Alfa Aesar) temin edilmiştir. Alınan sarf malzemelerin üretici firma tarafından verilen özellikleri gerekli kontrol ve analiz işlemleri yapılarak kontrol edilmiştir. Analiz ve kontrol işlemleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları difraksiyonu (XRD) ve partikül boyutu ölçüm cihazları kullanılmıştır.

2.2. Malzeme Bileşimleri

Çalışmada öncelikle toz karışımları ve malzeme tasarımı yapılmıştır. Bu kapsamda Grafen takviyeli malzemeler ağırlıkça %0- 0,125- 0,25- 0,5- 1- 2- 3 oranında ZA27 matris içerisine, B₄C nanoparçacık takviyeli malzemeler ağırlıkça %0- 0,125- 0,25- 0,5- 1- 2- 3 oranında ZA27 matris içerisine katılarak nanokompozitler oluşturulmuştur. Daha sonra ağırlıkça %3 oranında grafen sabit tutularak ağırlıkça %0- 0,125- 0,25- 0,5- 1- 2- 3 oranında B₄C eklenerek hibrit nanokompozit malzemeler üretilmiştir. Homojen dağılım sağlamak için 0,1 ve 4 saatlik mekanik öğütme yapılmıştır. Çalışma kapsamında 51 farklı nanokompozit ve hibrit nanokompozit üretilip Tablo 2.2' de kodlanmıştır. Ayrıca en iyi sertlik, en iyi aşınma direnci ve en iyi korozyon direnci sağlayacak bileşenler belirlenmiştir.

Tablo 2.2. Nanokompozit ve hibrit nanokompozit bileşimlerinin adlandırılması

Mekanik Alaşım Süresi								
0h			1h			4h		
Numune Kodu	Takviye	Tk. Oranı (%)	Numune Kodu	Takviye	Tk. Oranı (%)	Numune Kodu	Takviye	Tk. Oranı (%)
ZA27	-	0	ZA27	-	0	ZA27	-	0
ZAG-0,125-0h	Grafen	0,125	ZAG-0,125-1h	Grafen	0,125	ZAG-0,125-4h	Grafen	0,125
ZAG-0,25-0h		0,25	ZAG-0,25-1h		0,25	ZAG-0,25-4h		0,25
ZAG-0,5-0h		0,5	ZAG-0,5-1h		0,5	ZAG-0,5-4h		0,5
ZAG-1-0h		1	ZAG-1-1h		1	ZAG-1-4h		1
ZAG-2-0h		2	ZAG-2-1h		2	ZAG-2-4h		2
ZAG-3-0h		3	ZAG-3-1h		3	ZAG-3-4h		3
ZAB-0,125-0h		B ₄ C	0,125		ZAB-0,125-1h	B ₄ C		0,125
ZAB-0,25-0h	0,25		ZAB-0,25-1h	0,25	ZAB-0,25-4h		0,25	
ZAB-0,5-0h	0,5		ZAB-0,5-1h	0,5	ZAB-0,5-4h		0,5	
ZAB-1-0h	1		ZAB-1-1h	1	ZAB-1-4h		1	
ZAB-2-0h	2		ZAB-2-1h	2	ZAB-2-4h		2	
ZAB-3-0h	3		ZAB-3-1h	3	ZAB-3-4h		3	
ZAGB-0,125-0h	Grafen-B ₄ C		0,125	ZAGB-0,125-1h	Grafen-B ₄ C		-	-
ZAGB-0,25-0h		0,25	ZAGB-0,25-1h	-		-	-	
ZAGB-0,5-0h		0,5	ZAGB-0,5-1h	-		-	-	
ZAGB-1-0h		1	ZAGB-1-1h	-		-	-	
ZAGB-2-0h		2	ZAGB-2-1h	-		-	-	
ZAGB-3-0h		3	ZAGB-3-1h	-		-	-	

2.3. Parçacık Boyutu

Hazır alınmış olan ve öğütülen tozların boyutsal incelemelerinde Malvern Instruments™- Mastersizer 2000e marka modelinde lazer ışık kırınımı ilkesine göre çalışan parçacık boyutu ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçüm işlemleri saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Partikül boyutu ölçüm cihazı

2.4. Mekanik Alaşım

Nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin toz karıştırma işleminde Retsch PM 100 markalı gezegen tipi bilyeli öğütücü kullanılmıştır. Toz karıştırma işlemi Argon atmosferinde, oda sıcaklığında ve 400 dev/dak öğütme hızında gerçekleştirilmiştir. Topaklanmayı engellemek amacıyla %1 oranında çinko stearat ilavesi yapılarak 0-1-4 saat öğütme işlemleri yapılmıştır. Öğütme işleminde Grafen ve B_4C partiküllerinin ZA27 matris içersinde homojen dağılımını sağlamak amaçlanmıştır. Öğütme işlemi 250 ml hacminde tungsten karbür değirmen haznesi, 10 mm çapında bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilye: toz ağırlık oranı 5:1 olarak seçilmiştir.



Şekil 2.2. Bilyeli öğütücü

2.5. Sıcak Presleme

Nanokompozit ve hibrit nanokompozit toz karışımları ilk olarak 250 MPa basınç altında 1 dk ön yük uygulanarak soğuk presleme işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak presleme işlemi ise 430C° de ve 500 MPa basınç altında 1 saat sürede yapılmıştır. Takviye miktarına bağlı olarak farklı yoğunluklarda ham numuneler elde edilmiştir.



a)

b)

Şekil 2.3. a) Sıcak presleme cihazı; b) Fırın ünitesi

2.6. Gözenek Miktarı

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre bulunmuştur. Deneysel yoğunlukları ise Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür. Numunelerin boyutları $\pm 0,01$ mm hassasiyetindeki kumpas ile ölçüldükten sonra $\pm 0,01$ mg'lık hassasiyete sahip bir terazide ölçülerek belirlenmiştir.

$$\delta t = [(\%W)_1 \cdot \delta 1] + [(\%W)_2 \cdot \delta 2] + \dots + [(\%W)_n \cdot \delta n]$$

(2.1)

Burada;

δt : Kompozitin teorik yoğunluğu

(%W)_n: Her bir takviyenin karışım içindeki ağırlıkça yüzdesi

δ_n : Her bir takviyenin yoğunluğu

Bağıl yoğunluk= $[(\delta_t - \delta_d) / \delta_t] \times 100$

Burada;

δ_d : Deneysel yoğunluk

olacak şekilde yoğunluklar belirlenmiştir.

2.7. Sertlik Ölçümleri

Kompozit ve hibrit numunelerin sertlik ölçümleri Innovatest nemes 9000 marka ve modelinde Brinell sertlik ölçüm cihazı yardımıyla 2,5 mm çapında batıcı uç ve 31,25 kgf kuvvet uygulanarak aşağıdaki formülasyon kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerde 6 adet sertlik ölçümü yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak nihai değerler bulunmuştur.

$$HB = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ Kg/mm}^2$$

(2.2)

Burada;

HB: Brinell Sertlik

P: Uygulanan Kuvvet

d: İz çapı

D: Bilye çapı (mm)



Şekil 2.4. Sertlik ölçüm cihazı

2.8. Çekme Mukavemeti Deneyleri

Çekme testleri için numuneler 80mm x 10 mm x 4mm boyutlarında üretilmiştir. Çekme testlerinde MTS Criterion Universal marka ve modelinde çekme test cihazı kullanılmış olup deneyler ASTM A370 standartlarına uygun olarak 3mm/s' lik sabit çekme hızında numunelerin çekme dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Üniversal çekme cihazı

2.9. Metalografik Çalışmalar

Üretilen ZA27/B₄C, ZA27/Grafen ve ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemeler metalografik inceleme yapmak için elmas disk ile kesilmiş olup bakalite alma cihazında kaplanmıştır. Bu işlemlerin ardından hazırlanan numuneler otomatik parlatma cihazında sırasıyla 600-800-1000-1200 ve 1500 numaralı zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra zımparalan numuneler alümina sıvısı kullanılarak parlatılmış olup etil alkol ile yüzeyleri temizlenmiştir. Korozyon testleri için hazırlanan numuneler ilk olarak çapı 2 mm olacak şekilde delinmiştir. Elektron akımını sağlamak için bir bakır tel numune ile temas ettirilmiştir. Sonrasında soğuk bakalite alınmıştır. Ardından sırasıyla 600- 800-1000- 1200 ve 1500 numaralı zımparalar ile zımparalanmış ve alümina ile parlatılmıştır. Son olarak numune yüzeyi etil alkol ile temizlenmiştir.

2.10. Morfoloji ve İyapı Analizleri

Başlangıç tozları, öğütülen nanokompozit ve hibrit nanokompozit tozlara ait morfolojiler ve iyapı analizleri ZEISS LS 10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Takviyelerin matris içerisinde dağılımı, porozite, nanokompozit ve hibrit nanokompozit numunelerin arayüzey incelemeleri SEM analizleri ile detaylı bir şekilde yapılmıştır. SEM'de aşınma deneyleri sonrasında aşınma çeşidi ve yüzey durumu ile korozyon deneyleri sonrası yüzeydeki korozyon tahribatı incelenmiştir.

ZA27/ /Grafen/ B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozit numunelerin faz tanımları için Rigaku Corporation, Japan marka X ışınları difraktometre (XRD) cihazı kullanılmıştır. Bu işlem, 40kV ve 30mA koşullarında ve Cuk α (1,54059 Ao) radyasyonu altında gerçekleştirilmiştir. XRD çekimleri 10-80° ve 2 θ arasında yapılmıştır.



Şekil 2.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

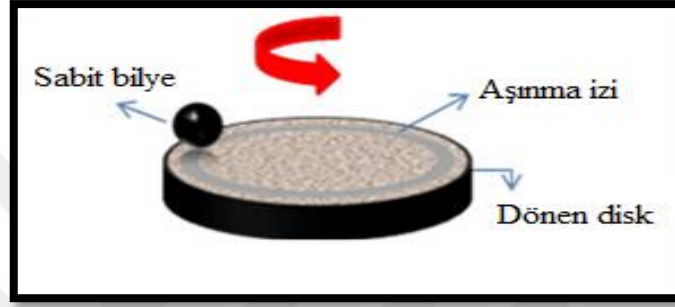


Şekil 2.7. XRD Analiz cihazı

2.11. Aşınma Testleri

ZA27/Grafen nanokompozit numunelerin aşınmaya olan dirençlerini belirlemek için çevresel hız, aşınma oranı, alınan yol ve uygulanan yük gibi parametreler kullanılmıştır. Deneylede DUCOM markalı ball-on-disk tipi aşınma deney düzeneği kullanılmıştır. Aşınma testlerinden önce numunelerin yüzey pürüzlük değerleri yaklaşık 0,2 μm olarak

ölçülmüştür. Aşındırıcı olarak çapı 10 mm olan H11 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş olan bilyeler kullanılmıştır. Aşınma test numuneleri çapı 30 mm olacak şekilde üretilmiş olup bir yüzeyinde iki farklı yük olmak üzere her iki yüzeyde toplam dört adet yük kullanılmıştır. Uygulanan yükler 1,2,5 ve 10 N olmak üzere 48 ve 96 dakika süreyle 100 rpm hızda gerçekleşmiştir. Aşınma testleri öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüş olup ağırlık kayıpları belirlenmiştir.



Şekil 2.8. Ball-on-disk aşınma sistemi şematik gösterimi

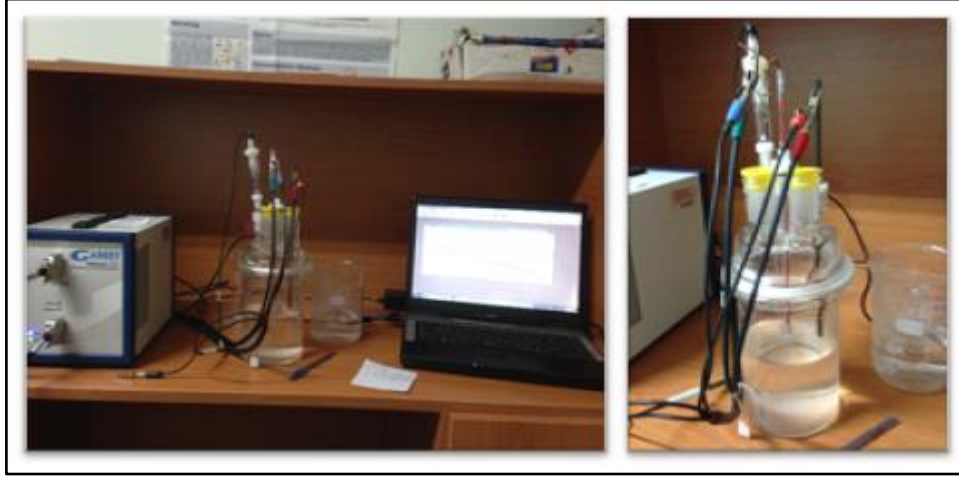


Şekil 2.9. Ball-on-disk aşınma deney cihazı

2.12. Korozyon Testleri

Korozyon deneylerinde GAMRY reference 3000 marka korozyon cihazı kullanılmıştır. Korozyon numuneleri ilk olarak çapı 2 mm olacak şekilde delinmiştir. Elektron akımını sağlamak için bir bakır tel numune ile temas ettirilmiş olup daha

sonrasında soğuk bakalite alınmıştır. Ardından sırasıyla 600, 800, 1200 ve 1500 numaralı zımparalar ile zımparalanmış ve alümina ile parlatılmıştır. Son olarak numune yüzeyi etil alkol ile temizlenmiştir. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozit numunelerinin korozyon dayanımlarını belirlemek için potansiyodinamik polarizasyon testler yapılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerine 500 mV katodik potansiyel ile başlanıp 1 mV/s tarama hızında +500 mV anodik potansiyeline kadar devam edilmiştir. Deneylede %3,5 oranında NaCl çözeltisi elektrolit olarak kullanılmıştır. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozit numunelerinin korozyon dayanımını belirlenmek için potansiyodinamik polarizasyon testlerinden iki adet yapıp ortalaması alınmıştır. Korozyon deneylerine başlanmadan önce her bir numunenin yüzeyi metanol ile yıkanıp kurutulmuştur.



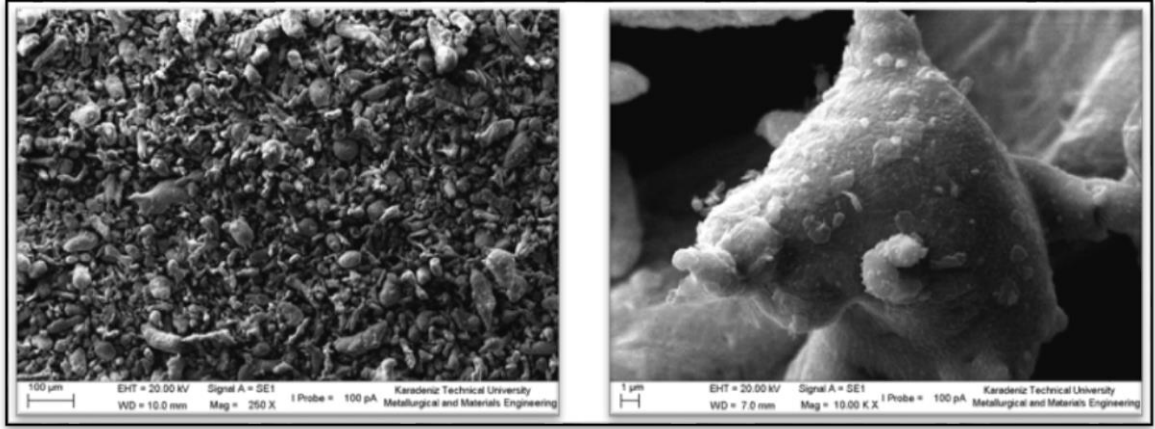
Şekil 2.10. Korozyon deney düzeneği

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. ZA27/Grafen/B₄C Nanokompozit ve Hibrit Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İyapı ve Morfolojileri

3.1.1. ZA27 Tozların Karakterizasyonu, İyapı ve Morfolojileri

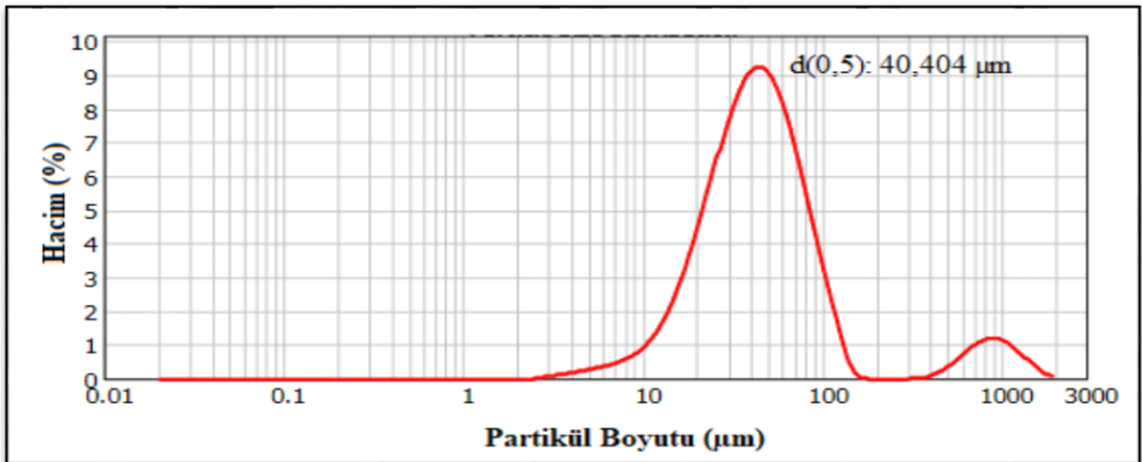
ZA27 alaşım tozlarının Şekil 3.1’de verilen SEM görüntülerinde görüldüğü gibi tozların düzensiz bir formda ligament (yumru) şeklinde oldukları görülmektedir.



(a)

(b)

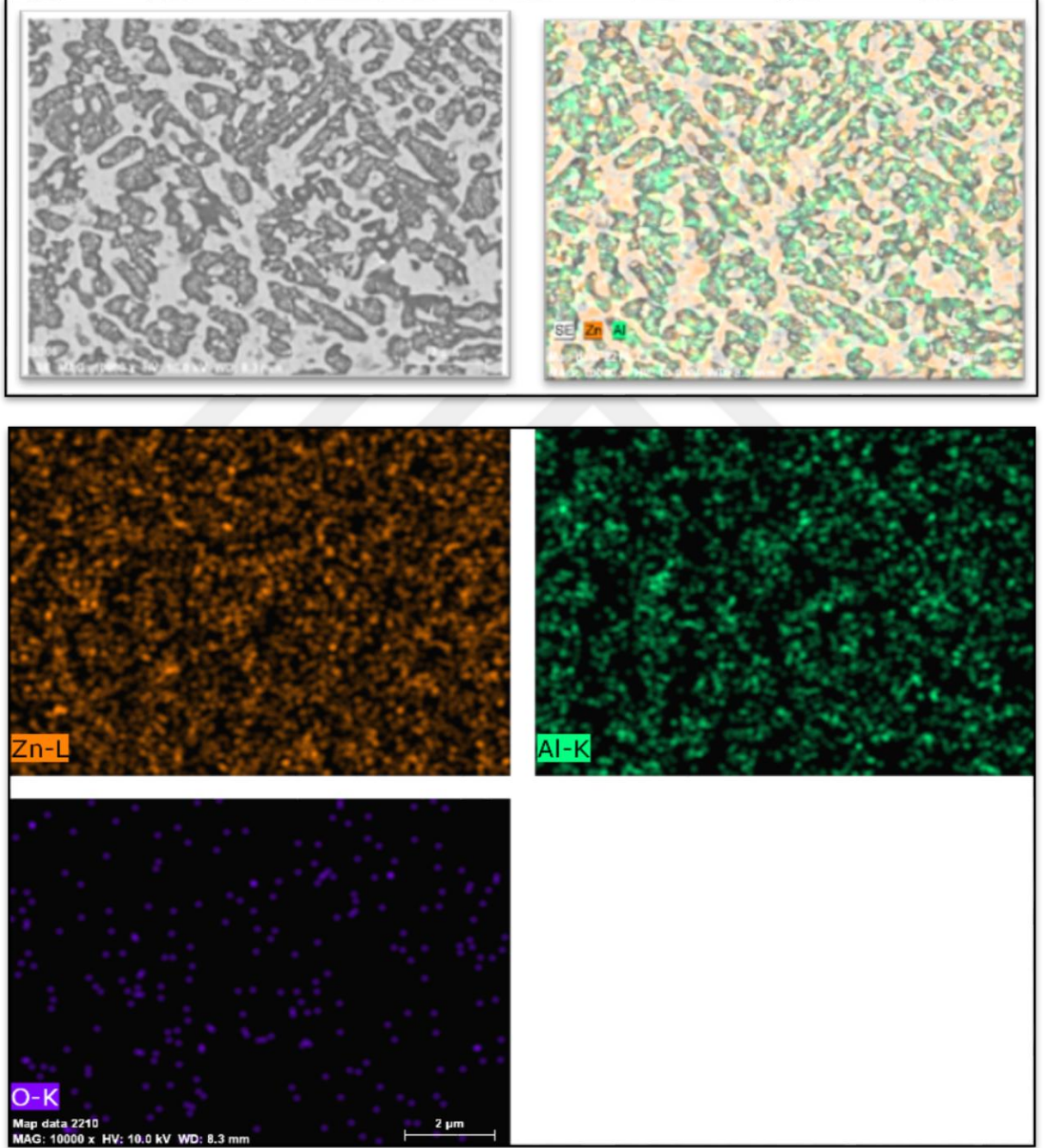
Şekil 3.1. Başlangıç aşamasındaki ZA27 tozunun değişik büyütmelelerdeki SEM görüntüleri
a)250 X b) 1000 K X



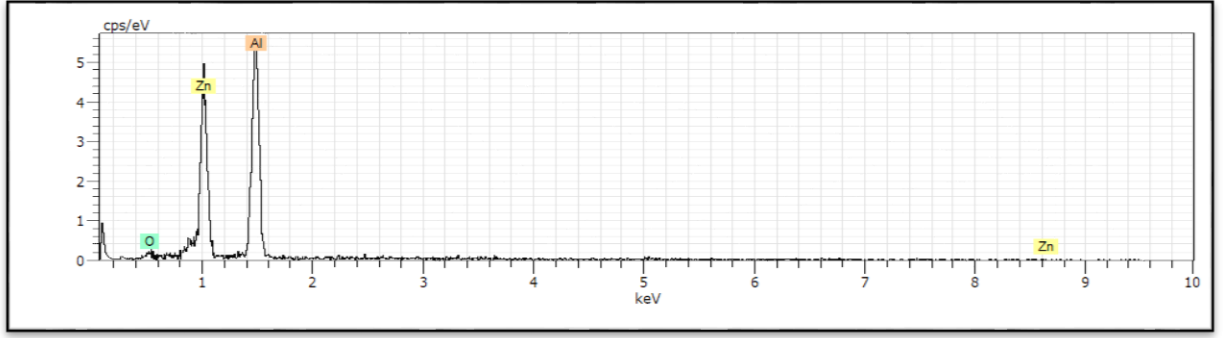
Şekil 3.2. ZA27 başlangıç tozlarının partikül boyutu analizi

Şekil 3.2’de ZA27 başlangıç tozlarının partikül boyut analizi yapılmış olup ortalama partikül boyutu 40,404 μm olarak ölçülmüştür.

EDS analizi yapılan ZA27 numunesinin Şekil 3.4’e bakıldığında Zn oranı %51,21 iken Al oranı 47,71 olduğu görülmektedir. Çinko içeriği daha zengin olduğundan bu fazın β fazı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.3. 1 saatlik Mekanik Alaşımla sonrasında üretilen ZA27 numunesi içyapı görüntüleri

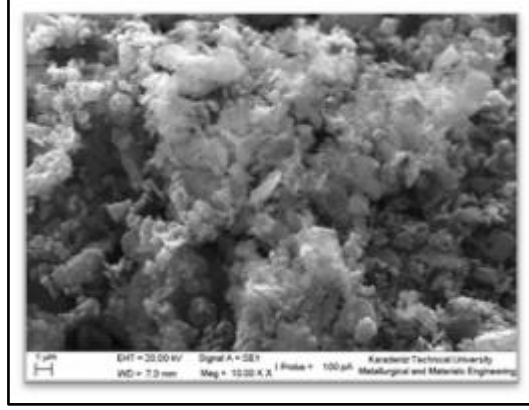


El	AN	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[%]
Zn	30	L-series	51.74	51.21	29.91	3.5
Al	13	K-series	48.20	47.71	67.53	2.4
O	8	K-series	1.09	1.07	2.57	0.5
Total:			101.02	100.00	100.00	

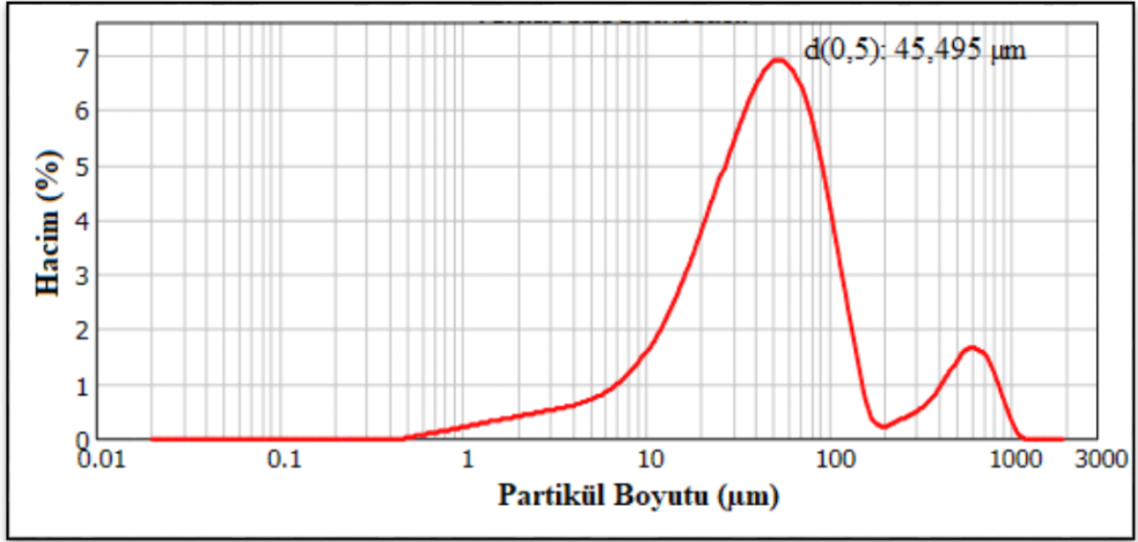
Şekil 3.4. 1 saatlik Mekanik Alaşımın sonrasında üretilen ZA27 numunesi EDS analiz sonuçları

3.1.2. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İyapı ve Morfolojileri

ZA27/Grafen nanokompozit tozlarında grafenin ZA27 matris tozların içine homojen olarak dağıtılması ve aynı zamanda gömüldüğü bir öğütme süresini belirlenmiştir. Bundan dolayı optimum öğütme süresini belirlemek için kompozit tozları 0, 1 ve 4 saatlik öğütme işlemlerine tabii tutulmuştur. Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 0, 1 ve 4 saatlik öğütme işlemi sonrasındaki morfolojileri ve SEM EDS element dağılımları gösterilmiştir. 0 saatlik öğütme işleminde matris içerisindeki az miktarda grafen partiküllerinin gömüldüğü görülmüştür. Öğütme süresi 1 saatte ise matris içerisine daha fazla grafen partikülleri gömüldüğü gözlemlenmiştir. 4 saat öğütme işlemi sonucunda üretilen numunelerin daha homojen bir yapıda olduğu gözlemlenmiş fakat grafen tozlarının mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu nedenle 1 saatlik öğütme işleminin takviye-matris etkileşimi bakımından yeterli olduğu belirlenmiştir.

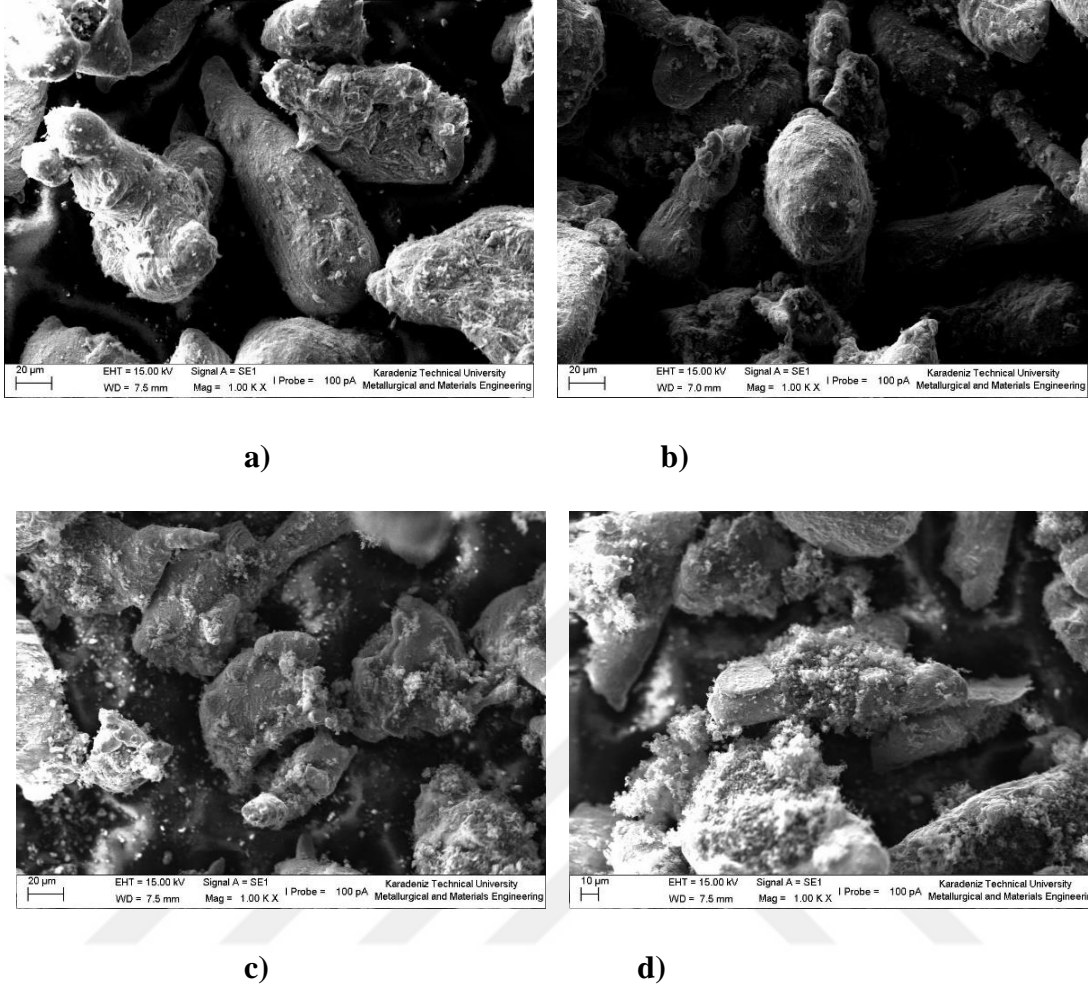


Şekil 3.5. Grafen nanolehva başlangıç tozlarının 10.00 K X büyütmelelerdeki morfolojisi

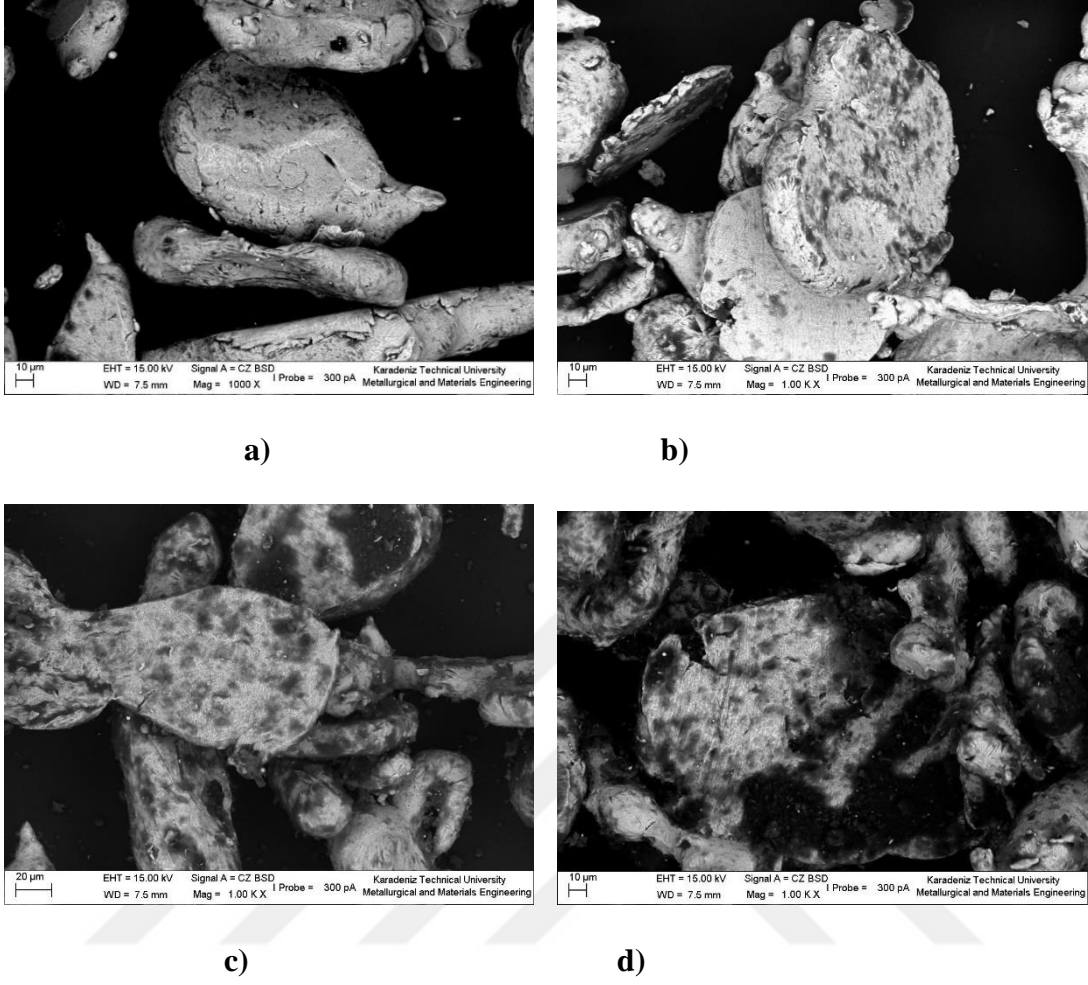


Şekil 3.6. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi

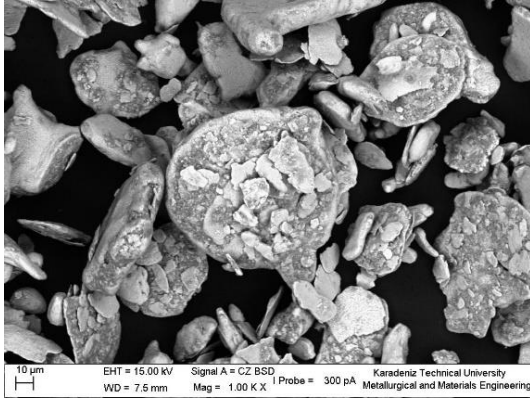
Şekil 3.6'da partikül boyutunda ZA27 maris tozlarına göre ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının partikül boyutunda artış gözlenmiştir. Bu artış nedeni olarak tozlarda meydana gelen soğuk kaynak sonucu ortaya çıktığı söylenebilir.



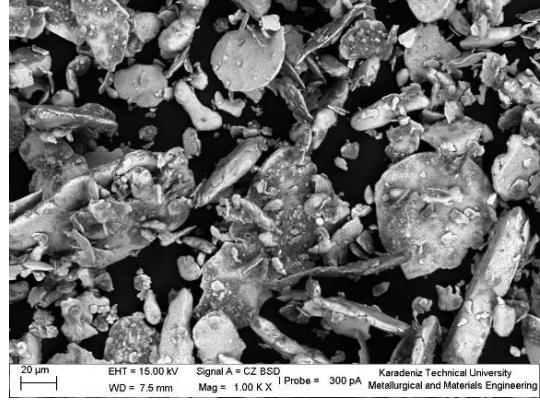
Şekil 3.7. ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 0 saat mekanik alaşımla işleminden sonra elde edilen SEM görüntüleri a) ZAG-0,5-0h b) ZAG-1-0h, c) ZAG-2-0h, d) ZAG-3-0h



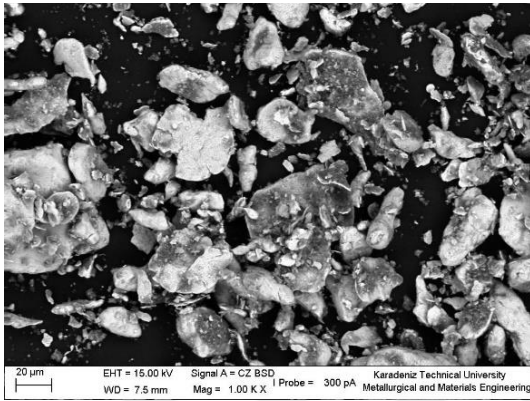
Şekil 3.8. ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 1 saat mekanik alaşımla işleminden sonra elde edilen SEM görüntüleri a) ZAG-0,5-1h b) ZAG-1-1h, c) ZAG-2-1h, d) ZAG-3-1h



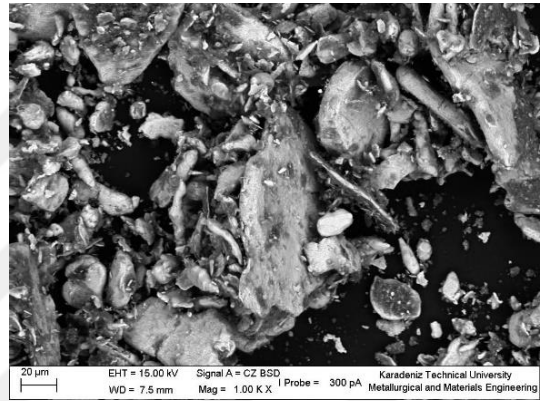
a)



b)

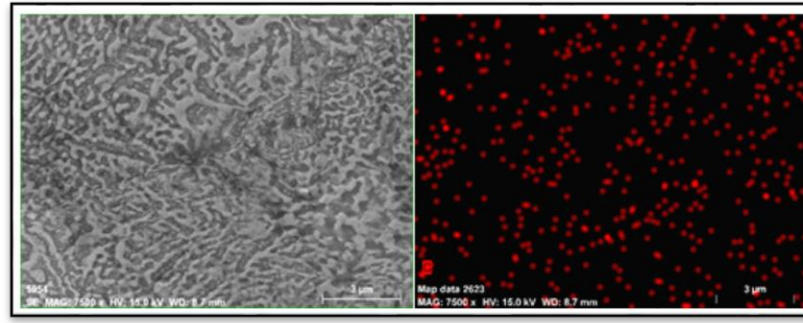


c)



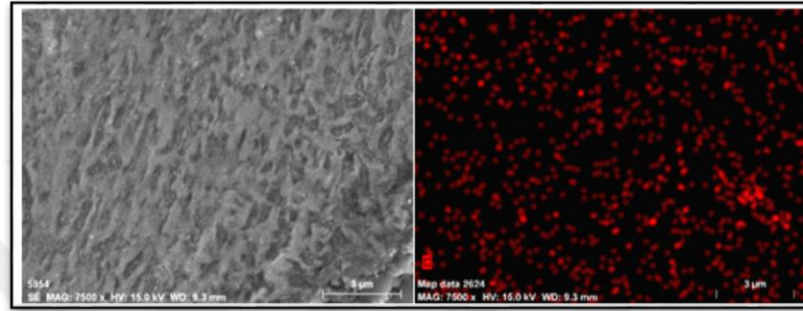
d)

Şekil 3.9. ZA27/Grafen nanokompozit tozlarının 4 saat mekanik alaşımla işleminden sonra elde edilen 1.00 K X büyütmedeki SEM görüntüleri a) ZAG-0,5-4h b) ZAG-1-4h, c) ZAG-2-4h d) ZAG-3-4h



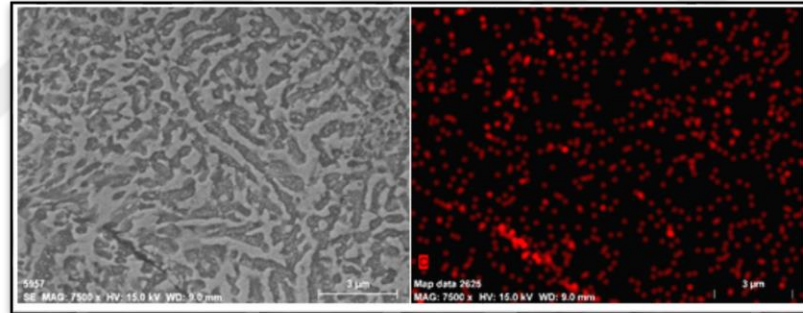
a)

b)



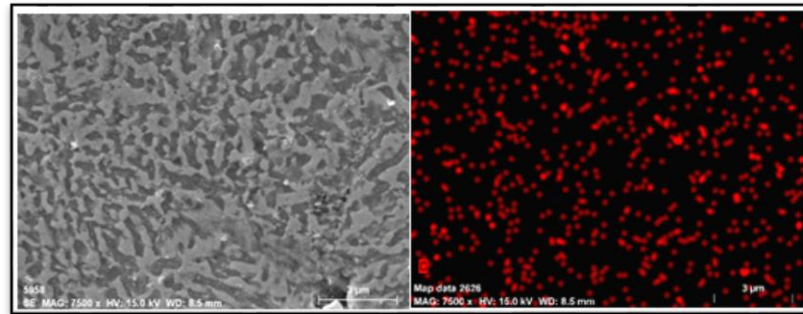
c)

d)



e)

f)



g)

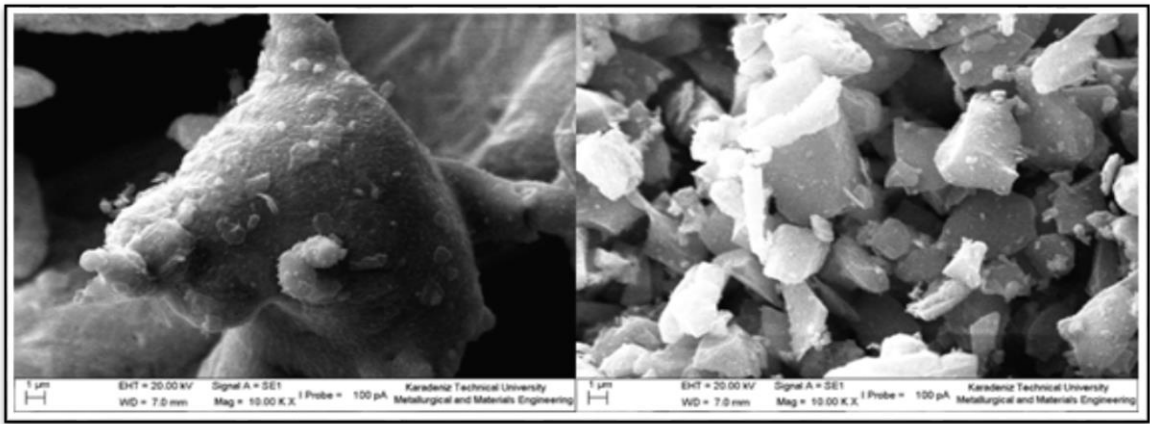
h)

Şekil 3.10. ZA27/Grafen nanokompozit numunelerin mikroyapı ve EDX analizleri kırmızı renkler karbon miktarını göstermektedir. : (a–b) ZAG-0,5-1h.; (c–d) ZAG-1-1h; (e–f) ZAG-2-1h; (e–f) ZAG-3-1h

Şekil 3.10. (a-b) 'de görülebileceği gibi, takviye parçacıkları için kullanılan grafen, ZA27 matrisinde normal dağılmış haldedir. ZA27 matrisindeki heterojen dağılım, ZAG- 1-1h ve ZAG-2-1h nanokompozitleri için gözlenmiştir (Şekil 3.10 (d-f)). Nanografen parçacık kümelenmesinde bir artış, grafen nanoparçacıklarının aglomerasyonunda bir artışa neden olur. Sonuç olarak, ZA27 matrisindeki nanografen parçacıklarının dağılımı homojen değildir. Daha fazla nanografen parçacık kümesinin, ZA27/Grafen nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini, aşınmasını ve korozyon davranışını olumsuz etkilediği sonucuna varılabilir.

3.1.3. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İçyapı ve Morfolojileri

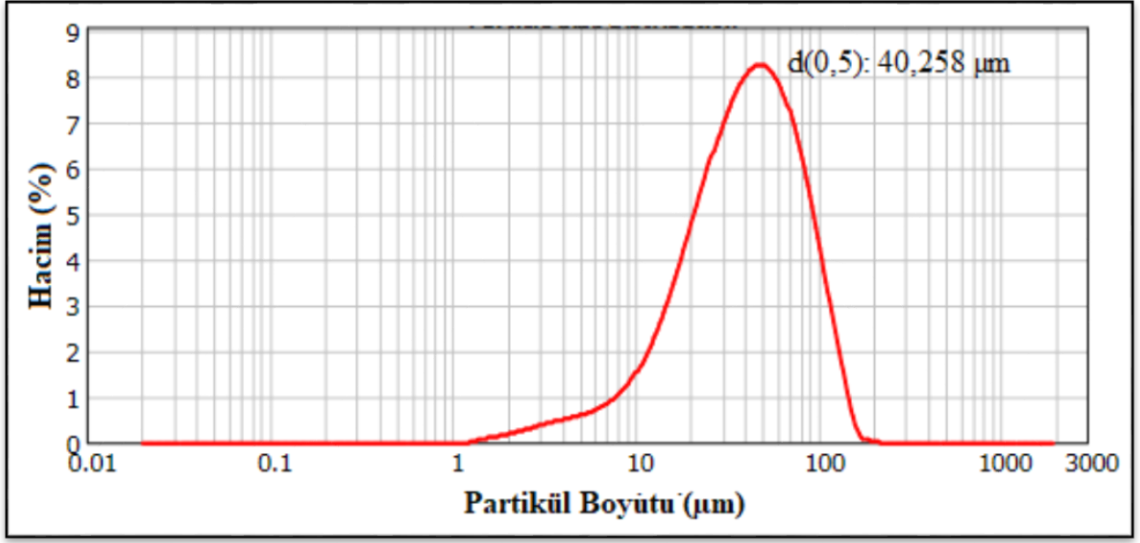
ZA27/B₄C kompozit tozlarında B₄C partiküllerinin ZA27 matris tozların içine homojen olarak dağıtılması ve aynı zamanda gömüldüğü bir öğütme süresini belirlenmiştir. Bundan dolayı optimum öğütme süresini belirlemek için nanokompozit tozları 0, 1 ve 4 saatlik öğütme işlemlerine tabii tutulmuştur. Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de %3 içeren B₄C nanokompozit tozlarının 0, 1 ve 4 saatlik öğütme işlemi sonrasındaki morfolojileri ve SEM EDS element dağılımları gösterilmiştir. 0 saatlik öğütme işleminde matris içerisindeki az miktarda B₄C partiküllerinin gömüldüğü görülmüştür. Öğütme süresi 1 saatte ise matris içerisine daha fazla B₄C partikülleri gömüldüğü gözlemlenmiştir. 4 saat öğütme işlemi sonucunda üretilen numunelerin korozyon ve aşınma özellikleri istenilen seviyede olmamıştır. Bu nedenle 1 saatlik öğütme işleminin takviye-matris etkileşimi bakımından yeterli olduğu belirlenmiştir.



a)

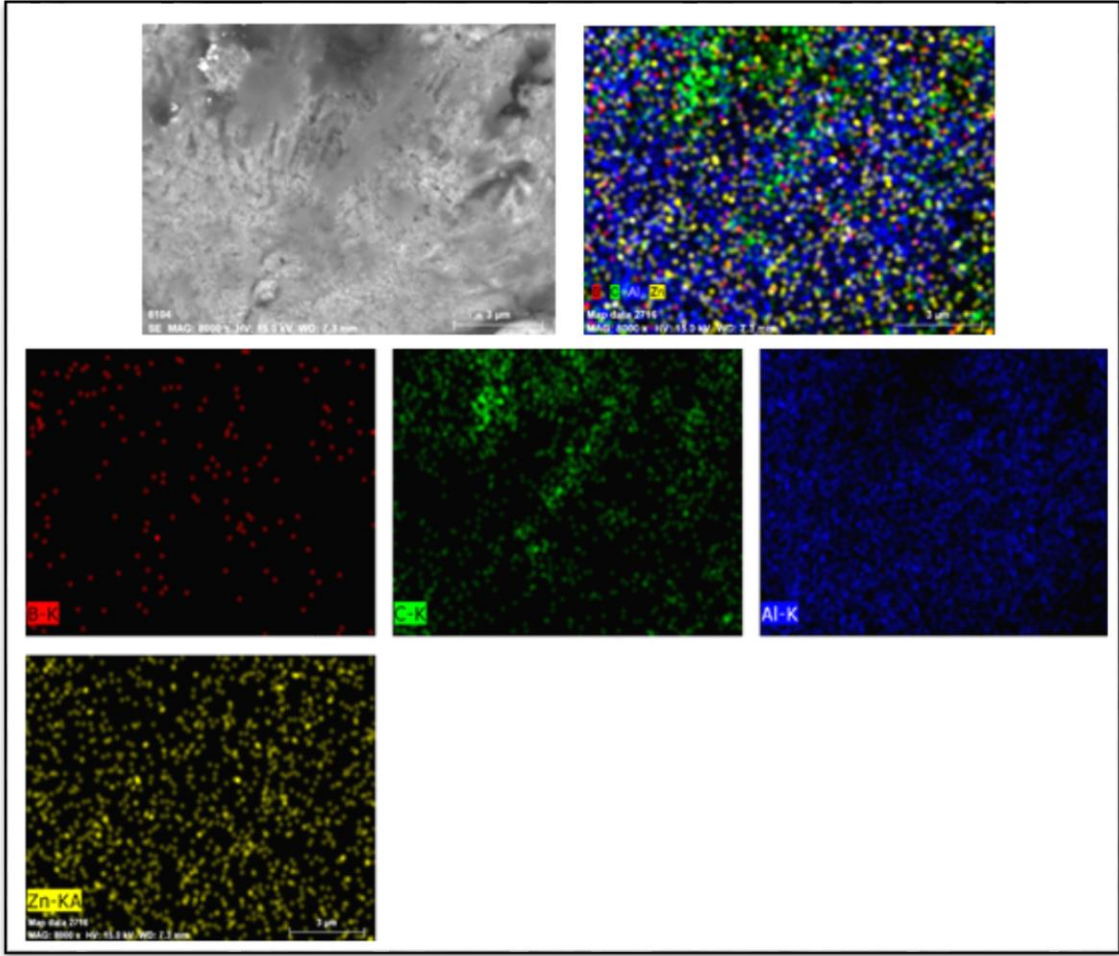
b)

Şekil 3.11. Başlangıç tozlarının 10.00 K X büyütmelemlerdeki morfolojisi, a) ZA27, b) B₄C

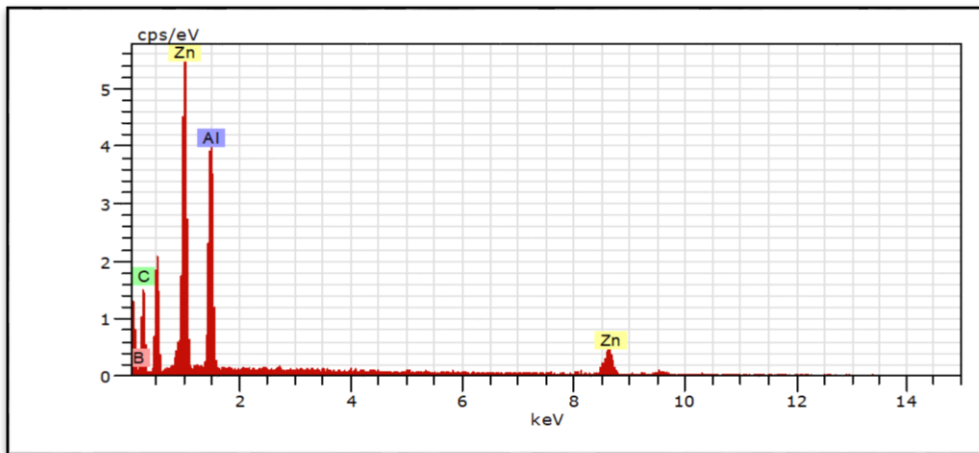


Şekil 3.12. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZAB-1-1h nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi

Mekanik alaşımlama işleminde yüksek enerjili öğütme işlemine tabi tutulan toz partikülleri bilye:toz:değirmen ve bilye:toz:bilye yüzeyleri arasındaki çarpışmalar toz boyut anlamında değişmelere neden olmuştur.



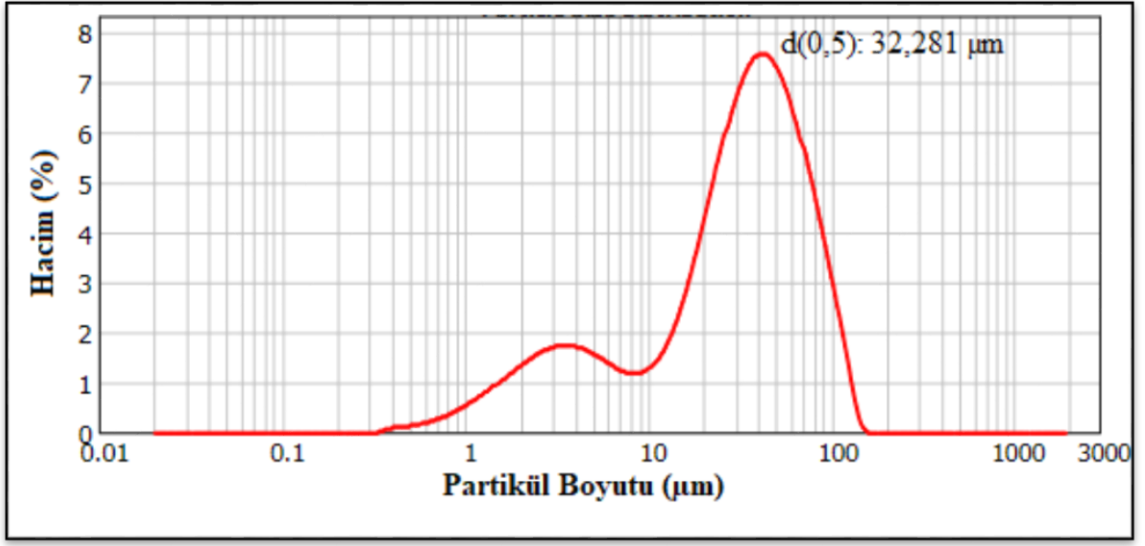
Şekil 3.13. 1 Saatlik mekanik alaşımla sonrasında üretilen ZAB-3-1h nanokompozitin içyapı görüntüleri



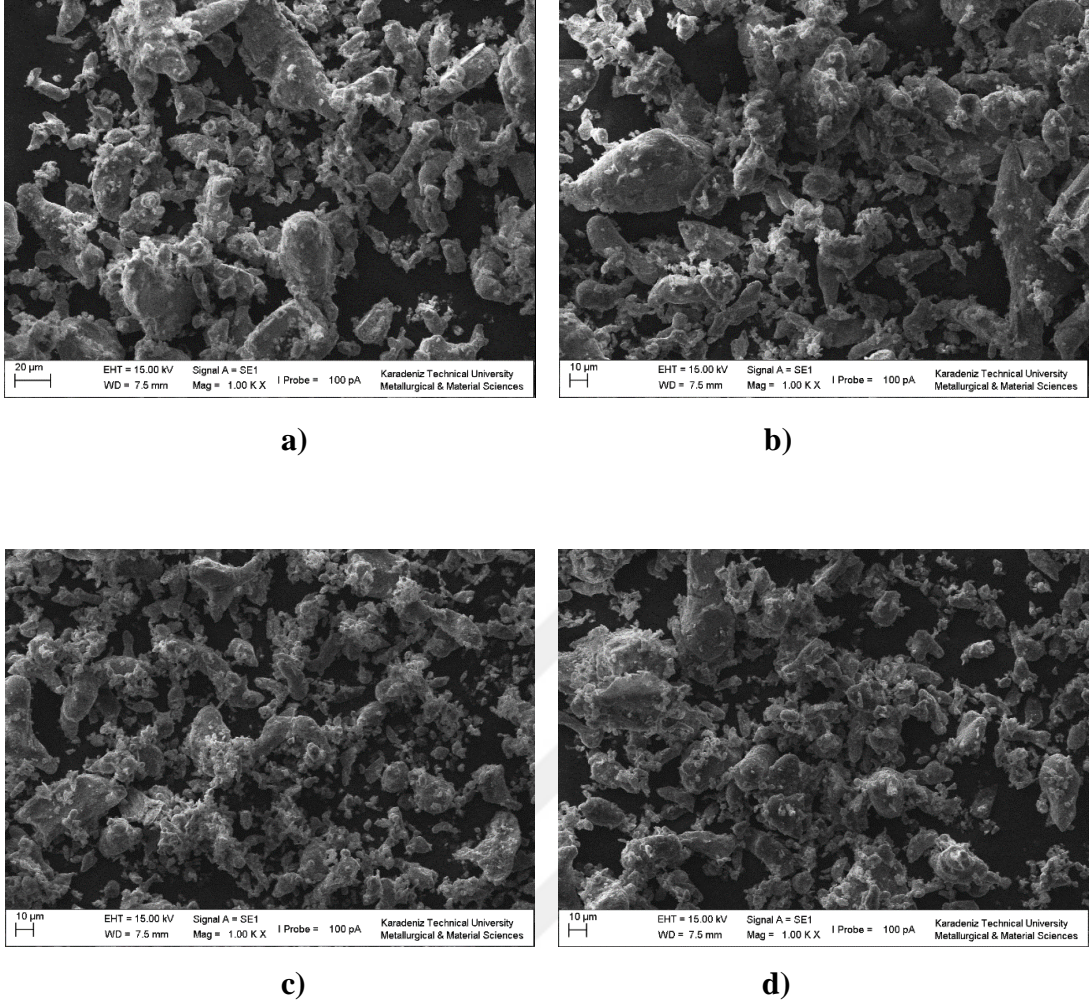
Şekil 3.14. 1 Saatlik mekanik alaşımla sonrasında üretilen ZAB-3-1h nanokompozitin EDS analiz sonuçları

3.1.4. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerin Karakterizasyonu, İyapı ve Morfolojileri

Partikül boyutu analizleri incelendiği zaman ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozit tozların tane boyutunda küçülme gözlemlenmektedir. Bu küçülme tozların tane boyutunun kararlı hale gelmesi ile açıklanabilir. Grafen takviyesinin %3 olarak sabitlenmesi ve nano boyuttaki B₄C takviyesi ile toz boyutu 32,281 μm ' ye düştüğü görülmüştür.

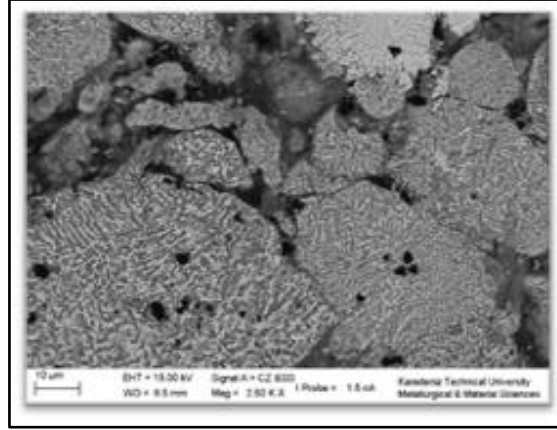


Şekil 3.15. 1 saat mekanik alaşımlama yapılan ZAGB-3-1h hibrit nanokompozit tozlarının partikül boyutu analizi

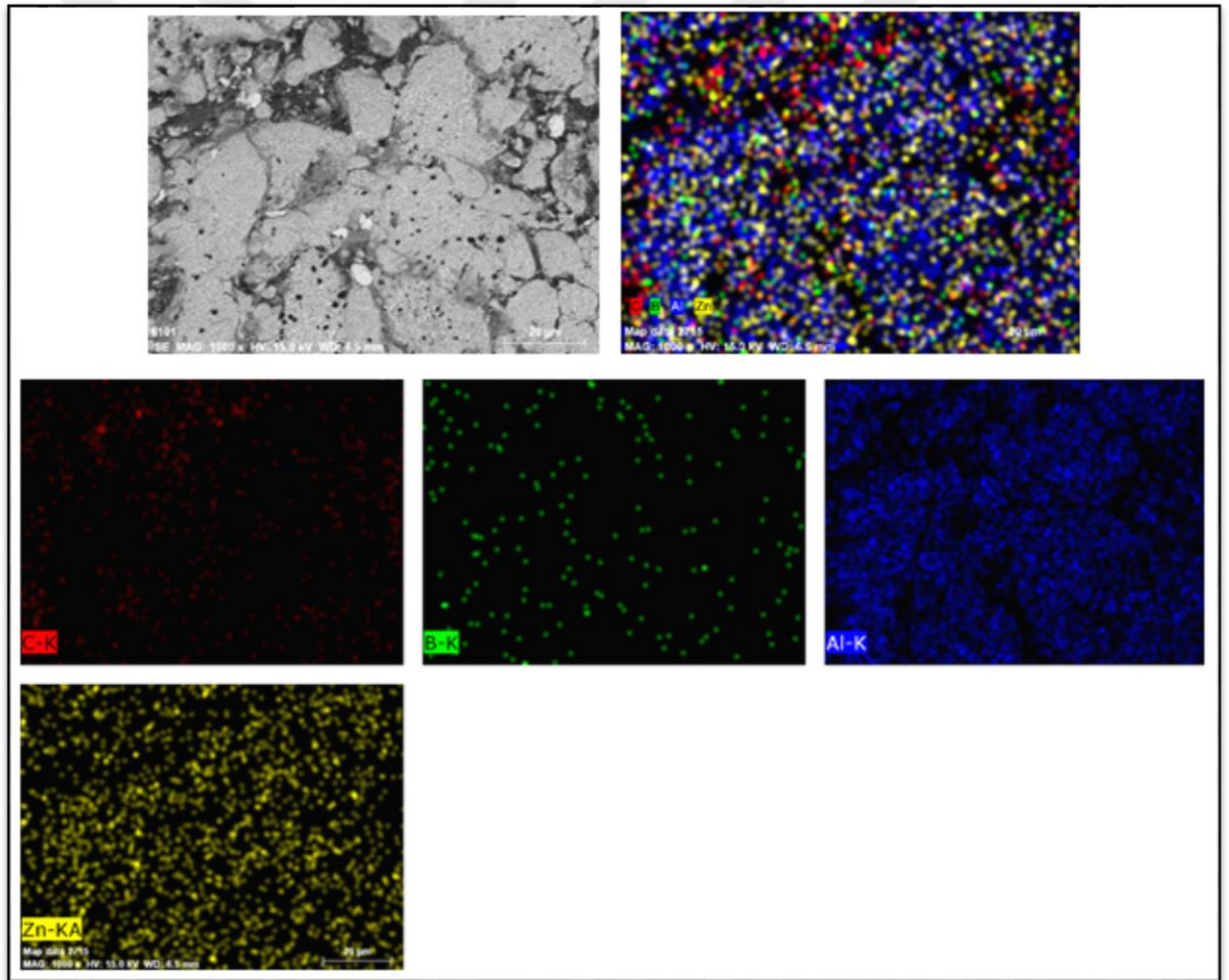


Şekil 3.16. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozit tozlarının 1 saat mekanik alaşımla işleminden sonra elde edilen 1.00 K X büyütmedeki SEM görüntüleri a) ZAGB-0,5-4h b) ZAGB-1-1h, c) ZAGB-2-1h d) ZAGB-3-1h

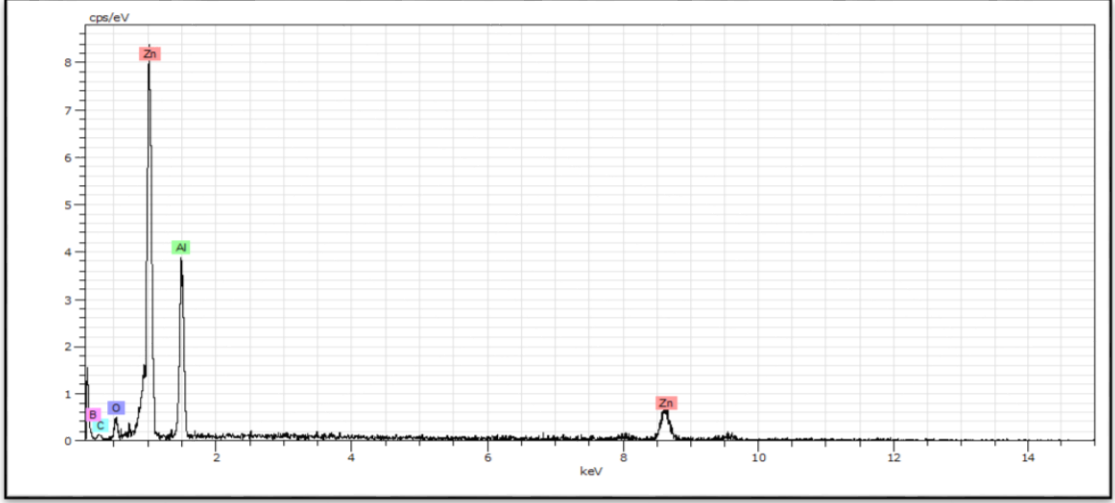
Hibrit nanokompozit malzemelerde yüksek bir performans elde etmek için takviye partiküllerinin matris içersinde homojen dağılımın sağlanması ve bununla beraber takviye partikülleri ile matris arasında iyi bir arayüzey bağının oluşturulması şarttır. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerine ait olan SEM EDS element dağılımları verilmiştir. Bu içyapılara göre, kırmızı, yeşil, mavi, ve sarı bölgeler sırasıyla C, B, Al ve Zn’nin elementel dağılımını göstermektedir.



Şekil 3.17. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerinden ZABG-3-1h kodlu numunenin iç yapı görüntüsü



Şekil 3.18. 1 Saatlik mekanik alaşımla sonrasında üretilen ZAGB-3-1h hibrit nanokompozitin içyapı görüntüleri



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Zn	30	K-series	65.38	68.77	38.46	3.2
Al	13	K-series	18.18	19.12	25.92	1.0
B	5	K-series	5.68	5.97	20.20	2.7
O	8	K-series	4.12	4.33	9.90	1.4
C	6	K-series	1.72	1.81	5.51	0.9
Total:			95.08	100.00	100.00	

Şekil 3.19. 1 saatlik Mekanik Alaşımın sonrasında üretilen ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin numunesi EDS analiz sonuçları

3.2. Gözenek Miktarı

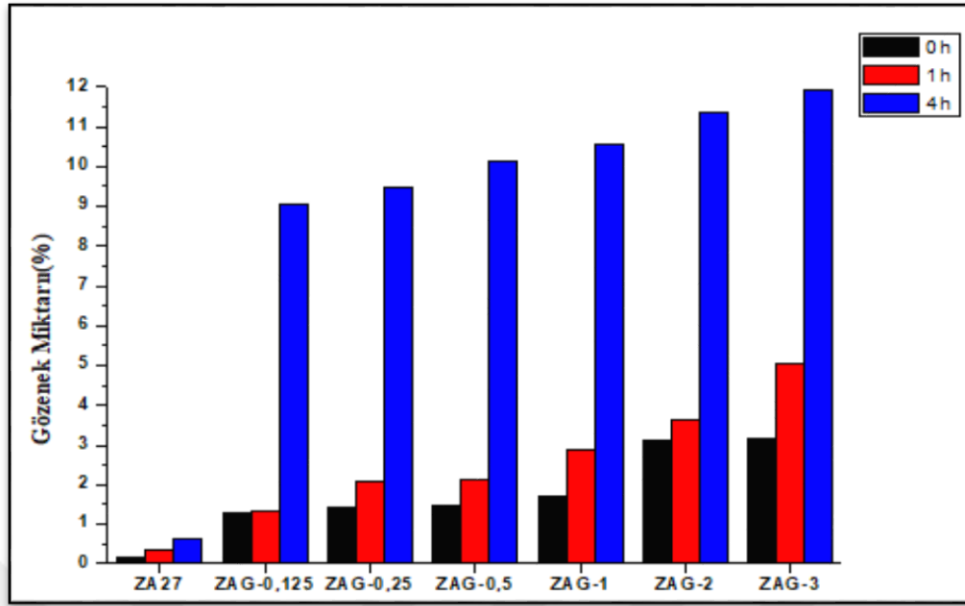
Matris malzemesi olarak kullanılan ZA27 alaşımının yoğunluk değeri 5g/cm^3 olup; takviye malzemesi olarak kullandığımız B₄C alaşımının yoğunluk değeri $2,52\text{ g/cm}^3$ ve Grafen yoğunluk değeri $2,2\text{ g/cm}^3$ olması ile nano boyuttaki takviye tozları matris malzemesinde tane sınırları arasına yerleşmesi ile ZA27/Grafen/B₄C nano hibrit ve kompozit numunelerde yoğunluk değerinin düşmesine ve gözenek miktarının (porozite) artmasına sebep olmuştur. Ağırlıkça artan takviye tozları gözenek miktarını artırdığı grafiklerde belirtilmiştir. Ayrıca bir diğer husus olan mekanik alaşımlama süresi her üç grup numunelerde gözenek miktarını artırdığı açıkça görülmüştür.

3.2.1. ZA27/Grafen Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı

Şekil 3.20 ve Tablo 3.1 incelendiği zaman ZA27/Grafen nanokompozit numunelerin gözenek miktarları verilmiştir. Artan grafen miktarı ile gözenek miktarındaki en fazla artış % 11,93 ile 4 saatlik mekanik alaşımlama yapılan ZAG-3 numunesinde görülmüştür. 0 saatlik ve 1 saatlik mekanik alaşımlama sürelerinde numuneler birbirine yakın değerler verirken 4 saatlik mekanik alaşımlama süresinde ciddi bir artış söz konusu olmuştur. Tozların tane sınırında topaklanması ve paketleme faktörünün zayıf olduğu düşünülmektedir. ZAG-1 numunesinde 0 saatte gözenek miktarı %1,72 gibi bir değer çıkması sıcak presleme yöntemi ile nano boyuttaki takviye tozları ile malzemeler üretilebileceği ispatlanmıştır.

Tablo 3.1. ZA27/Grafen nanokompozitlerin gözenek miktarları

Gözenek Miktarı (%)			
Numune	0h	1h	4h
ZA27	0,16	0,36	0,6
ZAG-0,125	1,26	1,33	9,05
ZAG-0,25	1,42	2,07	9,45
ZAG-0,5	1,46	2,11	10,12
ZAG-1	1,72	2,86	10,56
ZAG-2	3,1	3,65	11,34
ZAG-3	3,16	5,05	11,93



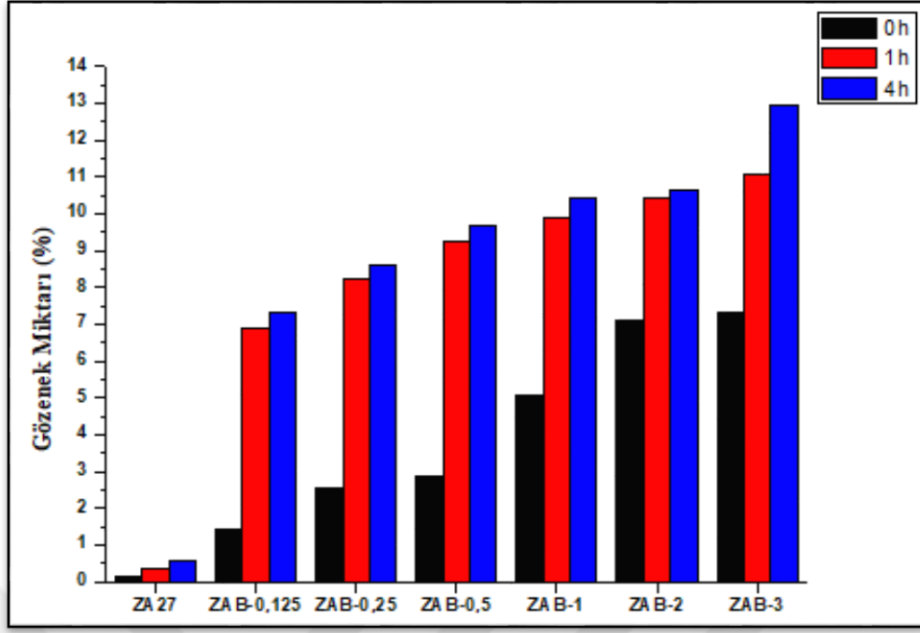
Şekil 3.20. ZA27/Grafen nanokompozitlerde mekanik alaşımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı

3.2.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı

Tablo 3.2 ve Şekil 3.21 incelendiği zaman ZA27/Grafen nanokompozit numunelerde gözenek miktarları verilmiştir. Artan B₄C miktarı ile gözenek miktarındaki en fazla artış % 12,97 ile 4 saatlik mekanik alaşımlama süresinde ZAB-3 numunesinde görülmüştür. Burada nano boyuttaki B₄C tozlarının tane sınırlarına yerleşmesi ile ZA27/B₄C nanokompozit numunelerinin yoğunlukları düşmüş gözenek miktarı artmıştır. Ayrıca ZA27 matris içerisine nano boyutta katılan B₄C takviyesinin artan oranlarda gözenek miktarını artırdığı bazı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [100].

Tablo 3.2. ZA27/ B₄C nanokompozitlerin gözenek miktarları

Gözenek Miktarı (%)			
Numune	0h	1h	4h
ZA27	0,16	0,36	0,6
ZAB-0,125	1,45	6,89	7,34
ZAB-0,25	2,54	8,25	8,59
ZAB-0,5	2,89	9,25	9,66
ZAB-1	5,1	9,89	10,45
ZAB-2	7,1	10,44	10,63
ZAB-3	7,3	11,07	12,97



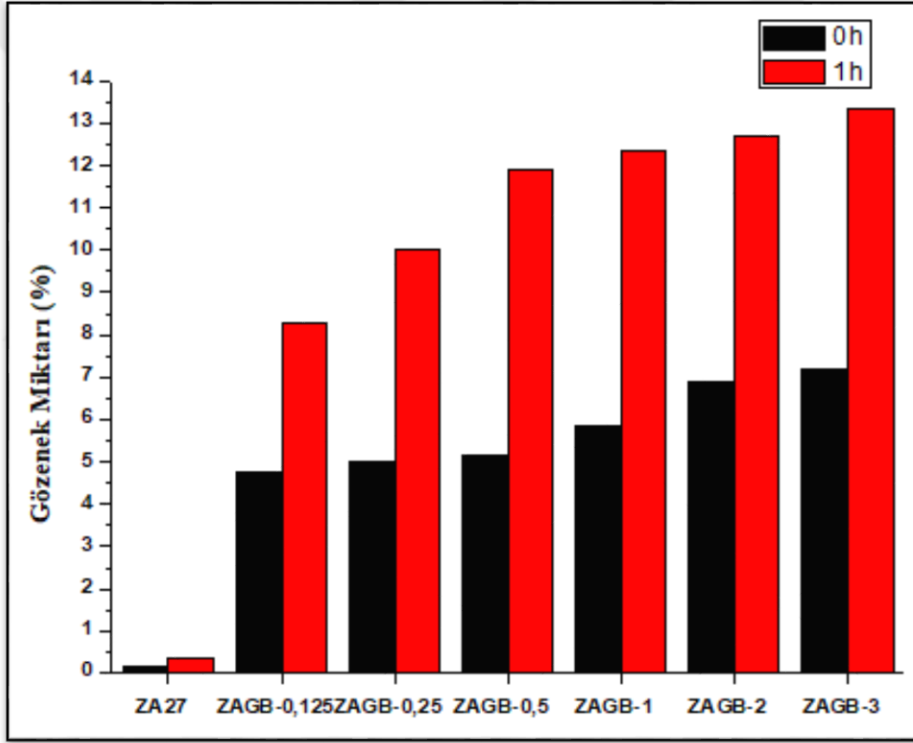
Şekil 3.21. ZA27/B₄C nanokompozitlerde mekanik alaşımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı

3.2.3. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerde Gözenek Miktarı

Tablo 3.3 ve Şekil 3.22 incelendiği zaman, ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozit numunelerin gözenek miktarları verilmiştir. Grafen oranı %3 ile sabit tutulurken artan B₄C oranının gözenek miktarı artışında ciddi etkileri olmuştur. En düşük gözenek miktarı 0 saatlik mekanik alaşımlama ile ZABG-0,125 numunesinde %4,78 iken, en yüksek değer 1 saatlik mekanik alaşımlama süresinde ZABG-3 numunesinde %13,34 olarak hesaplanmıştır. ZABG grubu numunelerde iki farklı takviye malzemesi olmasından dolayı yoğunluğun azaldığı gözenek miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Homojen bir yapı sağlamak amacı ile yapılan 1 saatlik MA süresinde gözenek miktarının arttığı ve tozların topaklandığı belirlenmiştir. MA süresinin (0-1 saat) yoğunluk ve gözenek miktarında ciddi etki yaptığı Şekil 3.22’ de görülmektedir.

Tablo 3.3. ZA27/Grafen/ B₄C nanokompozitlerin gözenek miktarları

Gözenek Miktarı (%)		
Numune	0h	1h
ZA27	0,16	0,36
ZAGB-0,125	4,78	8,28
ZAGB-0,25	5,01	10,02
ZAGB-0,5	5,16	11,89
ZAGB-1	5,85	12,34
ZAGB-2	6,9	12,7
ZAGB-3	7,2	13,34

Şekil 3.22. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozitlerde mekanik alışımlama süresi ve artan Grafen miktarına göre gözenek miktarı

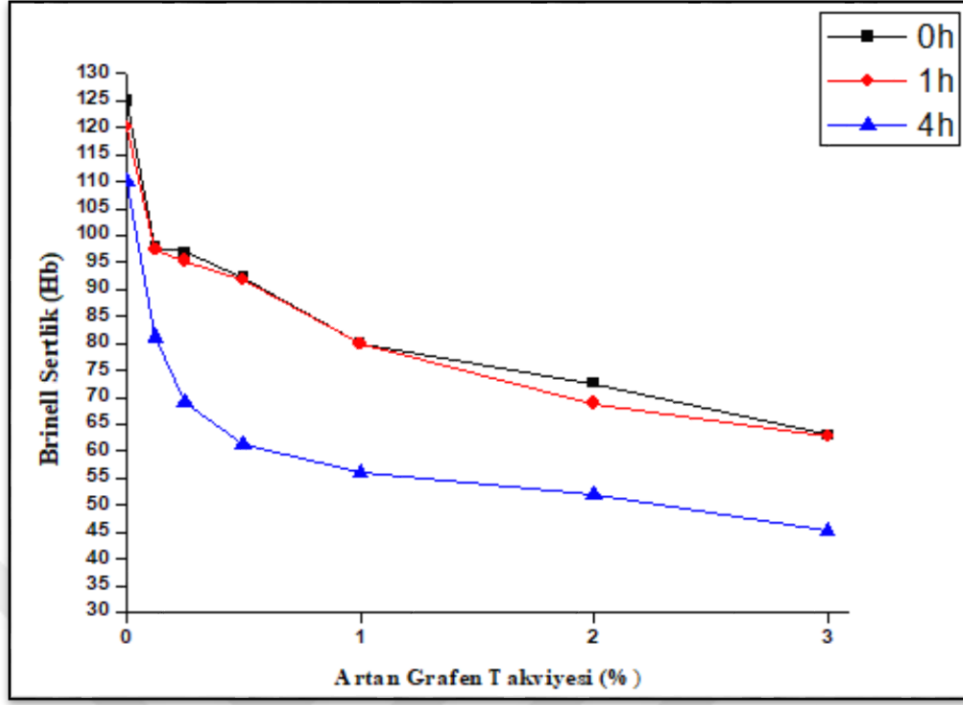
3.3. Sertlik Sonuçları

3.3.1. ZA27/Grafen Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları

ZA27/Grafen nanokompozit numunelerin sertlik değerlerine baktığımız zaman artan grafen takviyesi oranı ile düştüğü aynı zamanda mekanik alaşımın süresinin sertliğin azalmasında önemli bir etken olduğu görülmüştür. Saf ZA27 alaşımının sertlik değeri 125 Hb iken %0,125 Grafen takviyesi ile bu değer 97,91 Hb'ye kadar düşmüştür. Bunun nedeni olarak artan grafen oranıyla tane sınırlarının büyüdüğü, gözenek miktarının artmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca artan mekanik alaşımlama süresi boyunca özellikle 4 saatlik MA süresinin grafenin yağlayıcı özelliğinden dolayı sinterlemeyi zorlaştırdığı düşünülmektedir.

Tablo 3.4. ZA27/Grafen nanokompozitlerin sertlik değerleri

Brinell Sertlik (Hb)			
Numune	0h	1h	4h
ZA27	125	120	110
ZAG-0,125	97,91	97,33	81,23
ZAG-0,25	96,85	95,32	69,1
ZAG-0,5	92,23	92,88	61,23
ZAG-1	80,03	79,81	56,12
ZAG-2	72,64	68,86	42
ZAG-3	63,01	62,67	30,2



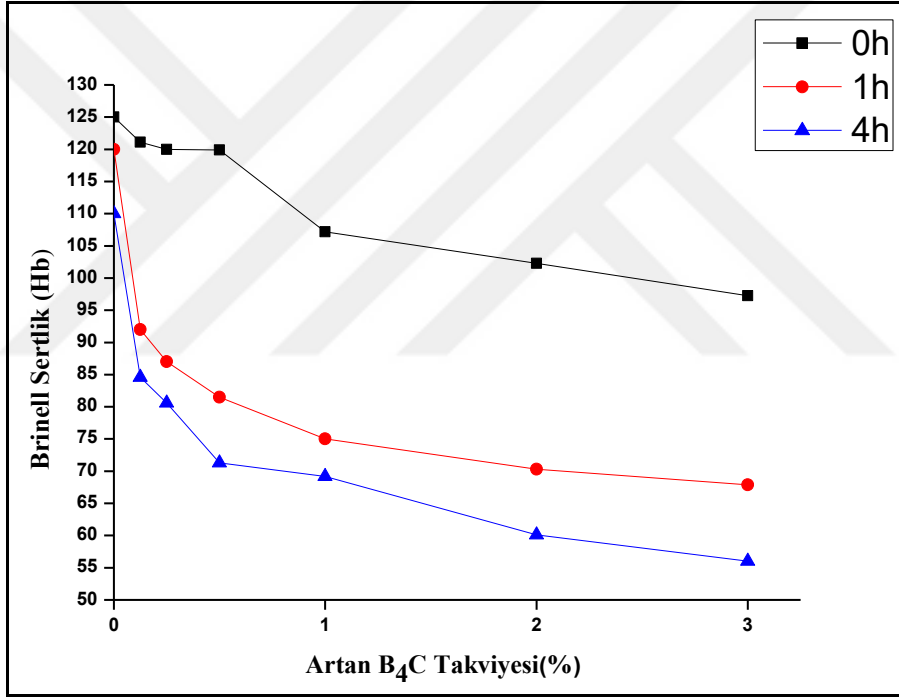
Şekil 3.23. ZA27/Grafen nanokompozitlerde artan Grafen takviyesine göre sertlik değeri

3.3.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları

ZA27/B₄C nanokompozit numunelerin sertlik değerlerini incelediğimizde 0 saatlik MA süresince düşük takviye miktarlarında sertlikler değişmezken artan takviye oranlarında azalmıştır. Yüksek oranlardaki takviye miktarı artışları, gözenek miktarındaki artışlara sebep olmuş bunun sonucu olarak ZA27 alaşımlı matris malzemesi tozları daha fazla plastik deformasyona uğrayarak numunelerdeki sertlik azalmıştır. En düşük sertlik değeri 56 Hb ile 4 saatlik MA işlemine tabi tutulmuş ZAB-3-4h nanokompozitinde görülmüştür. MA işlemi 4 saate çıkarıldığı zaman SEM görüntüleri incelendiğinde matris malzemesinin tane boyutu küçülmüş olduğu için gözenek miktarındaki artış sertlik değerlerinin düşmesine sebebiyet verdiği görülmüştür. Sonuçlara göre nanokompozit malzemelerin sertlik değerlerini etkileyen faktörlerin başında takviye malzemelerin matris içerisinde dağılımı gelirken, porozite ve metaller arası bileşiklerin miktarı da önemli roller oynadığı tespit edilmiştir.

Tablo 3.5. ZA27/B₄C nanokompozitlerin sertlik değerleri

Brinell Sertlik (Hb)			
Numune	0h	1h	4h
ZA27	125	120	110
ZAB-0,125	121,1	92	84,6
ZAB-0,25	120	87	80,6
ZAB-0,5	119,9	81,5	71,3
ZAB-1	107,2	75	69,2
ZAB-2	102,3	70,3	60,1
ZAB-3	97,24	67,9	56

Şekil 3.24. ZA27/B₄C nanokompozitlerde artan B₄C takviyesine göre sertlik değeri

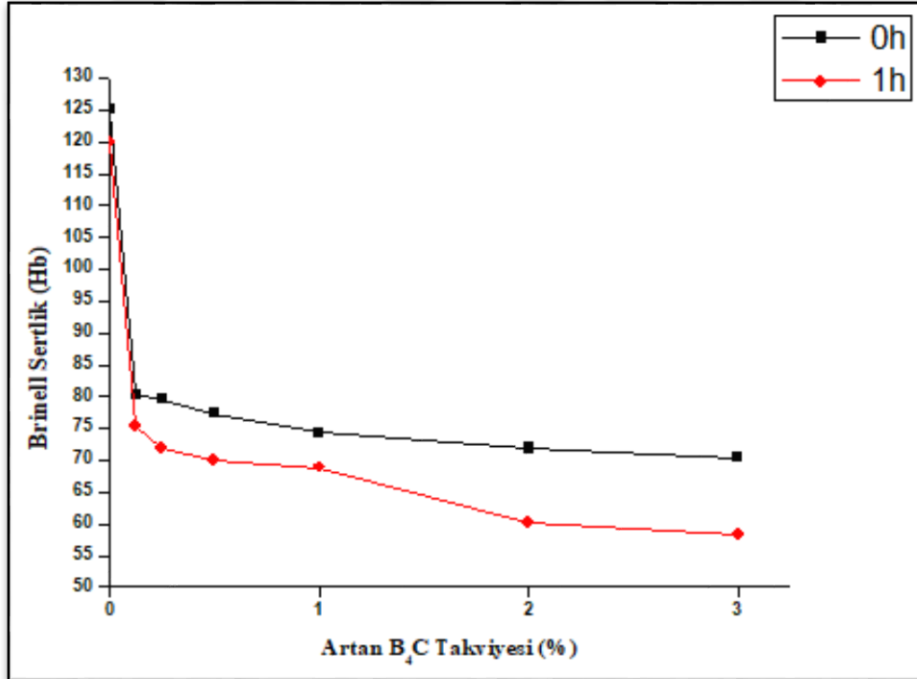
3.3.3. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerde Sertlik Sonuçları

ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozit numunelerin sertlik değerlerine baktığımız zaman %3 ile sabit tutulan grafen miktarıyla birlikte artan B₄C takviyesi oranı ile sertliklerin düştüğü görülmüştür. Saf ZA27 alaşımının sertlik değeri 125 Hb iken %3 Grafen ile %0,125 B₄C takviyesi ve 0 saatlik MA ile 80,03 Hb'ye kadar düşmüştür. Sabit tutulan %3 Grafen oranı ve artan B₄C takviye miktarları ile tane sınırlarının büyüdüğü,

gözenek miktarının artırdığı için sinterlemeyi zorlaştırıp hibrit numunelerin sertliğini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca ZAGB-3 hibrit nanokompoziti yüksek oranda Grafen ve B₄C takviyesi içerdiği için ZA27 matris tozları daha fazla plastik deformasyona uğrayıp matris ile takviye arasında daha fazla gerilmeler meydana getirmiştir.

Tablo 3.6. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin sertlik değerleri

Brinell Sertlik (Hb)		
Numune	0h	1h
ZA27	125	120
ZAGB-0,125	80,3	75,3
ZAGB-0,25	79,5	71,9
ZAGB-0,5	77,3	70,1
ZAGB-1	74,3	68,9
ZAGB-2	71,9	60,3
ZAGB-3	70,4	58,2

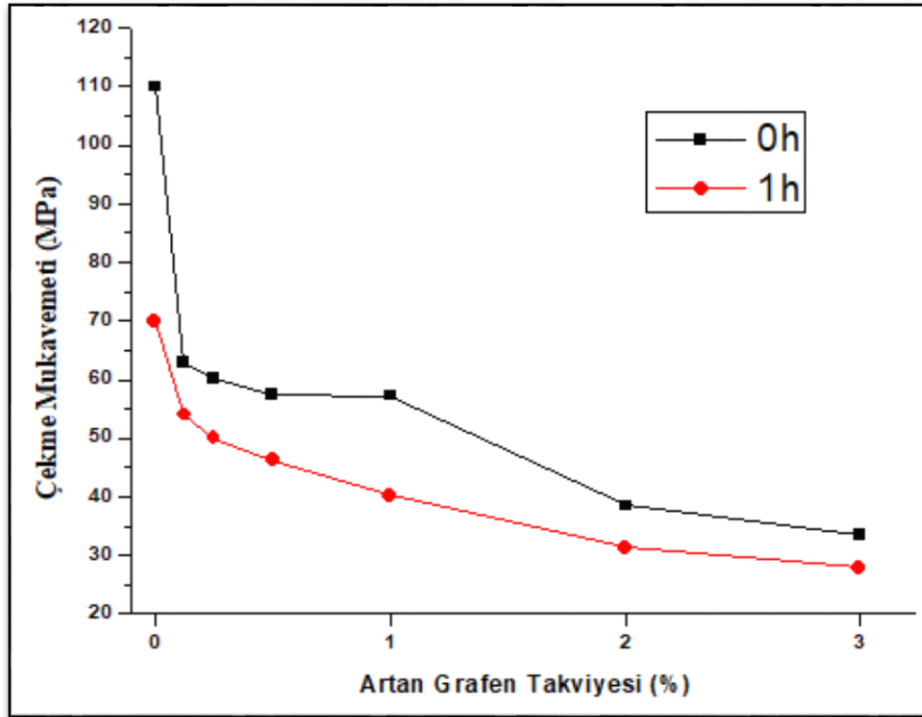


Şekil 3.25. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerde artan B₄C takviyesine göre sertlik değeri

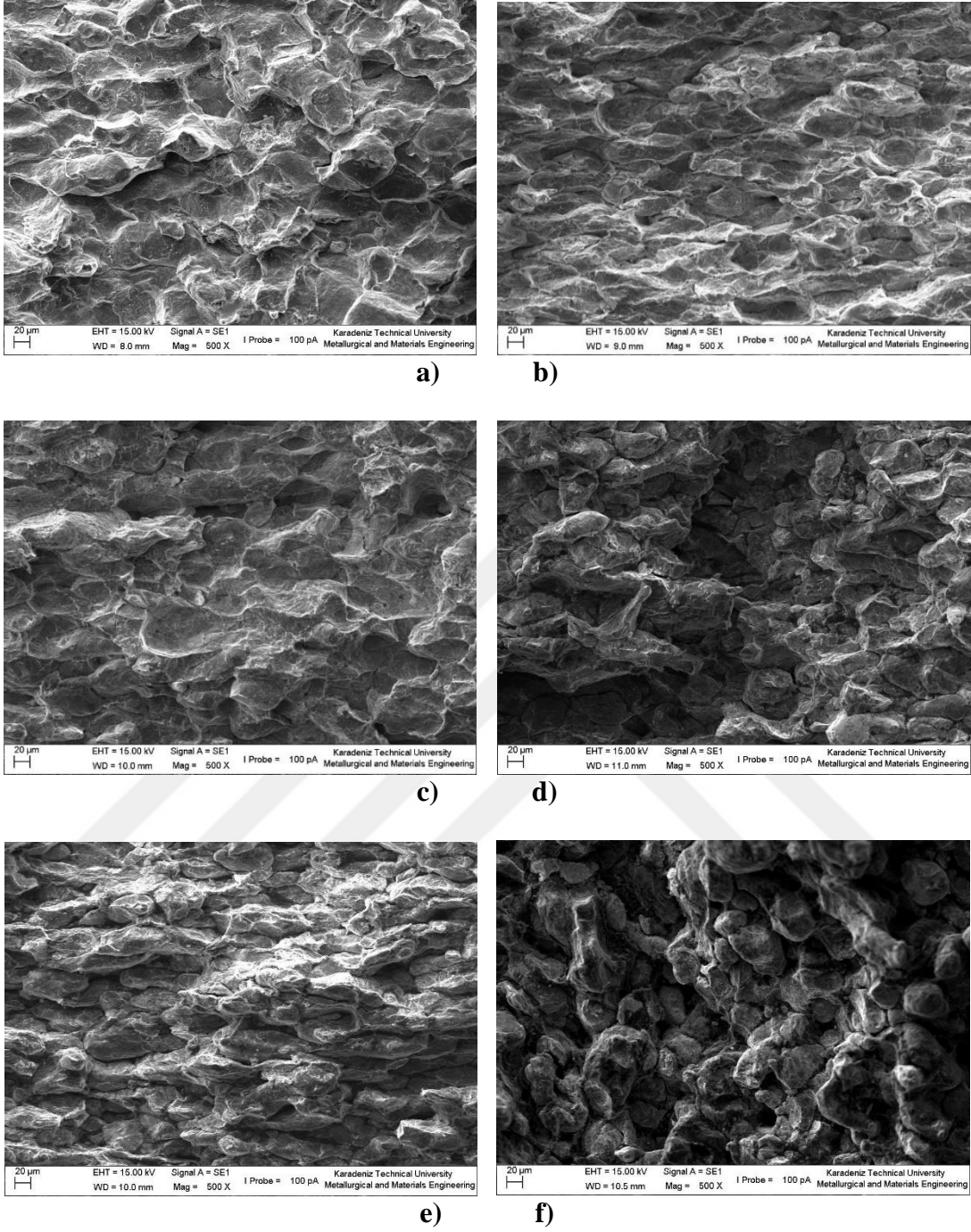
3.4. Çekme Mukavemeti Sonuçları

3.4.1. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Çekme Mukavemeti Sonuçları

ZA27/Grafen nanokompozitlerin kırılma yüzeyi Şekil 3.27'de görülmektedir. Grafen içeriği 0,125'ten 3'e (% ağırlıkça) yükseldikçe, kırılma yüzeyi çok sayıda gözenek sergiler. Gözenek içeriğindeki artış, gerilme mukavemetini azaltır. Daha yüksek grafen içeriklerinde, gerilme mukavemeti azalır. Grafen içeriği% 0'dan% 0,125'e çıksa da, gerilme mukavemeti 110'dan 63 MPa' a kadar büyük ölçüde azalmaktadır. ZA27 matrisi ve Grafen takviyesi arasındaki zayıf bağ, nanokompozit numunenin gerilme mukavemetinde azalmaya neden olabilmektedir. Zayıf arayüzey yapıştırma, MMK'lerin özelliklerini kötüleştirir ve bunları herhangi bir uygulamada işe yaramaz hale getirir. Grafen içeriği% 0,125'ten% 2'ye çıkmasına rağmen, gerilme mukavemetinde 63'ten 38,5 MPa'ya kadar bir azalma söz konusu olmuştur. En düşük çekme mukavemeti 28 MPa ile ZAG-3-1h nanokompozitden elde edilmiştir. Mekanik alaşımlama süresinin 0h' dan 1h çıkması grafen takviyeli nanokompozitlerin çekme mukavemetini önemli ölçüde azaltmıştır.



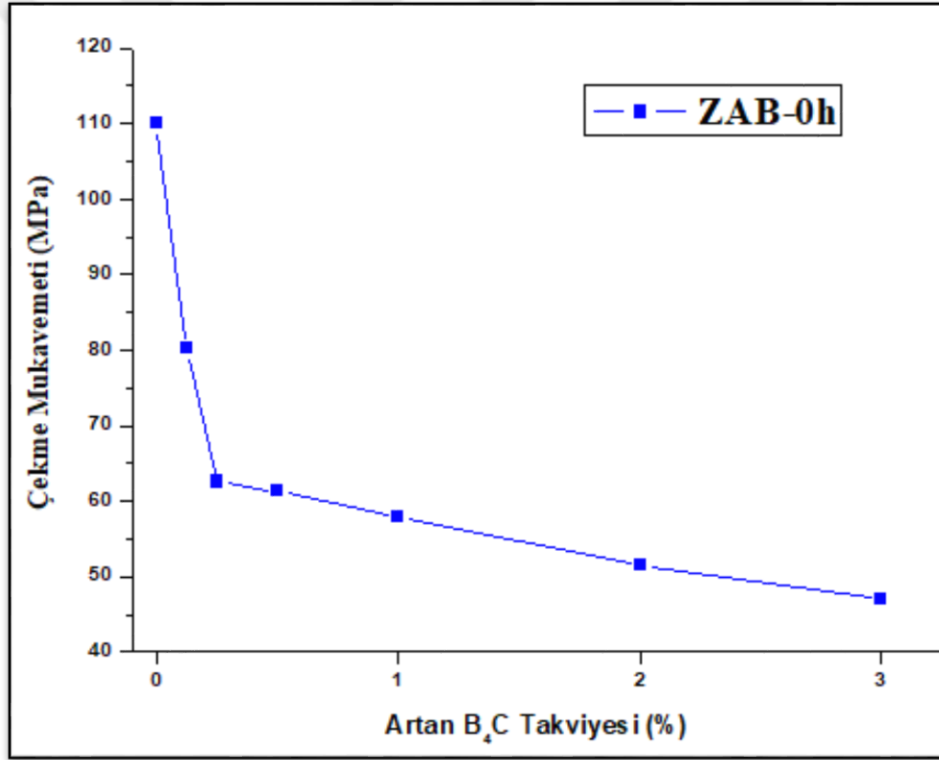
Şekil 3.26. ZA27/Grafen nanokompozitlerde artan Grafen takviyesine göre çekme mukavemeti



Şekil 3.27. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri (a) ZA27, (b) ZAG-0,125-0h , (c) ZAG-0,5-0h. , (d) ZAG-1-0h, (e) ZAG-2-0h, (f) ZAG-3-0h

3.4.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin Çekme Mukavemeti Sonuçları

ZA27 alaşımı, sıradan dökme alüminyum alaşımlarından önemli ölçüde daha yüksek aşınma direnci ve gerilme mukavemeti göstermiştir. Şekil 3.28 incelendiğinde daha yüksek B₄C içeriklerinde, gözenek miktarına bağlı olarak gerilme mukavemeti azalmaktadır. B₄C takviyesi 0'dan% 0,125'e çıkması ile gerilme mukavemeti 110'dan 80,3 MPa'a kadar düşmüştür. Bunun nedeni olarak takviye miktarının oranı ile topaklanma bölgelerinin artması ile matris ve takviye arasındaki bağların zayıflaması şeklinde yorumlanabilir. En yüksek çekme mukavemeti 80,3 MPa değeri ile ZAB-0,125-0h numunesinden elde edilmiştir.

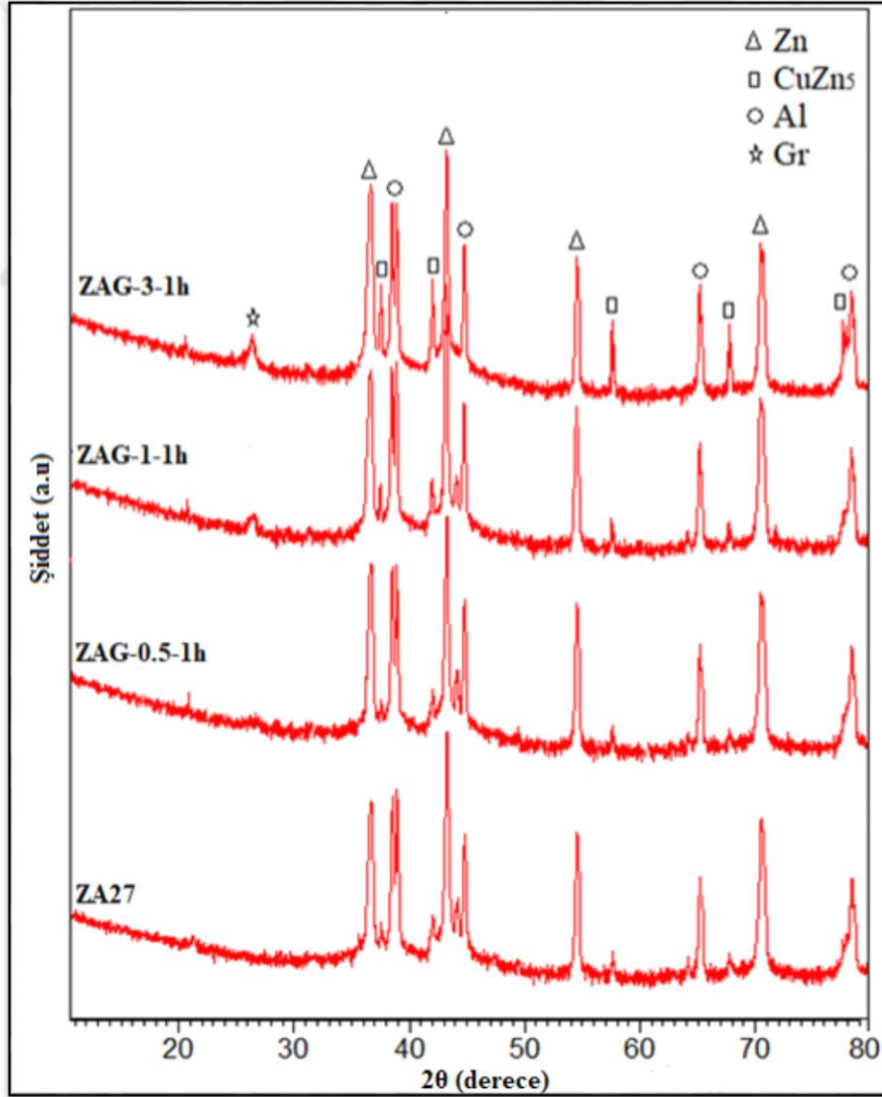


Şekil 3.28. ZA27/B₄C nanokompozitlerde artan B₄C takviyesine göre çekme mukavemeti

3.5. XRD Analizi

3.5.1 ZA27/Grafen Nanokompozitlerin XRD Analizi

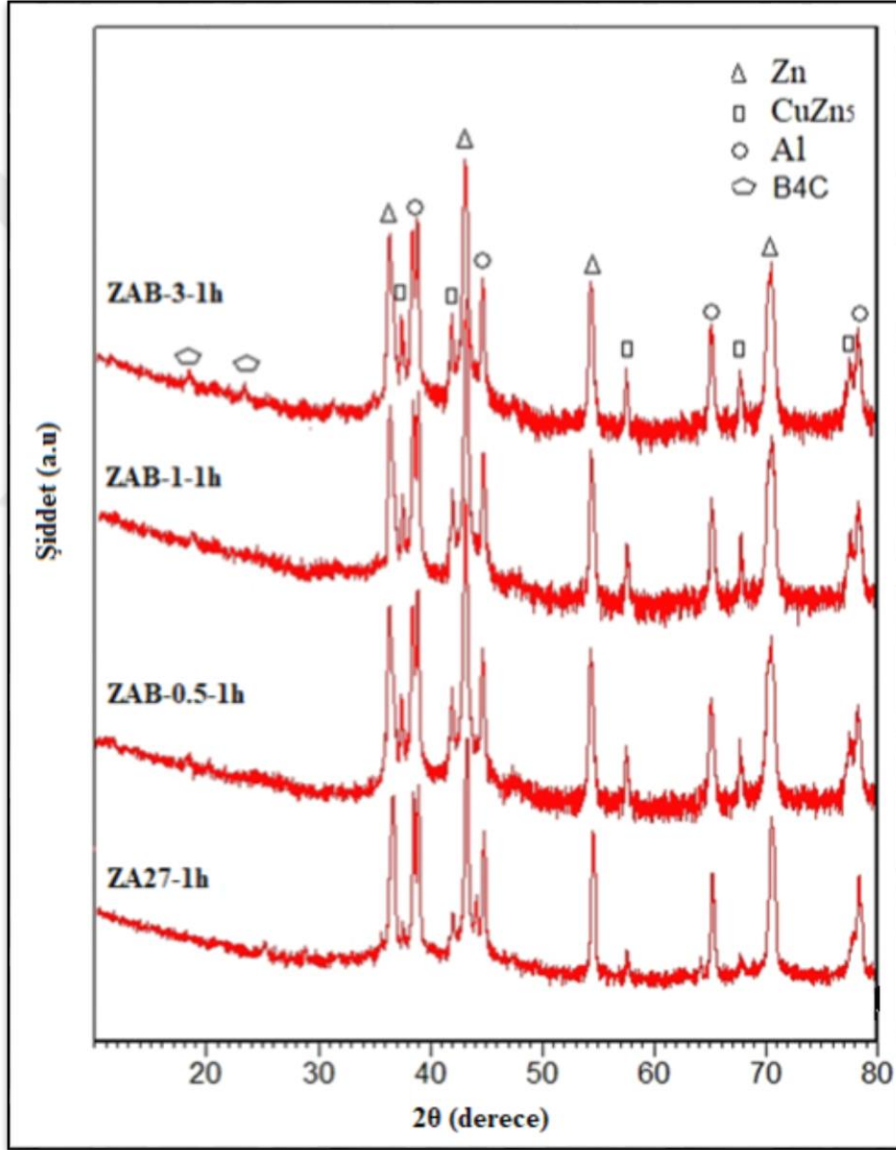
Farklı grafen partikül içeriğine sahip olan 1 saat mekanik öğütme yapılmış ZA27 alaşımı ve ZAG kompozitlerinin XRD difraksiyon pikleri Şekil 3.29' da gösterilmiştir. Al, Zn ve CuZn5 tepe noktalarının yanı sıra XRD paterninde de görülebilir. ZA27 alaşımına kıyasla, ZA27/Grafen nanokompozitler için grafen fazı gibi yeni üretilen fazlar görülürken, grafen fazındaki kırınım zirveleri %0,5 Grafen takviyeli ZAG-0,5-1h nanokompozit için çok zayıf olur. Grafen kırınım pik yoğunluğundaki artış, ZAG-3-1h nanokompozit için belirgin olarak gözlenmiştir. (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri

3.5.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin XRD Analizi

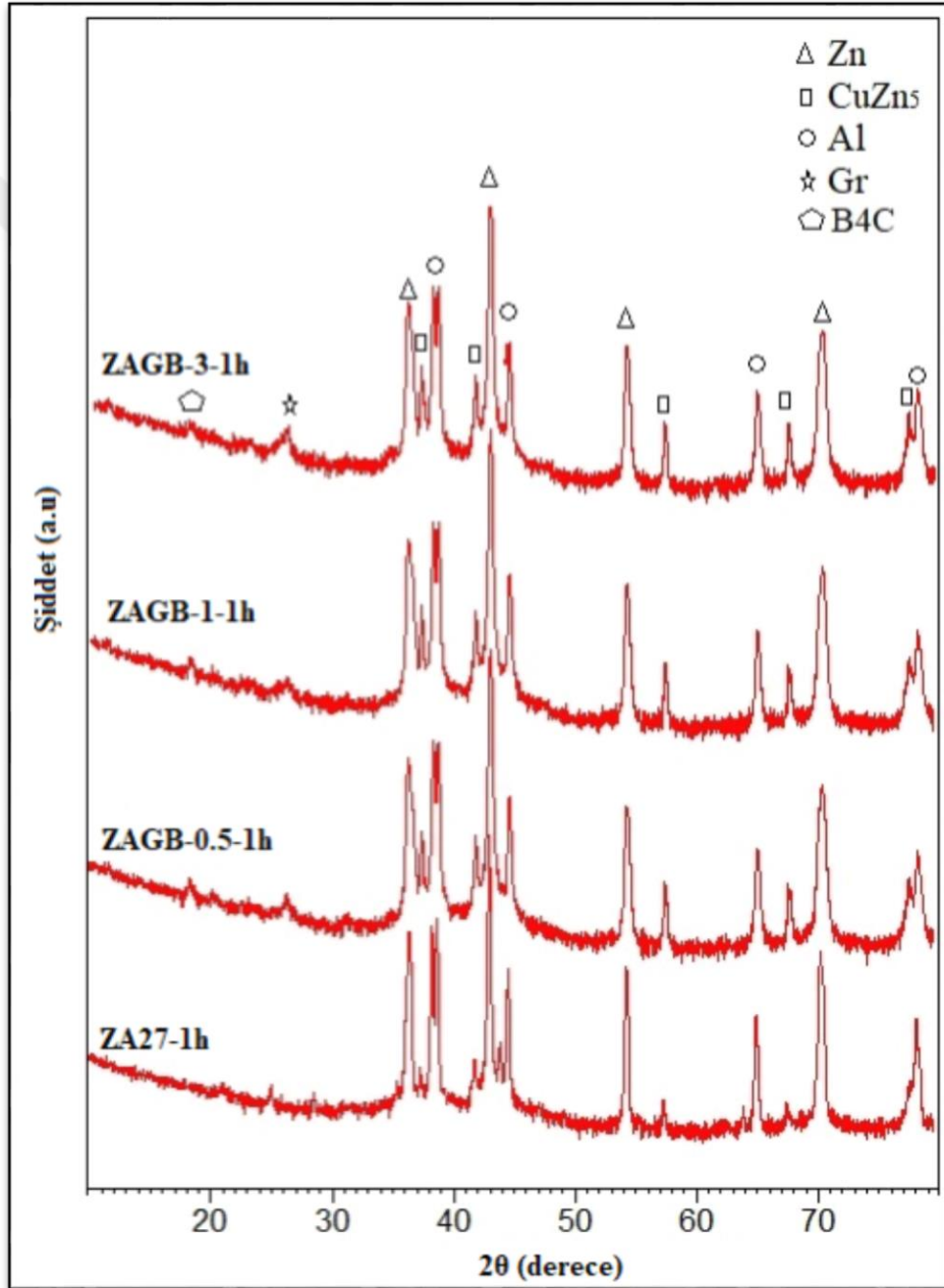
B₄C takviyeli 1 saat mekanik öğütme yapılmış ZA27/B₄C nanokompozitlerinin XRD difraksiyon pikleri Şekil 3.30' da gösterilmiştir. Al, Zn ve CuZn5 tepe noktalarının yanı sıra XRD paterninde de görülebilmektedir. ZA27 alaşımına kıyasla, ZA27/B₄C nanokompozitler için B₄C fazı gibi yeni üretilen fazlar görülürken, B₄C fazındaki kırınım zirveleri ZAB-3-1h nanokompozit için belirgin olarak gözlenmiştir. (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri

3.5.3. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerin XRD Analizi

Grafen ve B₄C takviyeli ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin XRD analizleri incelendiğinde ham ZA27 numunesine göre Grafen ve B₄C fazlarına ait XRD spektrumları açıkça görülmektedir. Bununla birlikte Zn, CuZn₅, Al fazlarına ait spektrumlarında hibrit nanokompozitlerin XRD analizlerinde görülmüştür. (Şekil 3.31)



Şekil 3.31. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin XRD analiz eğrileri

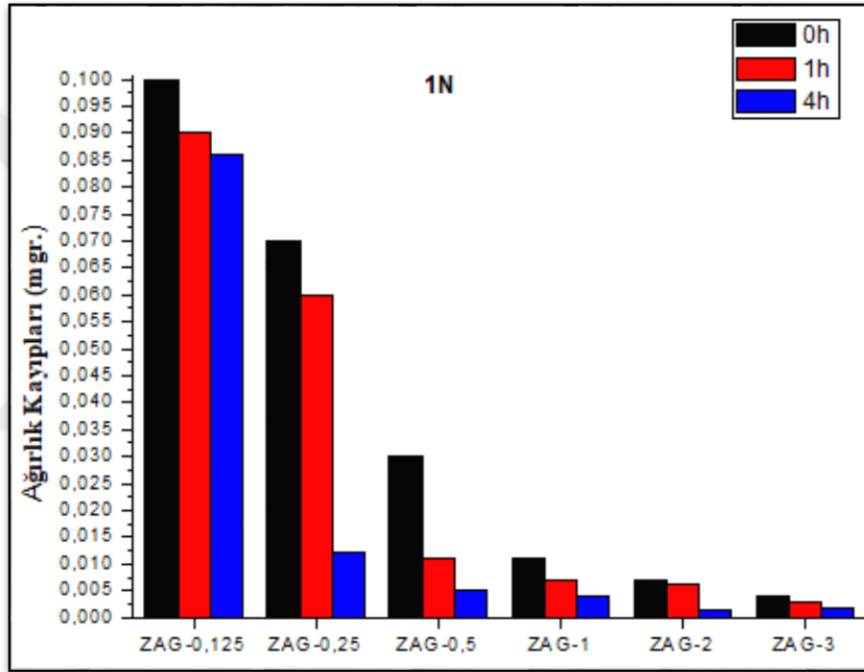
3.6. Aşınma Davranışları

3.6.1. ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları

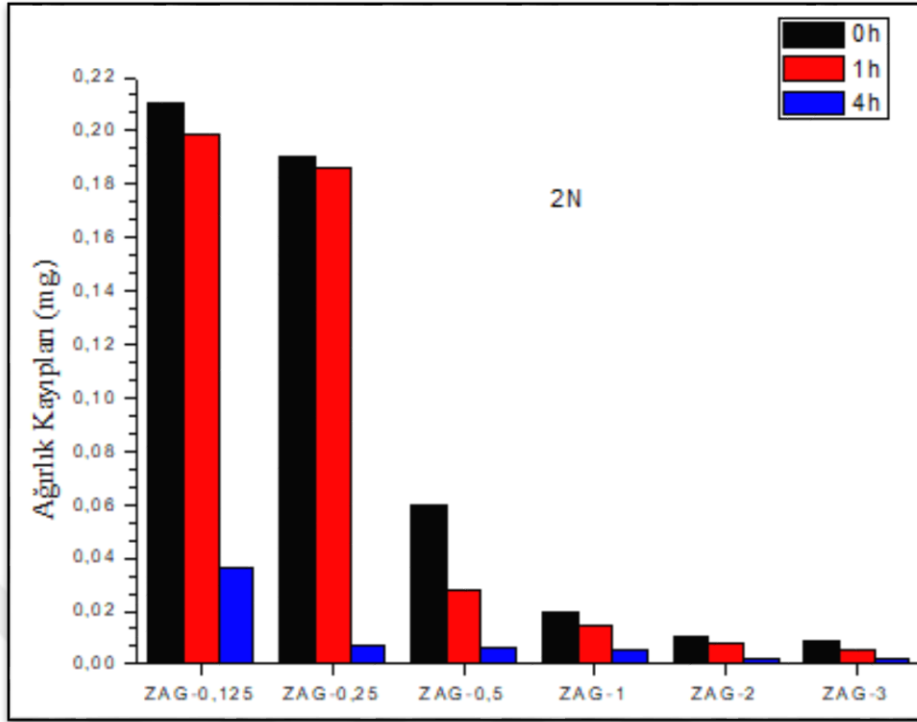
ZA27/Grafen nanokompozitlerin aşınma değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı gibi artan yük miktarı ile numunelerde ağırlık kaybının artışı ve en yüksek aşınma direncinin %3 Gr içeren nanokompozitde görüldüğü belirlenmiştir. Uygulanan yükler 1,2,5 ve 10 N'luk yükler uygulandığında en yüksek ağırlık kaybı matris malzemesinde görülmüş olup artan grafen oranı bütün yüklerde aşınma direnci göstermiştir. Ağırlıkça artan grafen oranı MA süresinin 4 saate çıkması ile iyice belirgin bir aşınma direnci göstererek yağlayıcılık özelliği göstermiştir. Matris malzemesi ZA27 en yüksek ağırlık kaybını 0h ile 10N yük altında 976,6 mg. olarak gösterirken, %3 grafen katkılı ZAG-3-0h ile 10N yük altında sadece 0,02 mg. değerinde bir ağırlık kaybı gerçekleşmiştir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde ZA27/Grafen nanokompozitlerde adhesiv ve delaminasyon aşınması olduğu SEM resimlerinde görülmüştür.

Kayma gerilmeleri, metal matris kompozitler için aşınma testi sırasında temas bölgesinin altındaki malzemeye aktarılır. Yüzey alanındaki yüksek deformasyon ve aşınma nedeniyle aşınma parçacıkları oluşur. İki kayan yüzey arasında mekanik olarak bir tabaka elde edilir. ZA27/Grafen nanokompozitlerinin aşınma testi sırasında iç yüzeyinde ince takviye parçacıkları bulunan yüzeyde plastik sertleşme matris fazı oluşur. Kırılgan bölge, delaminasyon işlemi sırasında matristen kopar. Matris içindeki takviye parçacıklarının varlığı, homojen dağılımı ile mikro alanlardaki mekanik gücünü artırır. Metal matris kompozitleri için, en önemli faktörlerden biri takviye içeriğidir çünkü mikroyapı takviye içeriği arttıkça (ağırlıkça %) metalden seramik matrise dönüşmektedir. [77] ZA27 / grafit kompozitleri için benzer gözlem bildirmişlerdir. Makroskopik grafit parçacıklarının ZA27 alaşım kompozitlerinin mekanik, aşınma ve termal davranışına etkisini araştırdılar. Tribolojik özelliklerin grafit parçacığının eklenmesiyle geliştiğini belirttiler. Çalışmalarına göre, ZA27 çinko alaşımına matrisine grafit parçacıklarının ilavesi, kompozitin aşınma direncini arttırmaktadır. Yüksek takviye içeriğine kıyasla takviye faydası% 4-6 oranında daha fazla bulunur. Seah ve ark. ağırlıkça% 1 ila 5 arasında değişen grafit partikül içeriğine sahip dökme ZA27 / grafit kompozitler üretti. % 2'lik basamaklarda%. Bileşik rulmanların yarı kuru ve kuru testler için daha düşük sürtünme sergilediklerini, bunun da grafit içeriğindeki artışla birlikte azaldığını, ancak yüklerle arttığını belirttiler [90].

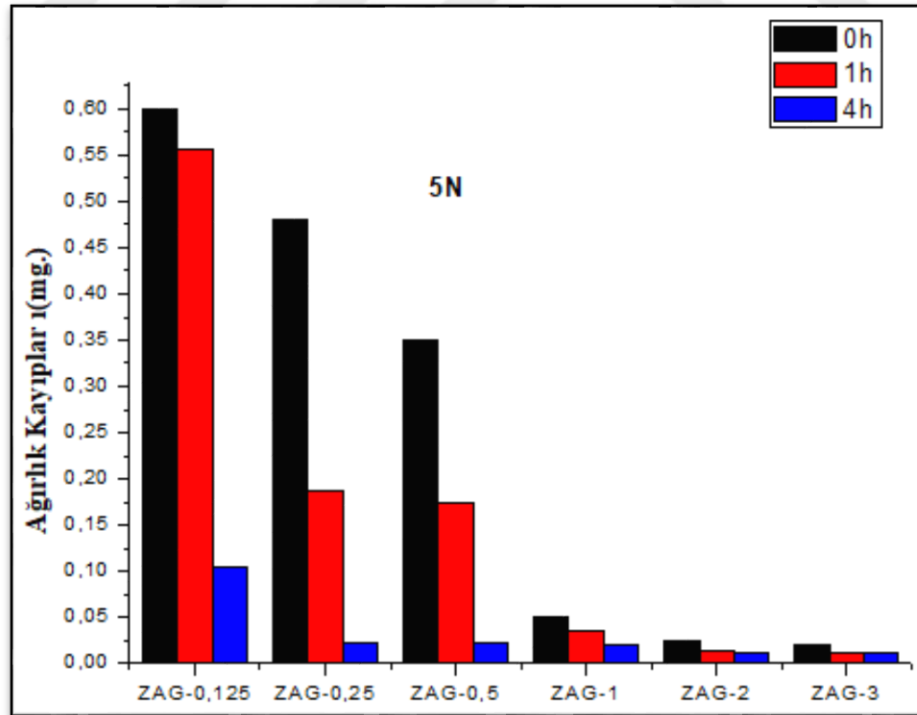
Şekil 3.36'da ZA27/Grafen nanokompozitlerin aşınmış yüzeylerinden elde edilen SEM görüntülerini ve EDS analizleri gösterilmektedir. Nanokompozitlerin EDS analizlerinde görülebileceği gibi, Fe elementi sarı renkte gösterilmiştir, ancak Zn elementi kırmızı renkte verilmiştir. Grafen parçacıklarının ZA27 matris alایشımına dağılımı aşınma mekanizmasını belirler. ZA27/Grafen nanokompozitlerinden elde edilen EDS dönüşümleri, ZAG-3-1h numunesinin yıpranmış yüzeyinin diğer nanokompozit numunelerden daha az zarar gördüğünü göstermiştir (Şekil 3.36). Bu, diğer kompozit numunelere kıyasla ZAG-3-1h numunesi için grafen partiküllerinin homojen dağılımına atfedilebilir.



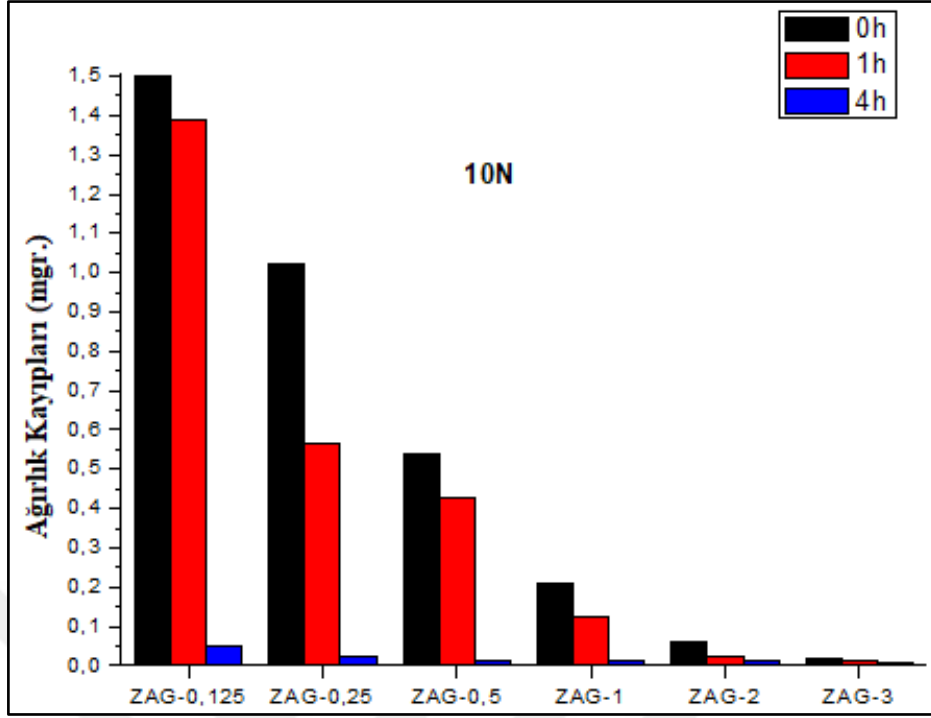
Şekil 3.32. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 1N yük altında ağırlık kayıpları



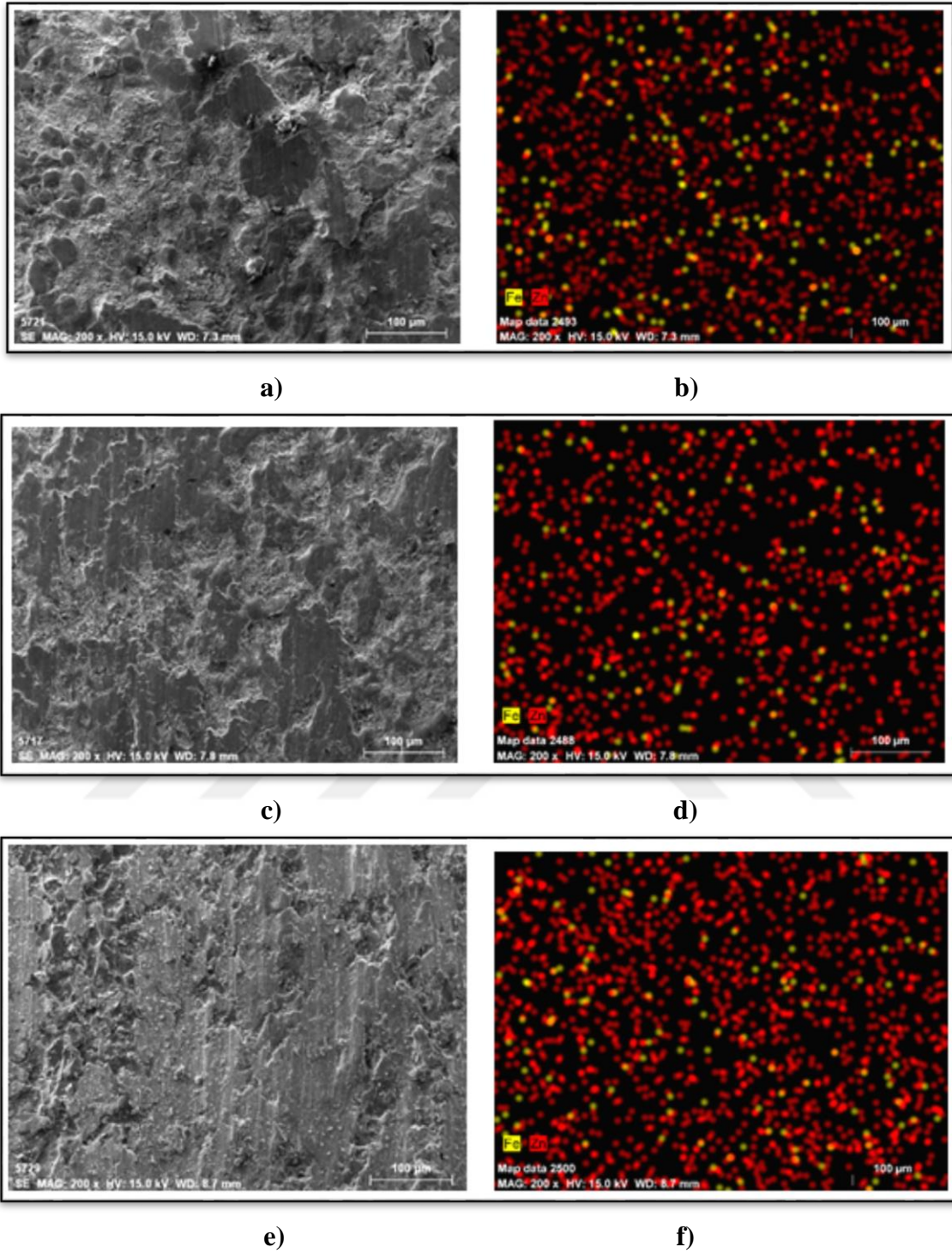
Şekil 3.33. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 2N yük altında ağırlık kayıpları



Şekil 3.34. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 5N yük altında ağırlık kayıpları



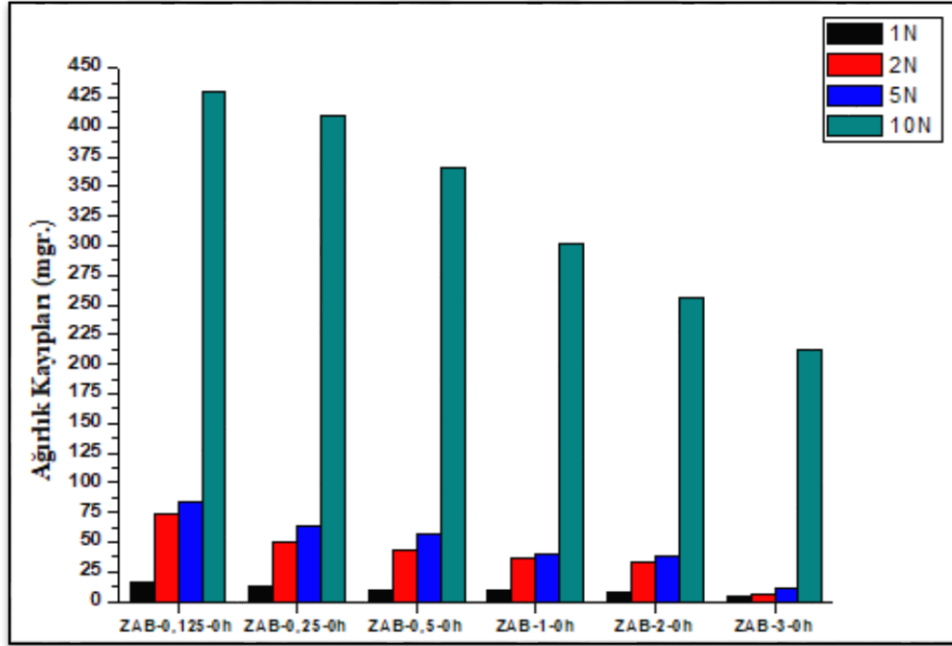
Şekil 3.35. ZA27/Grafen nanokompozitlerin 10N yük altında ağırlık kayıpları



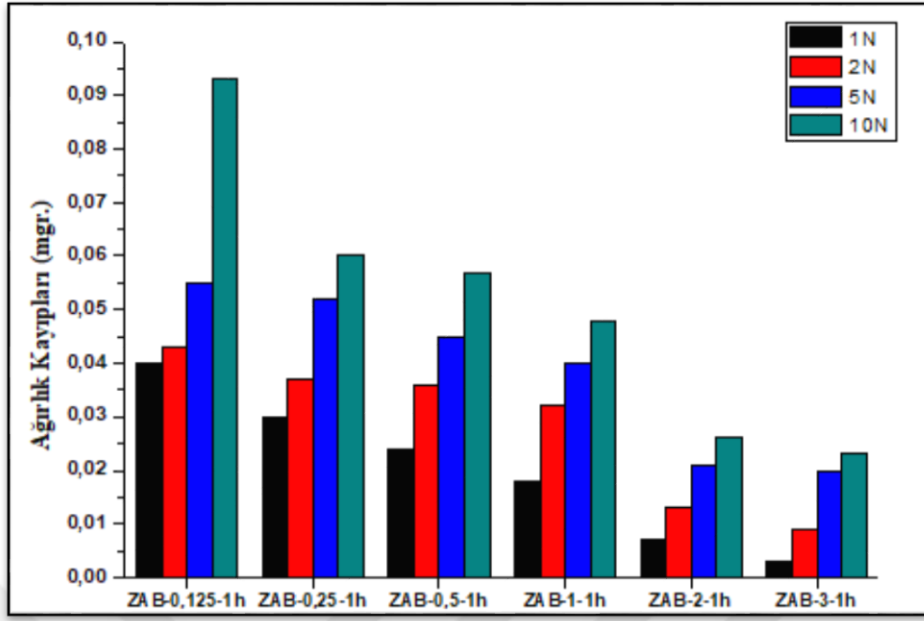
Şekil 3.36. 1 saatlik MA yapılmış ZA27/Grafen nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki SEM ve EDS analizleri: (a-b) ZAG-0,5-1h; (c-d) ZAG-1-1h; (e-f) ZAG-2-1h; (e-f) ZAG-3-1h

3.6.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları

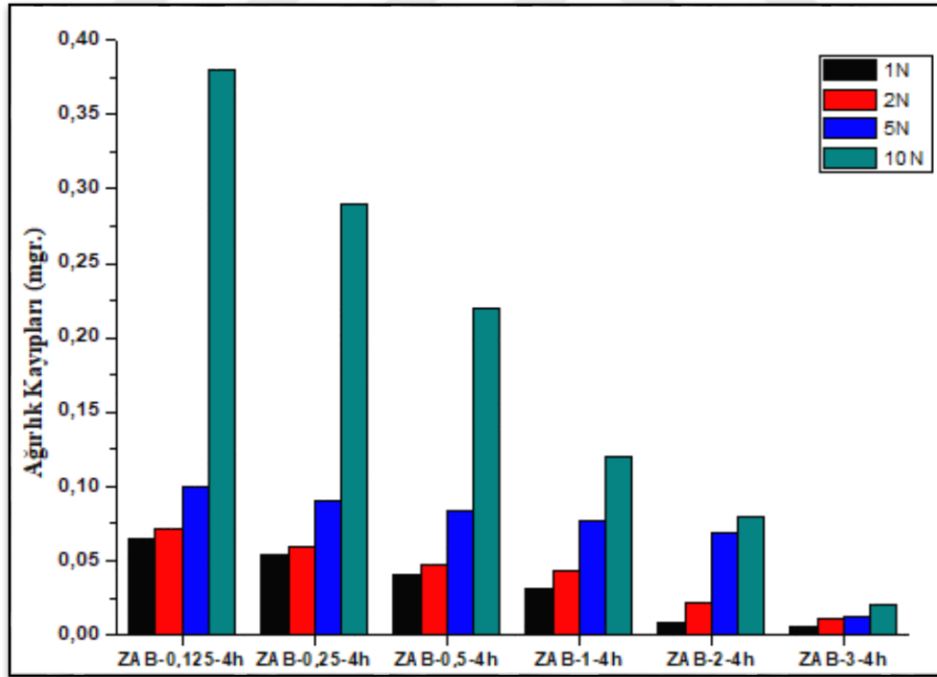
ZA27/B₄C nanokompozitlerin aşınma davranışlarını incelediğimizde elde edilen SEM görüntüleri ZA27/Grafen nanokompozitlerinde olduğu gibi ZA27/B₄C nanokompozitlerinde aşınma mekanizmasının adhesiv ve delemantasyon aşınması olduğunu göstermiştir. Aşağıdaki grafiklerden görüldüğü gibi artan yük miktarı ağırlık kayıplarını artırmıştır. Uygulan yükün artmasıyla aşındırıcı bilye ile numunelerin temas yüzeyleri arasında meydana gelen basınç kuvveti numunelerde sürtünmeyle birlikte kazınma ve kopmaya neden olmuş ve buna bağlı olarak en yüksek aşınma miktarları en yüksek yük olan 10 N altında gerçekleşmiştir. Mekanik alışım süresi 0h'dan 1h'a çıktığında aşınma miktarlarında belirgin azalmalar görülmüş fakat MA süresi 4h'a çıktığında aşınma miktarları bütün yüklerde artış göstermiştir. Bu durum MA süresinin gözenek miktarını artırmasıyla açıklanabilir. Sonuç olarak ZAB-3 numunesinin en yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve bütün yüklerdeki aşınma dirençlerinin iyi olduğu saptanmıştır.



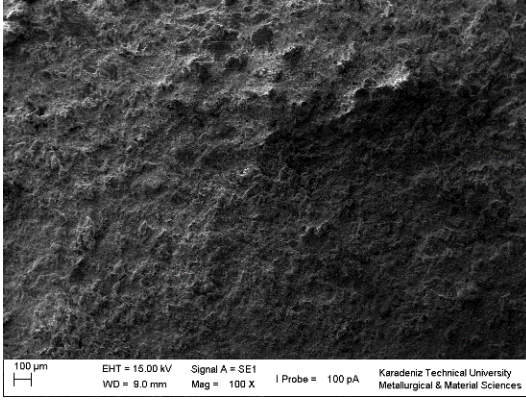
Şekil 3.37. 0 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları



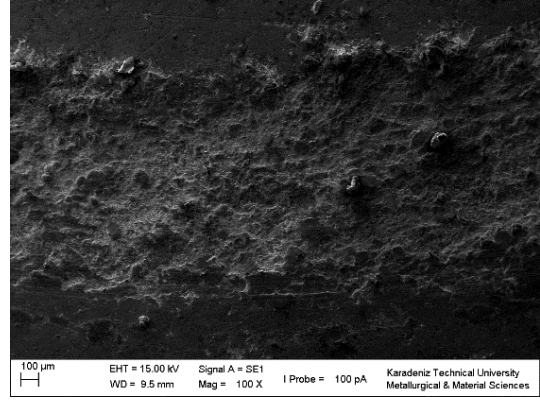
Şekil 3.38. 1 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları



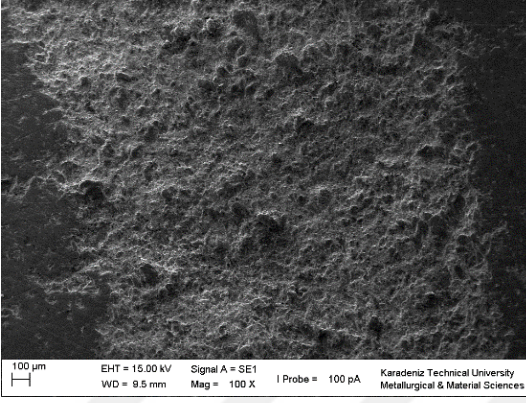
Şekil 3.39. 4 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları



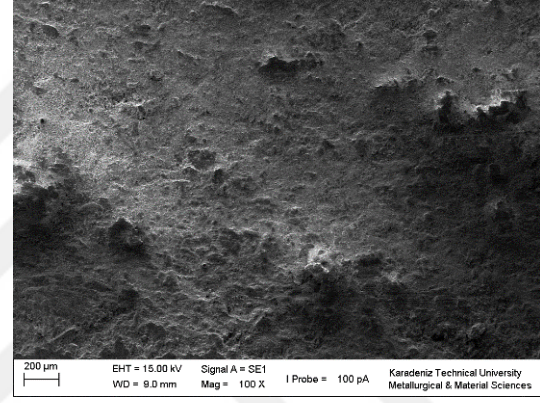
a)



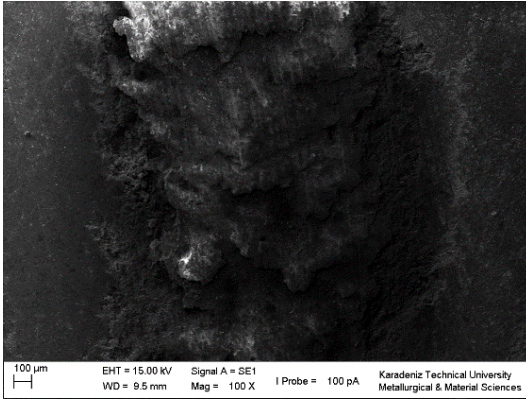
b)



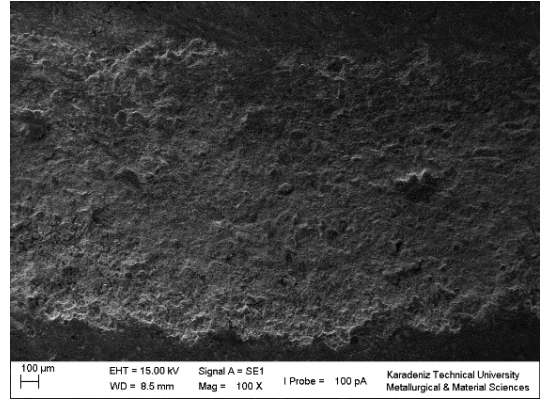
c)



d)

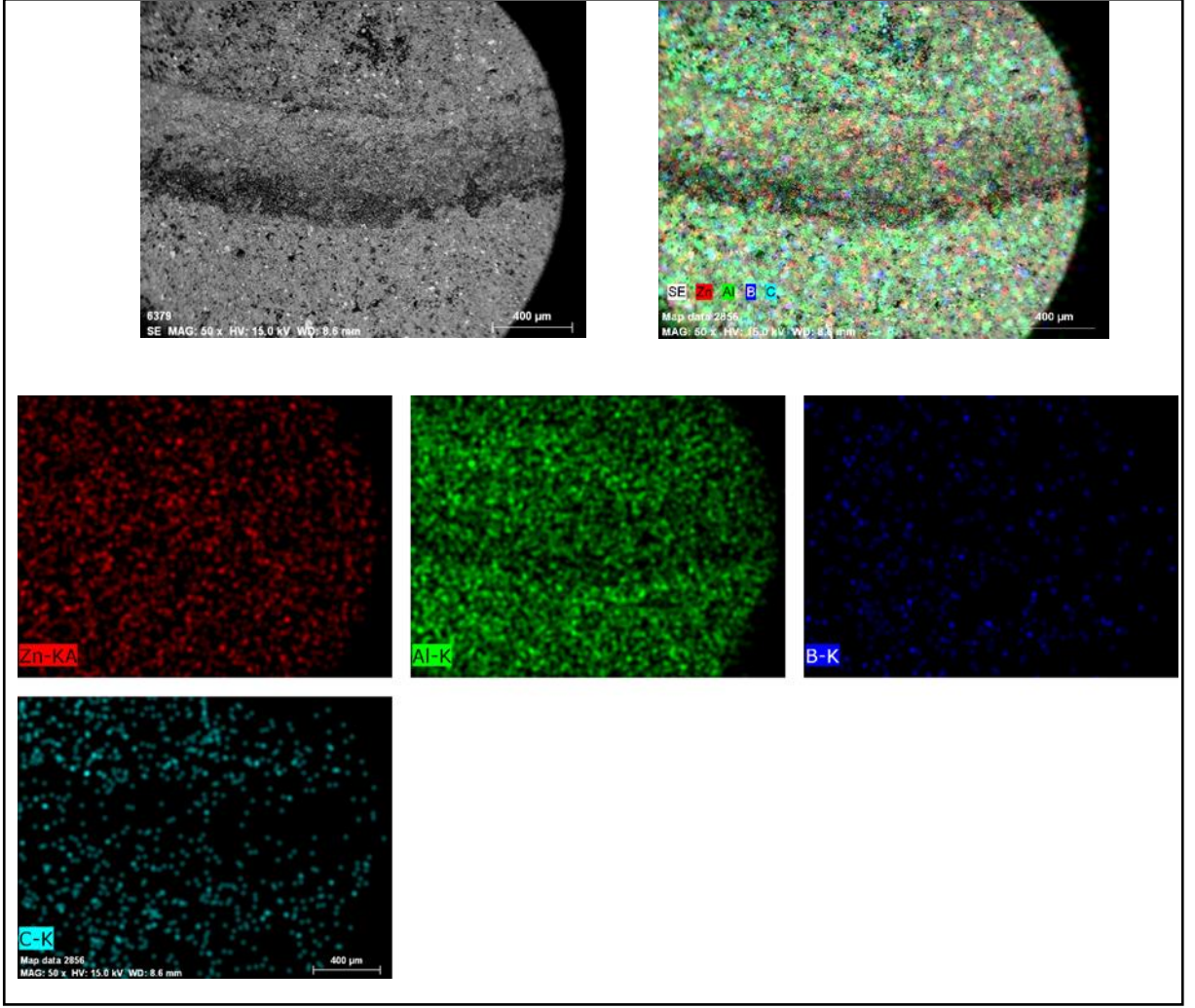


e)



f)

Şekil 3.40 1 saatlik MA yapılmış ZA27/B₄C nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki SEM görüntüleri: (a) ZAB-0,125-1h; (b) ZAB-0,25-1h; (c) ZAB-0,5-1h; (d) ZAB-1-1h; (e) ZAB-2-1h; (f) ZAB-3-1h

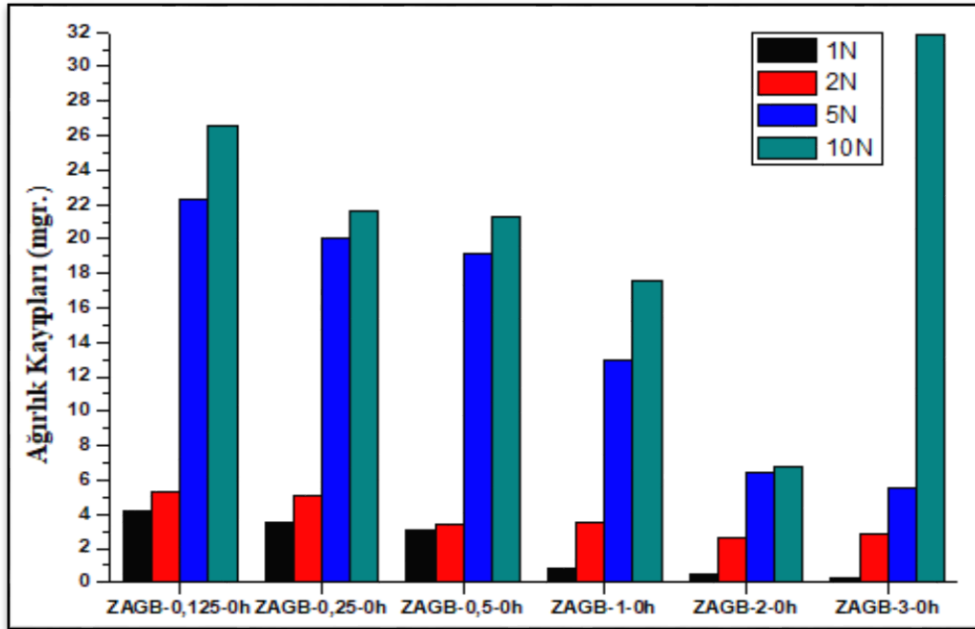


Şekil 3.41. 1 saatlik MA yapılmış ZAB-3-1h nanokompozitin 10 N yük altındaki SEM ve EDS analizi

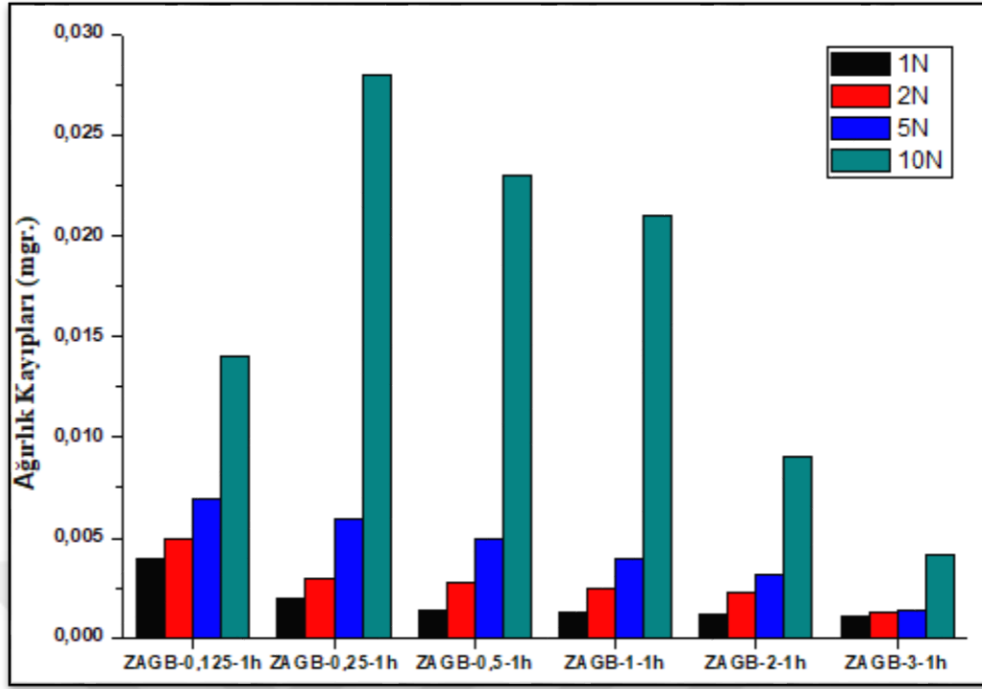
Şekil 3.41’de ZAB-3-1h nanokompozitin aşınmış yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ve EDS analizi analizi gösterilmiştir. En yüksek aşınma direncine sahip ZAB-3-1h numunesinin 10N yük altındaki EDS analizinde göreceği gibi Zn elementi kırmızı renkte, Al elementi yeşil olarak belirtilip B₄C takviyesinin ZA27 matris alaşımı içerisine dağılımı aşınma mekanizmasını belirlemiştir.

3.6.3. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerin Aşınma Davranışları

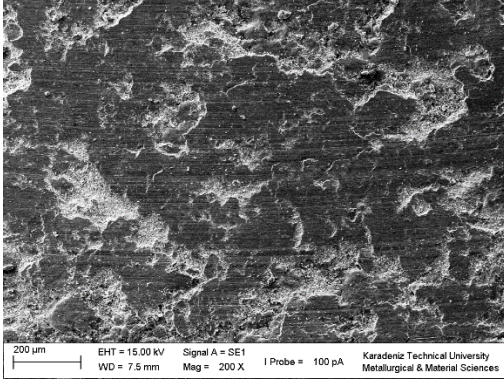
ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin aşınma değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Yapıya eklenen nano boyutlu grafen parçacıklarının yapıda başta sertlik olmak üzere mekanik özellikleri düşürmesinden dolayı B₄C katkı oranının belli aralıklarla artırılarak hem mekanik özellikleri iyileştirme hem de grafenin yapıya kazandırdığı kendi kendine yağlayıcılık özelliğini kullanarak %3 Grafen takviyesi sabit tutularak B₄C oranı artırılmıştır. Şekillerden anlaşılacağı gibi artan yük miktarı ile numunelerde ağırlık kaybının arttığı ve en yüksek aşınma direncinin 1 saatlik MA ile üretilen %3 Gr ve %2 B₄C içeren(ZAGB-2-1h) hibrit nanokompozit numunede görüldüğü belirlenmiştir. Sabit tutulan %3 grafen oranı ağırlıkça artan B₄C oranı MA süresinin 1 saate çıkması ile iyice belirgin bir aşınma direnci göstererek hem grafenin yağlayıcılık hemde B₄C takviyesinin sert parçacık özelliği ağırlık kayıplarında belirgin bir azalış göstermiştir. Matris malzemesi ZA27 en yüksek ağırlık kaybını 0h ile 10N yük altında 976,6 mg. olarak gösterirken, %3 grafen ve %3 B₄C katkılı ZAGB-3-1h ile 10N yük altında sadece 0,0042 mgr. değerinde bir ağırlık kaybı gerçekleşmiştir.



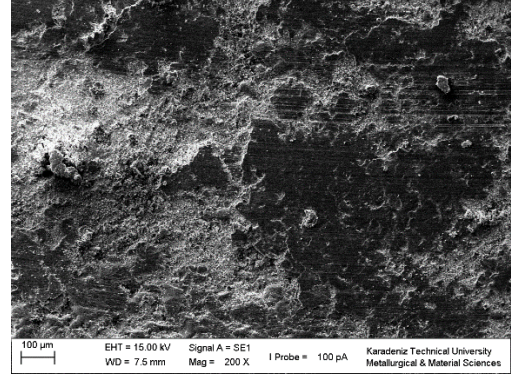
Şekil 3.42. 0 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin 1.2.5 ve 10N yük altında ağırlık kayıpları



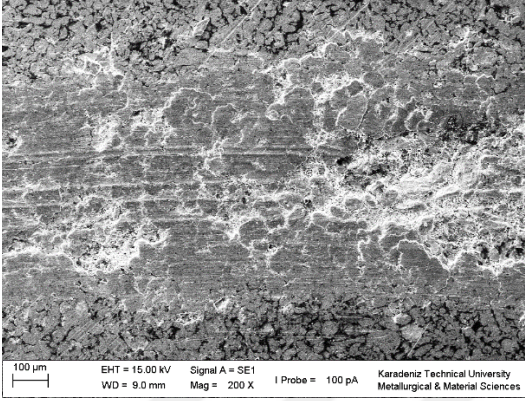
Şekil 3.43. 1 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin 1.2.5 ve10N yük altında ağırlık kayıpları



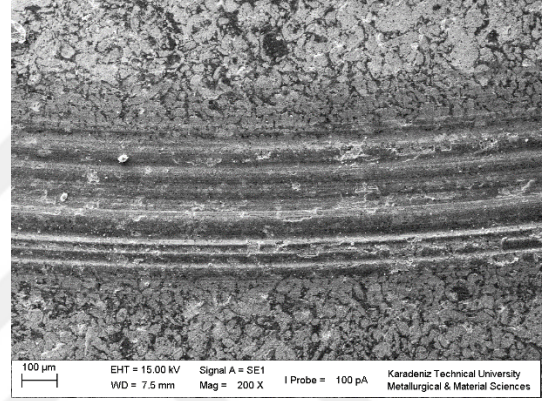
a)



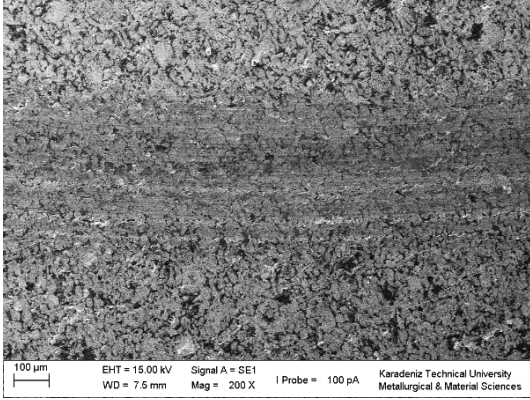
b)



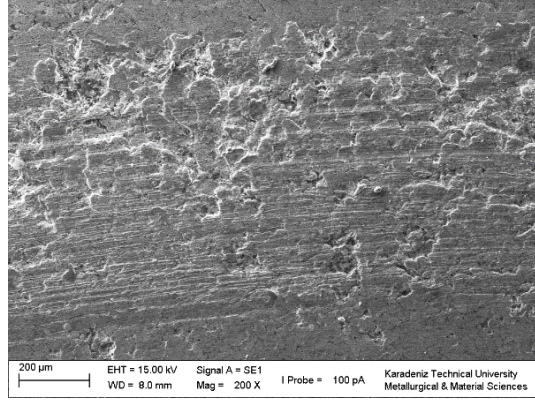
c)



d)



e)



f)

Şekil 3.44. 1 saatlik MA yapılmış ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin ve 10 N yük altındaki 200 X büyütmedeki SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,125-1h; (b) ZAGB-0,25-1h; (c) ZAGB-0,5-1h; (d) ZAGB-1-1h; (e) ZAGB-2-1h; (f) ZAGB-3-1h

Aşınma yüzeyleri incelendiğinde ZA27/Grafen/B₄C nanokompozitlerde adhesiv ve delemantasyon aşınması olduğu SEM resimlerinde görülmüştür. Tüm aşınma yüzeylerinde aşınma yönüyle aynı doğrultuda aşınma izleri tespit edilmiştir. Yüksek büyütmelerde

yapılan incelemelerde aşınma yüzeylerindeki tabakalanmalar, plastik deformasyonlar ve çatlaklar görülmüştür. Düşük yüklerde tabakalanma ve soğuk yırtılmalar daha fazla görülmektedir. Bunun sebebi, düşük yüklerde yapılan deneylerde, numune yüzeyinden kopan partiküllerin ortamdan uzaklaştırılmaması sonucunda, deney süresince numune yüzeyine kısmen yapışmış olmasıdır. Büyük yüklerde ise aslında daha fazla partikül kopmuş olmasına karşın, kopan partiküller daha kuvvetli bir şekilde yüzeye tekrardan yapışmış ve soğuk kaynak meydana gelmiştir. Grafen oranının ağırlıkça %3'te sabit, B₄C oranının ağırlıkça %3 oranına çıkmasıyla adhezif aşınmanın yani yapışmanın azaldığı aşınma yüzeylerinden açıkça görülmektedir. Sert B₄C parçacıkları grafen parçacıklarının yapı içerisinde meydana getirdiği yumuşamayı ortadan kaldırmaktadır. Yapıdaki grafenin katı yağlayıcı özellik göstermesiyle pürüzsüz ve derin olmayan oluklar daha az aşınma miktarı belirlenmiştir.

3.7. Korozyon Davranışları

3.7.1 ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları

ZA27/Grafen Nanokompozitlerin korozyon davranışlarını en çok etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir:

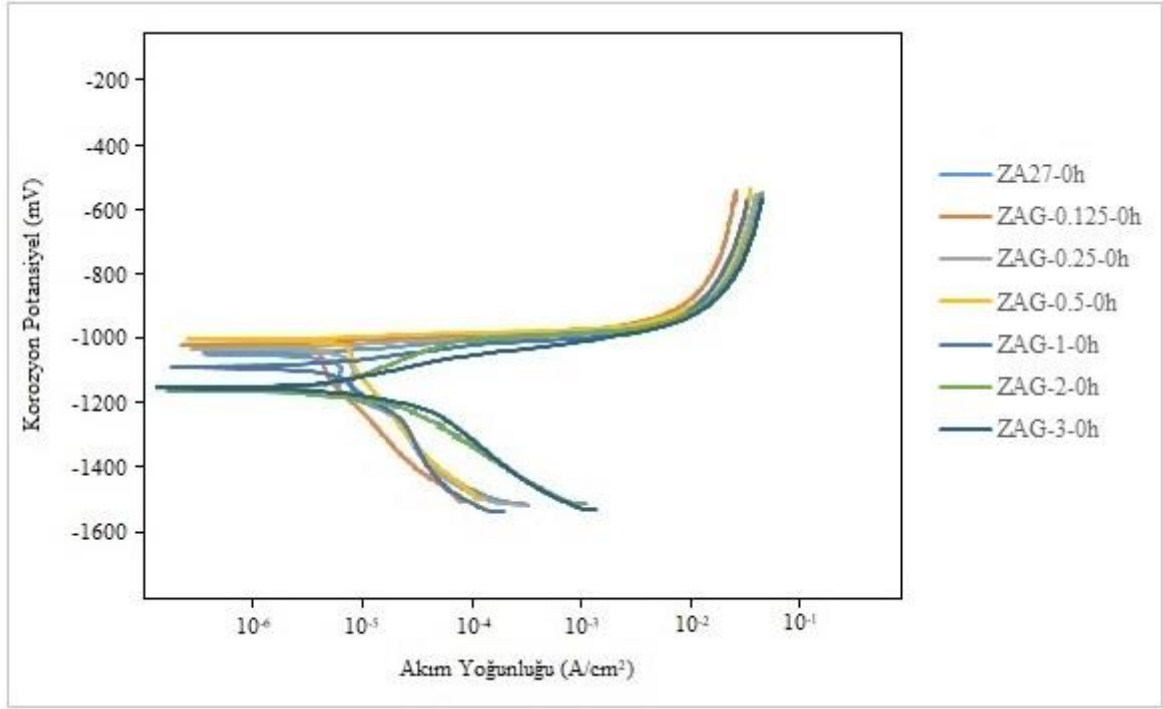
- Grafen partiküllerinin miktarı
- Grafen partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı
- Matris alaşımının mikroyapısı ve karakteristiği

Şekillerde ZA27 alaşımının ve ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik kutuplaşma eğrilerini göstermektedir. Bileşiklerin anotik polarizasyon eğrileri, uygulanan kutuplaşmadaki artış ile akım yoğunluğundaki bir artışla gösterilir. Bu ZA27 alaşımındaki çinko bakımından zengin bölgelerin anodik erimesini ve işlemin aktivasyon kontrolünü gösterir. Doğrusal tarama polarizasyonu sırasında ZA27 alaşımından çinko çözünmesinin ZA27 alaşımında alüminyumdan etkilenmediği sonucuna varılabilir. Eğrilerin katodik bölgeleri, ZA27 ve ZAG nanokompozitlerinin korozyonu sırasında katodik reaksiyon olan oksijen indirgememesinin kütle transferi kontrolü altında olduğunu ortaya koymuştur. Tablo 3.7, potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen ZA27 alaşımının ve ZA27/Grafen nanokompozitlerinin korozyon potansiyelini (E_{corr}), akım

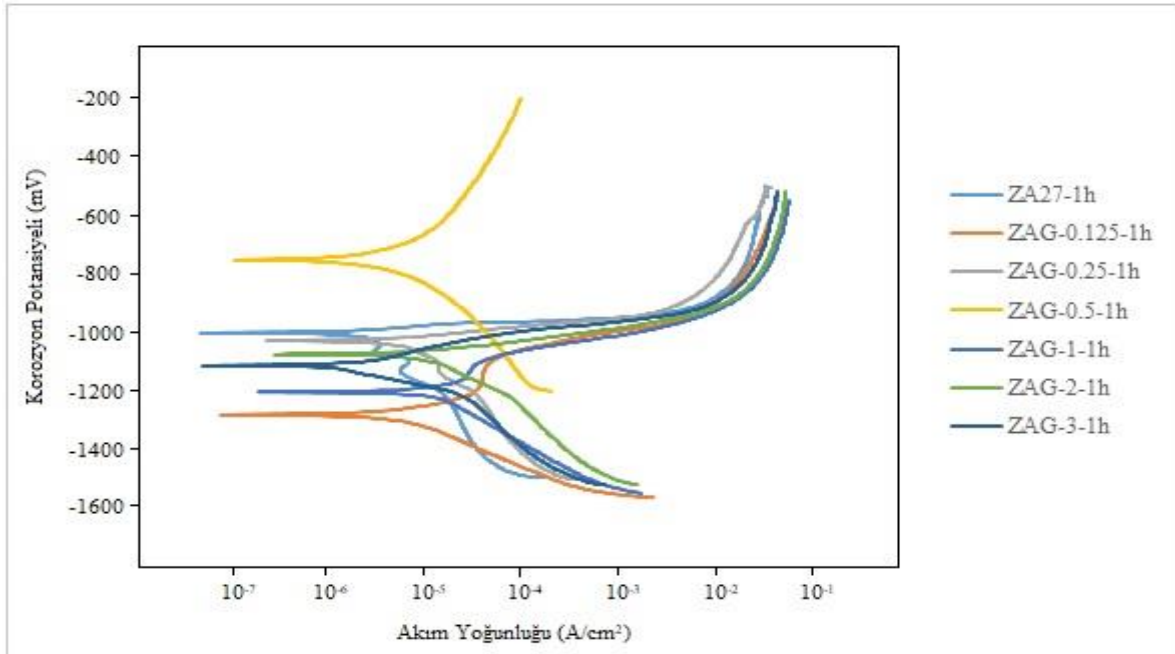
yoğunluğunu (I_{corr}) ve korozyon hızı değerlerini göstermektedir. Tablo 3.7' de gösterildiği gibi, ZAG-1-1h numunesi, diğer kompozit numuneden 16.47 mpy kadar maksimum korozyon hızı değerine sahiptir. ZAG-3-1h numunesi en düşük korozyon hızı 1.745 mpy sahiptir. ZAG-3-1h nanokompozitin korozyon hızı, ZA27 alaşımının korozyon oranından altı kat fazladır. ZA27/Grafen nanokompozit numunesinin korozyon hızı değerinde 16.47 ila 1.745 mpy arasında önemli bir azalma, % 1 ila % 3 arasında grafen içeriğindeki artış ile gözlemlendi. Bu davranış, nano grafen parçacıklarının ZA27 alaşım matrisine daha homojen dağılımına ve ZA27/Grafen nanokompozitlerinin daha yüksek korozyon direncinde neden olan mikro boşlukların minimal oluşumuna bağlanabilir.

Tablo 3.7. ZA27/Grafen nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri

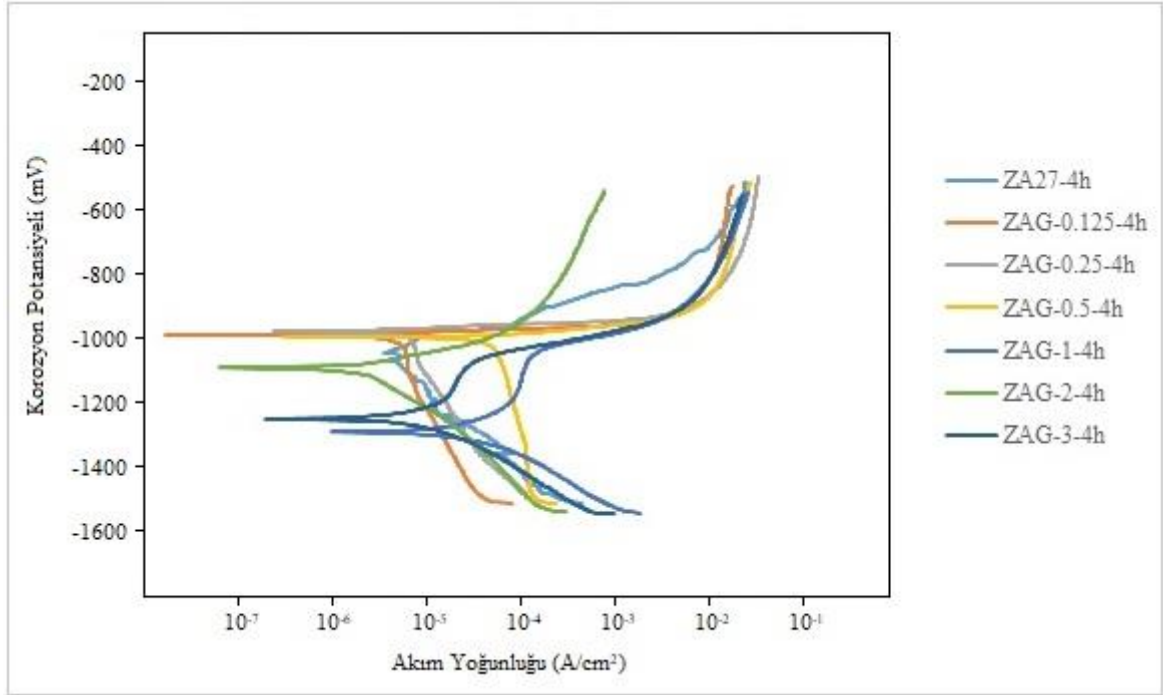
Numune	Korozyon akımı- I_{corr} (A/cm ²)	Korozyon potansiyeli- E_{corr} (mV)	Korozyon hızı (mpy)
ZA27-0h	6,47	-1180	7,7
ZAG-0,125-0h	2,16	-993	3,6
ZAG-0,25-0h	6,3	-1000	7,5
ZAG-0,5-0h	4,22	-977	5,7
ZAG-1-0h	5,74	-980	7,1
ZAG-2-0h	10,2	-1140	11,51
ZAG-3-0h	4,1	-1130	4,52
ZA27-1h	1,23	-1000	2,719
ZAG-0,125-1h	4,26	-1280	3,928
ZAG-0,25-1h	4,47	-1030	5,259
ZAG-0,5-1h	8,45	-753	9,645
ZAG-1-1h	16,6	-1200	16,47
ZAG-2-1h	7,68	-1080	9,172
ZAG-3-1h	1,5	-1110	1,745
ZA27-4h	1,4	-1070	1,854
ZAG-0,125-4h	6,51	-989	12,46
ZAG-0,25-4h	4,23	-977	5,74
ZAG-0,5-4h	9,15	-810	9,25
ZAG-1-4h	71,9	-996	88,98
ZAG-2-4h	3,19	-1090	3,863
ZAG-3-4h	15,3	-1250	14,69



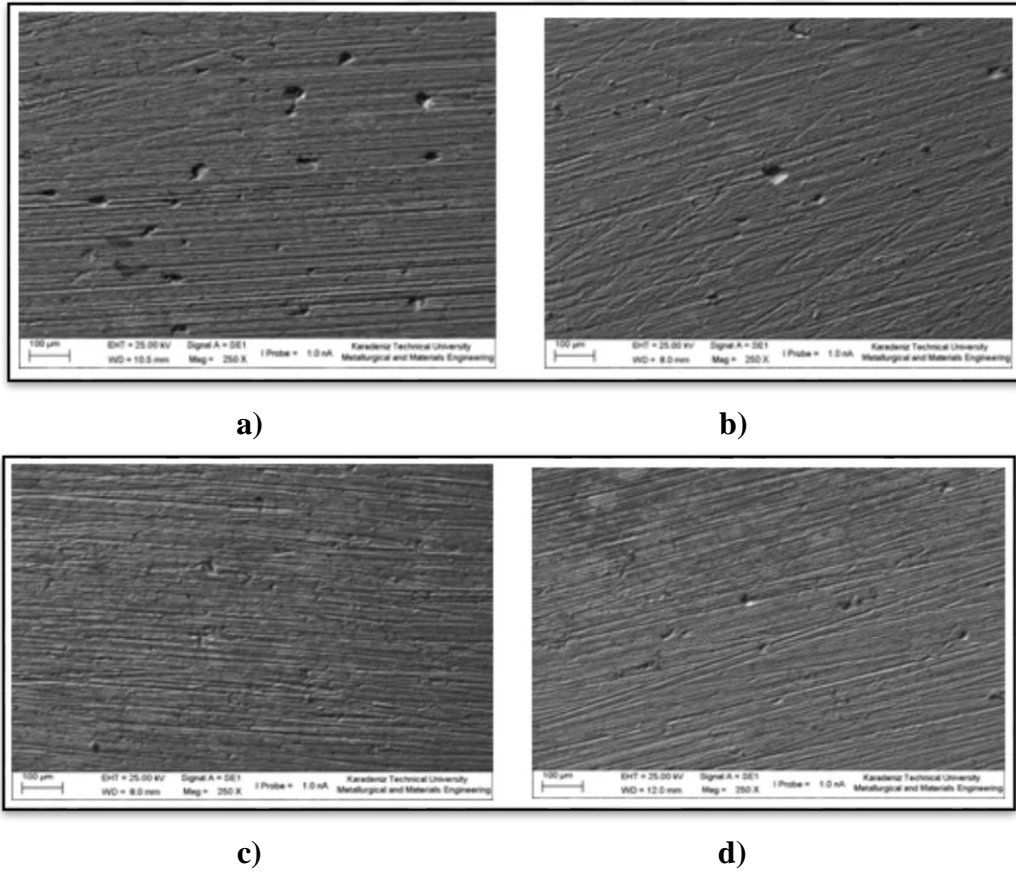
Şekil 3.45. 0 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.46. 1 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.47. 4 saatlik MA yapılan ZA27/Grafen nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.48. 1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAG-0,25-1h; (b) ZAG-0,5-1h; (c) ZAG-1-1h; (d) ZAG-3-1h

Şekil 3.48'de ZA27/Grafen nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri incelediğimiz zaman numunelerin yüzeylerinde çukurcuk korozyonunun olduğu anlaşılmaktadır. Oluşan çukurcukların yapıda homojen olmadığı, yüzeyin farklı yerlerinde daha az alanda ve daha az derinlikte olduğu görülmüştür. Özellikle ZAG-3-1h numunesinin I_{kor} değeri $1.5 (A/cm^2)$ ve korozyon hızı 1.745 mpy olması SEM görüntülerinde daha az çukurcuk korozyonuna maruz kaldığı anlaşılmaktadır. 1 saatlik MA süresinde ağırlıkça %3 Grafen takviyesinin ZA27/Grafen nanokompozitleri için en iyi korozyon direncini sağladığı açıkça görülmüştür.

3.7.2. ZA27/B₄C Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları

ZA27/B₄C nanokompozitlerin korozyon davranışlarını en çok etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir:

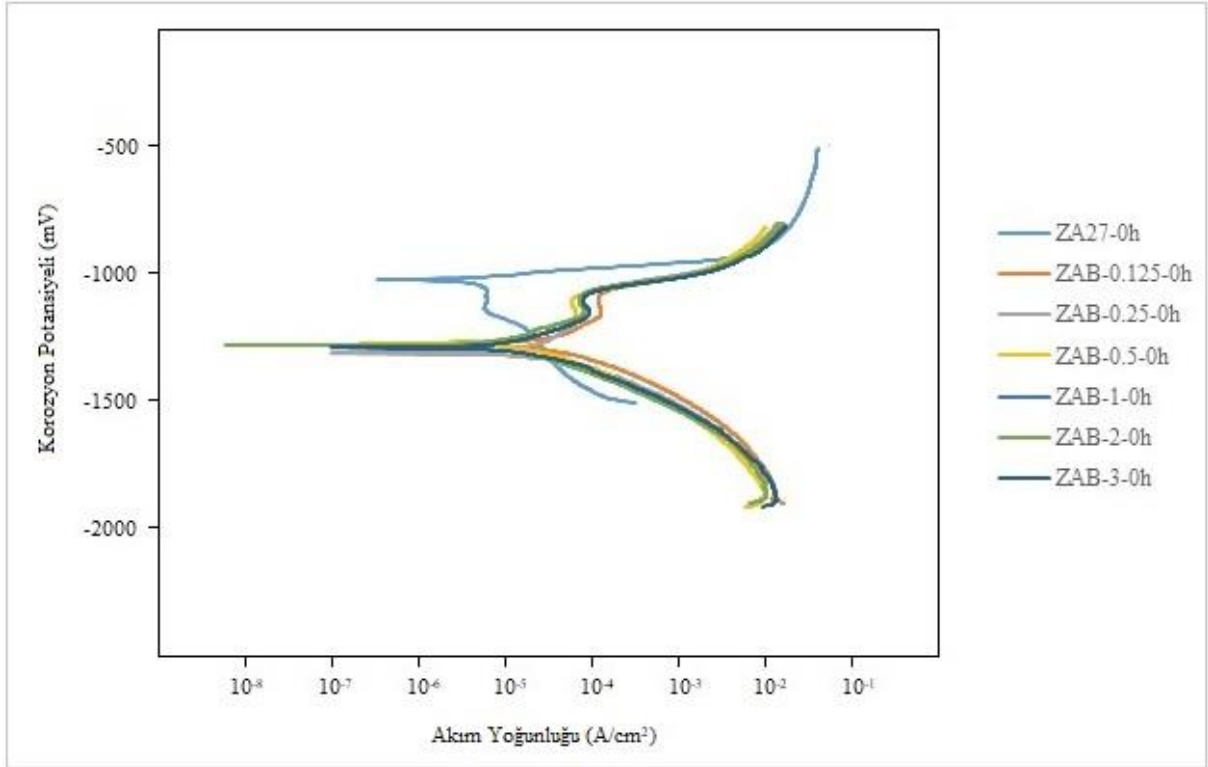
- B₄C partiküllerinin miktarı
- B₄C partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı
- Matris alaşımının mikroyapısı ve karakteristiği

Şekil 3.49, Şekil 3.50 ve Şekil 3.51'de ZA27 alaşımının ve ZA27/B₄C nanokompozitlerin potansiyodinamik kutuplaşma eğrilerini göstermektedir. Anodik olan polarizasyon eğrileri nanokompozit numunelerin anodik çözünmesi ile oluşurken, katodik polarizasyon eğrileri katodik oksijen çıkışını gösterir. Üretilen ZA27/B₄C nanokompozit numunelerin hem anodik hem de katodik polarizasyon eğrileri ZA27 matris numunesinin eğrileri ile benzer olduğu görülmüştür. NaCl çözeltisi içerisinde ZA27/B₄C nanokompozitlerin anodik pasif akım yoğunlukları Cl⁻ iyonlarının konsantrasyonunun artması ile arttığı görülmüştür. Doğrusal tarama polarizasyonu sırasında ZA27 alaşımlarından çinko çözünmesinin ZA27 alaşımında alüminyumdan etkilenmediği sonucuna varılabilir. Eğrilerin katodik bölgeleri, ZA27 ve ZA27/ B₄C nanokompozitlerin korozyonu sırasında katodik reaksiyon olan oksijen indirgemesinin kütle transferi kontrolü altında olduğunu ortaya koymuştur. Tablo 3.8'de potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen ZA27 alaşımının ve ZA27/ B₄C nanokompozitlerinin korozyon potansiyelini (E_{kor}), akım yoğunluğunu (I_{kor}) ve korozyon hızı değerlerini göstermektedir. Tablo 3.8' de gösterildiği gibi, ZAB-1-4h numunesi, diğer nanokompozit numunelere

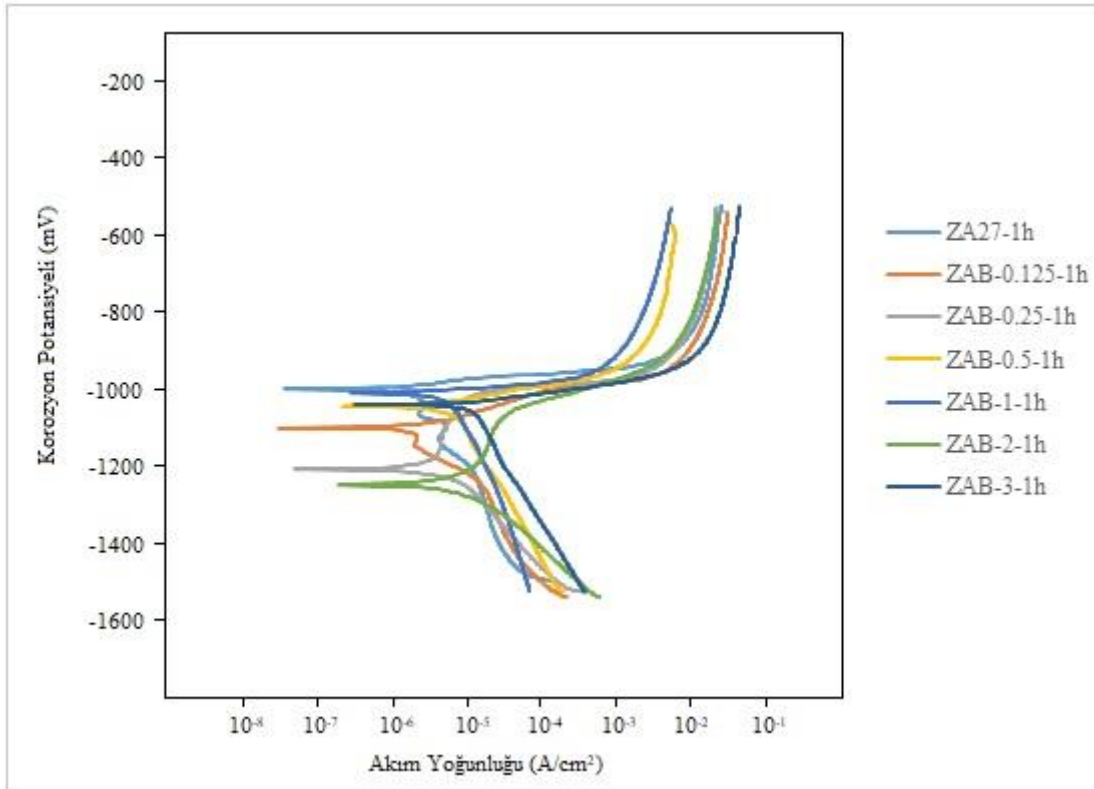
bakıldığında 21,06 mpy olarak maksimum korozyon hızı değerine sahiptir. ZAB-0,125-4h numunesi en düşük korozyon oranına 2,223 mpy sahiptir.

Tablo.3.8. ZA27/B₄C nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri

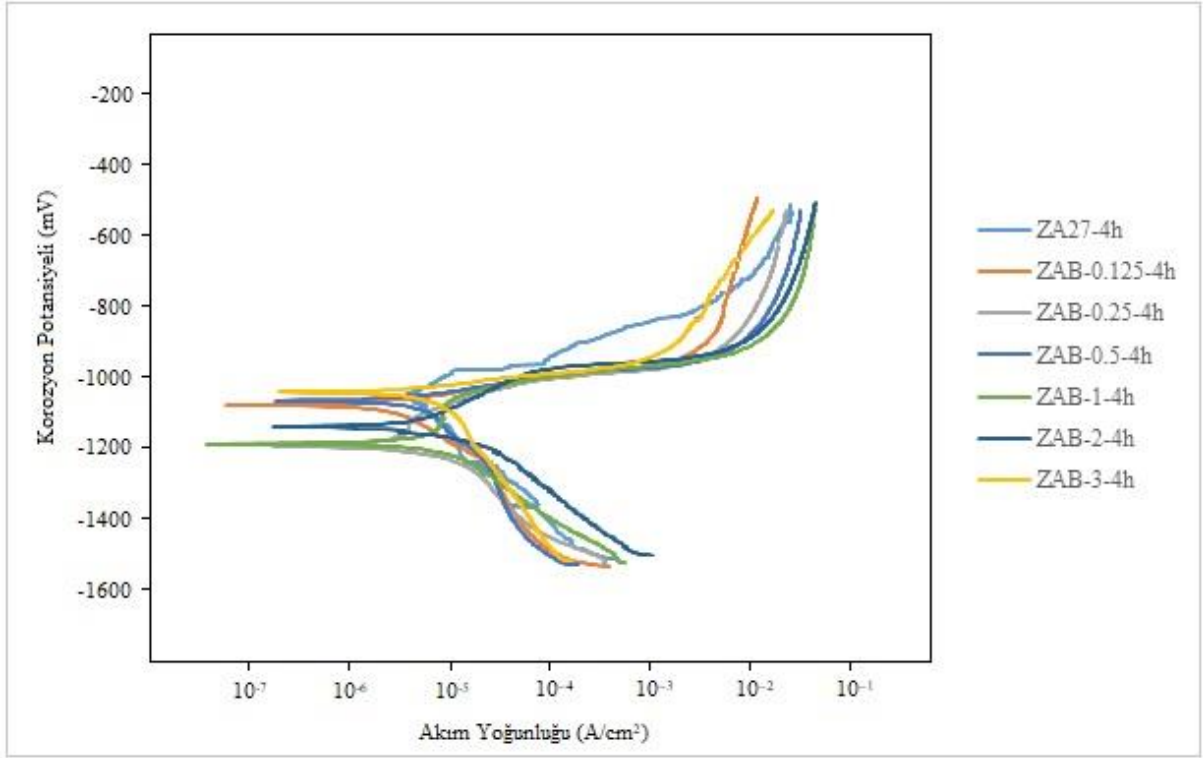
Numune	Korozyon akımı- I_{kor} (A/cm ²)	Korozyon potansiyeli- E_{kor} (mV)	Korozyon hızı (mpy)
ZA27-0h	6,47	-1180	7,7
ZAB-0,125-0h	15,7	-1270	20,1
ZAB-0,25-0h	10,1	-1310	14,9
ZAB-0,5-0h	3,65	-1270	5,59
ZAB-1-0h	10,4	-1280	13,42
ZAB-2-0h	3,53	-1280	3,92
ZAB-3-0h	3,17	-1290	3,59
ZA27-1h	1,23	-1000	2,719
ZAB-0,125-1h	3,51	-1100	3,958
ZAB-0,25-1h	11,5	-1210	14,63
ZAB-0,5-1h	5,77	-1040	6,573
ZAB-1-1h	9,83	-1010	18,17
ZAB-2-1h	15,7	-1250	14,89
ZAB-3-1h	19,1	-1040	15,02
ZA27-4h	1,4	-1070	1,854
ZAB-0,125-4h	2,1	-1080	2,233
ZAB-0,25-4h	14,6	-1190	17,09
ZAB-0,5-4h	5,58	-1010	9,419
ZAB-1-4h	19,1	-1190	21,06
ZAB-2-4h	11,4	-971	16,32
ZAB-3-4h	4,57	-1040	6,674



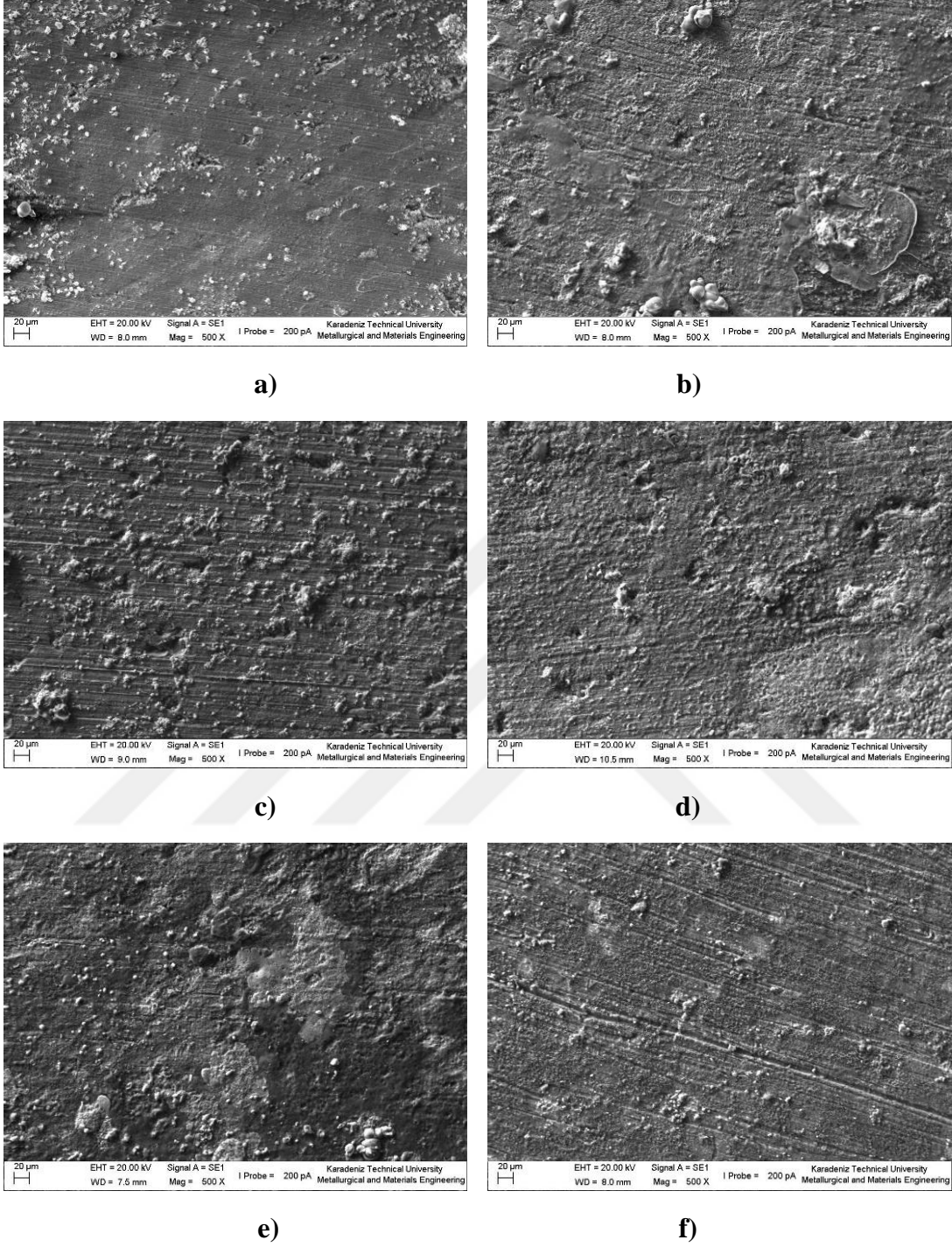
Şekil 3.49. 0 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.50. 1 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.51. 4 saatlik MA yapılan ZA27/B₄C nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.52. 1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/B₄C nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAB-0,125-1h; (b) ZAB-0,25-1h; (c) ZAB-0,5-1h; (d) ZAB-1-1h; (e) ZAB-2-1h; (f) ZAB-3-1h;

Şekil 3.52’de ZA27/B₄C nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri incelediğimiz zaman numunelerin yüzeylerinde farklı boyutlarda çukurcukların olduğu ve bu nedenle yüzeylerde çukurcuk korozyonunun olduğu anlaşılmaktadır. Oluşan

çukurcukların yapıda homojen olmadığı, yüzeyin farklı yerlerinde daha az alanda ve daha az derinlikte olduğu görülmüştür. Bu durum B₄C gibi seramik özlü bir takviyenin nano parçacıklarının bariyer görevi görerek numunelerin korozyon dayanımını artırdığı olarak söylenebilir.

3.7.3. ZA27/Grafen/B₄C Hibrit Nanokompozitlerin Korozyon Davranışları

ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin korozyon davranışlarını en çok etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir:

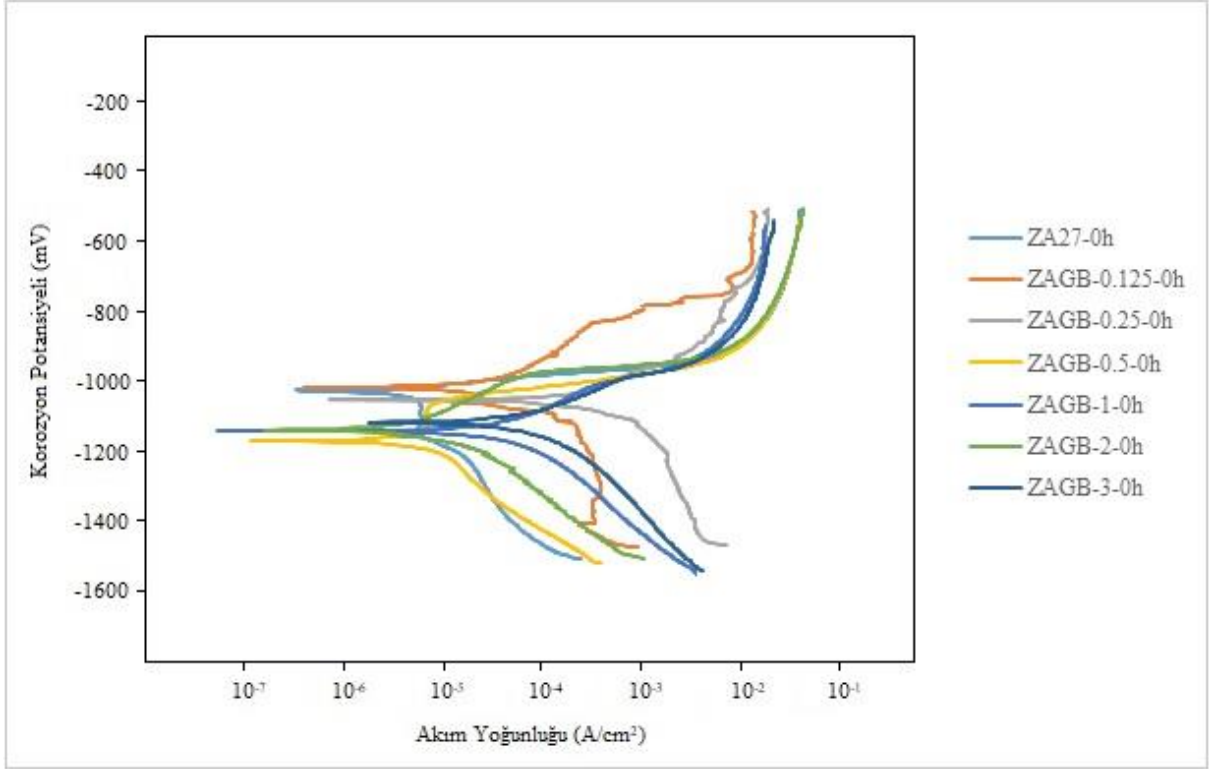
- Grafen partiküllerinin miktarı
- B₄C partiküllerinin miktarı
- Grafen partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı
- B₄C partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı
- Matris alaşımının mikroyapısı ve karakteristiği.

Şekil 3.53 ve 3.54’de verilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri incelendiğinde, farklı sürelerde mekanik alaşımlama sürelerine ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin korozyon potansiyellerinin (E_{kor}), 1 saatlik mekanik alaşımlama sürelerinde pozitif değerlere daha yakın olduğu ve akım yoğunluğu (I_{kor}) değerlerinin azaldığı görülmektedir. Pozitif yakın E_{kor} ve düşük I_{kor} değerleri, alaşımın korozyon direncinin daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. 0h mekanik alaşımlama yapılan ZAGB-2-0h numunesinin tafel eğrilerinden elde edilen potansiyodinamik polarizasyon parametrelerinde I_{kor} değeri, 10,5 A/cm² ve korozyon hızı 11,55 mm/yıl olarak ölçülmüştür. 1h mekanik alaşımlama yapılan ZAGB-2-1h numunesinin ise I_{kor} değeri 7,5 A/cm² ve korozyon hızı 20,8 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Yani, 1h mekanik alaşımlama ZAGB-2-1h alaşımının bu ortamdaki korozyon direnci, diğer alaşımlara oranla yüksektir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça toz boyutu azalmakta olup gözenek miktarı artmaktadır. Bununla birlikte toz boyutunun azalması yapı içerisinde tane sınırlarını artırmaktadır. Korozyon davranışlarının belirlenmesinde tane boyutu ile birlikte ortamın pasif ve aktif olma durumu da önemlidir. Çünkü küçük tane boyutu, aktif bir ortamda korozyon direncinde azalmaya yol açarken, pasif bir ortamda ise korozyon direncini artırmaktadır. Ayrıca E_{kor} değeri sıfırdan küçük olan metaller daha aktiftir (yani iyonlaşma eğilimi daha fazladır), E_{kor} değeri sıfırdan büyük olan metaller ise daha soydur. Yani, iyonlaşma eğilimi daha azdır. Metaller

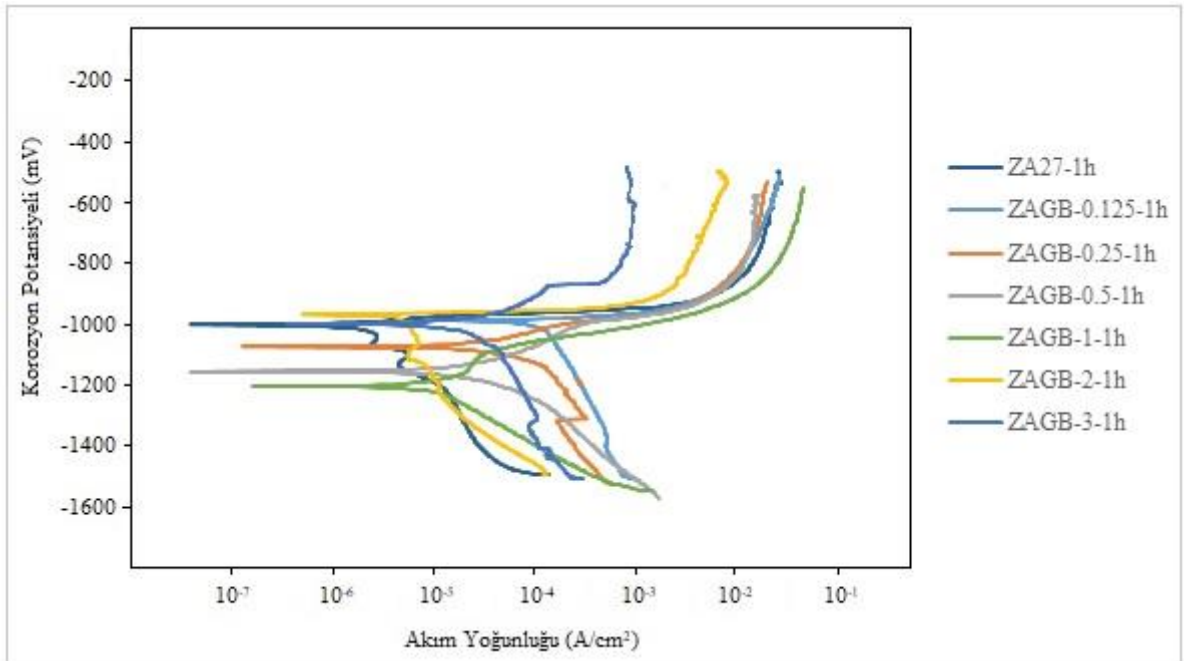
aktifleştikçe daha çabuk korozyona maruz kaldığı bilinmektedir [102]. Hibrit nanokompozitlerde korozyon hızları da yüksek çıkmaktadır. Bu durum galvanik korozyon nedeniyle olabilir.

Tablo.3.9. ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin polarizasyon verilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreleri

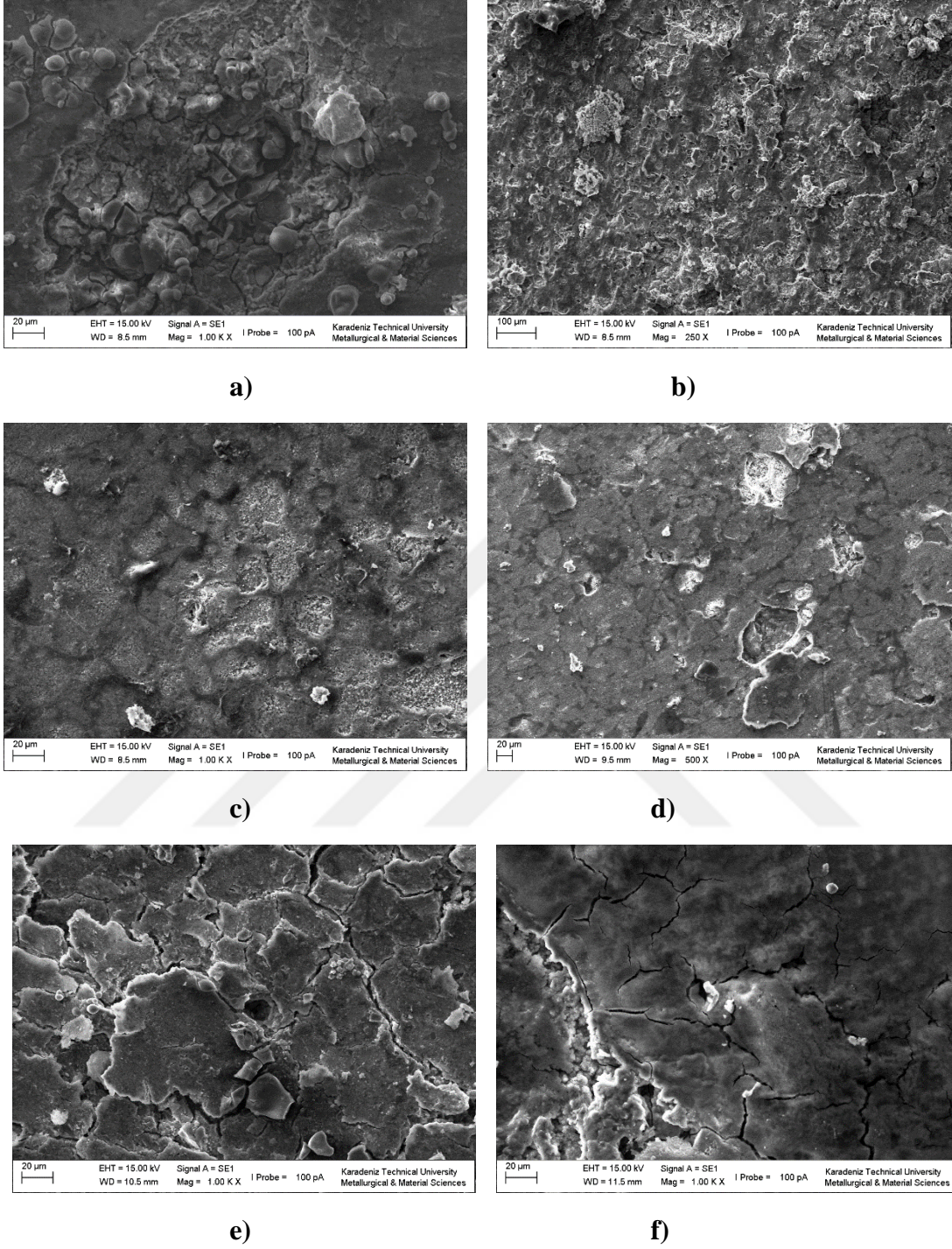
Numune	Korozyon akımı yoğunluğu- I_{kor} (A/cm ²)	Korozyon potansiyeli- E_{kor} (mV)	Korozyon hızı (mm/yıl)
ZA27-0h	6,47	-1180	7,7
ZAGB-0,125-0h	34,7	-1020	32,92
ZAGB-0,25-0h	276	-1060	320,8
ZAGB-0,5-0h	26,6	-1170	26,57
ZAGB-1-0h	59,3	-1140	73,32
ZAGB-2-0h	10,5	-1140	11,55
ZAGB-3-0h	77,2	-1120	123,8
ZA27-1h	1,23	-1000	2,719
ZAGB-0,125-1h	193	-988	190,6
ZAGB-0,25-1h	41,7	-1070	59,02
ZAGB-0,5-1h	19,4	-1150	57,6
ZAGB-1-1h	16,9	-1200	16,77
ZAGB-2-1h	7,5	-968	20,8
ZAGB-3-1h	79,6	-999	145,4



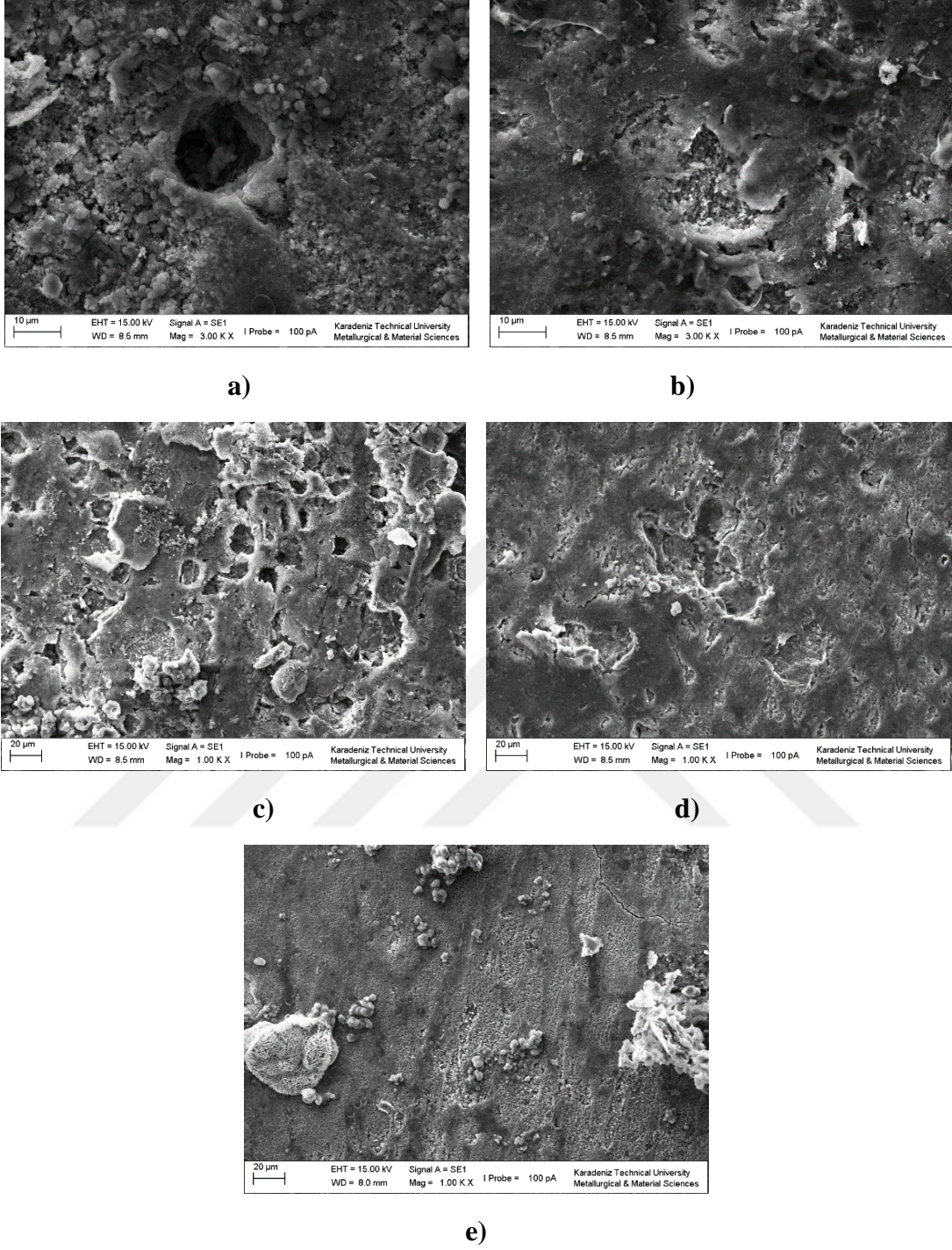
Şekil 3.53. 0 saatlik MA yapılan ZA27 ve ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.54. 1 saatlik MA yapılan ZA27 ve ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 3.55. 0 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,125-0h; (b) ZAGB-0,25-0h; (c) ZAGB-0,5-0h; (d) ZAGB-1-0h; (e) ZAGB-2-0h; (f) ZAGB-3-0h



Şekil 3.56. 1 saatlik MA işlemi yapılmış ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri: (a) ZAGB-0,25-1h; (b) ZAGB-0,5-1h; (c) ZAGB-1-1h; (d) ZAGB-2-1h; (e) ZAGB-3-1h

Şekil 3.55 ve Şekil 3.56'da ZA27/Grafen/B₄C hibrit nanokompozitlerin korozyon sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Hibrit nanokompozit numunelerin yüzeyinde korozyon sonrası farklı boyutlarda çukurcukların oluştuğu ve bu nedenle de numunelerin

yüzeylerinde çukurcuk korozyonunun oluştuğu görülmektedir. Bu korozyon türü genellikle, klor içeren nötr ortamlarda meydana gelir. Çukurcuk korozyonu, elektrot potansiyeli kritik bir değeri aştığında klorür, bromür, iyodür veya perklorat iyonları içeren ortamlarda, pasifleştirilmiş metal ve alaşımlarında görüldüğü bilinmektedir. Çukurcuklaşma potansiyelide, alaşıma ve korozif yapıya bağlı olarak (çukurcukların çapı ve derinliği) değişmektedir.



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ZA27 matris malzemesi nano boyutta Grafen ve B₄C ile takviye edilerek nanokompozit ve hibrit nanokompozitler toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin; sertlik, yoğunluk, içyapı, aşınma ve korozyon davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen temel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. ZA27 matrisli Grafen ve B₄C takviyeli nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemeler mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yöntemiyle üretildi.

2. ZA27/Grafen, ZA27/B₄C ve ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozit tozlarının mekanik alaşımlama sonrası elde edilen mikroyapılarının karakterizasyon sonuçlarına göre; Grafen ve B₄C nano partiküllerinin ZA27 matrisi içerisinde homojene yakın bir şekilde dağıtıldığı öğütme süresi 1 saat olarak belirlenmiştir. Mekanik öğütme işlemi ile Grafen ve B₄C nano partiküllerinin matris içerisine homojen olarak dağıtılmış nanokompozit ve hibrit nanokompozit tozlar üretildi.

3. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin yoğunluk değerleri artan takviye oranları ile azalmış olup bunun sonucu olarak gözenek miktarı oranları artmıştır.

4. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin sertlik değerleri artan takviye oranları ile azalmış olup en düşük sertlik değeri 45,2 Hb değeri ile ZAG-3-4h numunesinde meydana gelmiştir.

5. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozitlerin çekme mukavemeti değerleri artan takviye oranı ile azalmış olup en düşük sertlik değeri 28 MPa değeri ile ZAG-3-1h numunesinde görülmüştür. . ZA27 matris numunesi 0h MA süresinde çekme mukavemeti 110 MPa iken 0,125 B₄C takviyesi ile 80,3 MPa değerine, 0,125 Grafen takviyesi ile 63 MPa değerine düşmüştür.

6. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin SEM EDS element dağılımı ve XRD sonuçlarına göre; Al, Zn, CuZn₅, B₄C ve Grafen fazlarına rastlanmıştır. Takviye miktarının artması ile Al, Zn, CuZn₅ fazların miktarında azalma görüldü.

7. Bütün nanokompozit ve hibrit nanokompozit malzemeler için ball-on-disk aşınma deneyi sonucunda gözlemlenen aşınma mekanizmaları adhesive ve delemantasyon aşınması olduğu belirlenmiştir. Aşınma kayıpları artan aşınma yükü ile artmaktadır. En büyük

ağırlık kayıpları 10 N yükde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde görülmüştür. En yüksek ağırlık kaybı matris malzemesi olan ZA27-0h ile 10N yük altında 976,6 mgr. olarak ölçülmüştür. En düşük ağırlık kaybı ise %3 Grafen takviyeli 4 saatlik MA yapılan ZAG-3-4h numunesinde 1N yük altında 0,0008 mgr. olarak ölçülmüştür.

8. Hazırlanan bütün nanokompozit ve hibrit nanokompozitler ZA27 matris alaşımından daha yüksek bir aşınma direnci göstermiştir.

9. ZA27/Grafen/B₄C nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testleri sonuçlarına göre en yüksek korozyon direncine sahip ZAG-3-1h nanokompozitinin korozyon hızı 1.745 mpy olarak belirlenmiştir. Hibrit nanokompozit numunelerde en iyi korozyon direnci 11,55 mpy değerinde korozyon hızı ile ZAGB-2-0h numunesinde olmuştur.

5. ÖNERİLER

1. Üretilen nanokompozit ve hibrit nanokompozitlerin mikroyapısal incelemelerinde geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılabilir. Nano boyutlu partiküller daha doğru analiz edilebilir.

2. ZA27/Grafen, ZA27/B₄C ve ZA27/Grafen/B₄C üretiminde toz metalürji yönteminden sonra ikincil bir yöntem uygulanabilir. Porozite miktarı daha düşük, sertliği daha yüksek numuneler üretileceği düşünülmektedir.

3. Aşınma deneylerinde farklı hızlar, farklı yükler mesafeler uygulanarak aşınma davranışları daha geniş bir şekilde incelenebilir.

4. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri, tam yağlı ortam, kesikli yağlı ortamda da yapılarak malzemelerin aşınma davranışları incelenebilir.

5. NaCl kullanılarak yapılan korozyon deneyleri farklı solüsyonlar kullanılarak farklı ortamlarda yapılarak sonuçları araştırılabilir.

6. ZA27/Grafen, ZA27/B₄C ve ZA27/Grafen/B₄C nano kompozit ve hibrit nanokompozitlerin farklı korozyon ölçme yöntemleri kullanılarak korozyon davranışları üzerine çalışmalar yapılabilir.

7. Üretilen numunelere çeşitli ısıl işlemler uygulanarak mekanik özellikleri incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., ve Włosiński, W., The production and application of metal matrix composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 106 (2000) 58-67. 2
2. Mitrović, S., Babić, M., Stojanović, B., and Miloradović N., Tribological Potencial Of Hybrid Composites Based On Zinc And Alüminium Alloys Reinforced With SiC And Graphite Particles, 12th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 2011.
3. A. Alizadeh, E. Taheri-Nassaj, Mechanical properties and wear behavior of Al–2 wt.% Cu alloy composites reinforced by B4C nanoparticles and fabricated by mechanical milling and hot extrusion, *Materials characterization*, 67 (2012) 119-128.
4. Jia, D.C., Influence of SiC particulate size on the microstructural evolution and mechanical properties of Al–6Ti–6Nb matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, 289 (2000) 83–90.
5. Demirel, A., Karbon elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007
6. Erdemir, F., 2016 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al2024/SiC Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü.,Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
7. Çalın, R., Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
8. Hull, D., “An Introduction to Composite Materials”, Cambridge University Pres, 71-79, 1992.
9. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Ankara, 2006.
10. Ersoy, H. Y., “Kompozit Malzeme”, İstanbul, 95-127, 2001
11. Goodwin ,E. F., and Ponikvar, A. L., 1989: *Engineering Properties of Zinc Alloys*, Third Edition – Revised.]
12. Houghton, M.E., Murray, M.T., —An Introduction to Zinc Alloys|| , *Metals Forum*, 6(4): 211-225 (1984).
13. Calayag, T. S., 1984: ZA Casting Alloys Hold Promise for Metalcasting Industry, *Modern Casting*, Vol. 74, no. 8, pp. 19-22.
14. Savaşkan, T., Murphy, S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, *Materials Science and Technology*. (1990) 695-700.
15. Bican, O., (2004). Silisyum Oranının Monotektoid Esaslı Zn-Al-Cu-Si Alaşımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi 2004, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı.

16. Uğur, A., 1998: Basınçlı Döküm Yöntemiyle üretilen Zn-Al Alaşımlarının Mikroyapıları ile Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
17. Hunt, J.W., ve Herling, D.R., Aluminum Metal Matrix Composites, *Advanced Materials & Processes*, 162 (2004) 39.
18. Ürkmez B, Mucize malzeme-Grafen, *Açık bilim dergisi*, Aralık 2012
19. Marinho, B., Ghislandi. M., Tkalya, E., Koning, C.E. ve Gijsbertus, de With., Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder, *Powder Technology*, 221 (2012) 351–358.
20. Fan, Y., Wang, L., Li, J., Li, J., Sun, S., Chen, F., Chen, L., Jiang, W., Preparation and electrical properties of graphene nanosheet/Al₂O₃ composites, *Carbon*, 48 (2010) 1743-1749.
21. Stankovich, S., Dikin, D., Dommett, G., Kohlhaas, K., Zimney, E., Stach, E., Piner, R., Nguyen, S. and Ruoff, R., 2006, Graphene-Based Composite Materials, *Nature*, 282-286pp.
22. Kumar, H. G., P., Xavier, M. A. 2014. “Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review,” *Pocedia Engineering*, vol. 97, p. 1033-1040.
23. Mahmut Can Şenel, Mevlüt Gürbüz, Erdem Koç “GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ YENİ NESİL KOMPOZİTLER” Ekim 2015 - Sayı: 669 mühendis ve makine
24. Thévenot, F. (1990). Boron carbide—A comprehensive review,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, 6(4), 205–225.
25. Weimer, A.W., 1997. Selected property data, in Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing, 637-665, Chapman & Hall, ISBN 0-412-54060-6
26. J. Greim, K.A. Schwetz., (2006), Boron Carbide, Boron Nitride and Metal Borides, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Wiley InterScience, 3510 – 3522
27. Li, Y.Q. ve Qiu, T., (2007), Oxidation behaviour of boron carbide powder. *Materials Science and Engineering A* 444, 184–191.
28. Suryanarayana, C., *Mechanical Alloying and Milling*, Marcel Dekker Press, New York, 2004.
29. Tjong S.,C., Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties, *Advanced Engineering Materials*, No. 8, 2007.
30. Dalmış R, 2014 “Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Nano-parçacık Takviyeli Zn-Al Esaslı Nano-kompozit Malzemelerin Üretilmesi, İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Trabzon

31. Varol T, 2012 “AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Trabzon
32. Roll, K.H. History of Powder Metallurgy, Metals Handbook, 9th Ed., vol 7, 14-20, (1984).
33. German, R.M., Powder Metallurgy Science, MPIF, USA, 1 (1989) 203-335.
34. Jacobs, A.J., ve Kilduff, T.F., Engineering Materials Technology: Structure, Processing, Properties and Selection, 5. Edition, Prentice-Hall Inc., USA, 645 (2005) 357-397.
35. Moustafa, S.F., Abdel-Hamid, Z., ve Abd-Elhay, A.M., Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique, Materials Letters, 53 (2002) 244-249.
36. Upadhyaya, G.S., Powder Metallurgy Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2002
37. Hale, R., Powder Metallurgy Process and Applications, AE 510 Research Project, University of Kansas, Lawrence, 2003
38. Randal, M.G., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşleme, Çeviri Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker ve Nuri Durlu, Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
39. Arifin, A., Sulong, A. B., Muhamad, N., Syarif, J., and Ramli, M. I., “Material processing of hydroxyapatite and titanium alloy (HA/Ti) composite as implant materials using powder metallurgy: a review”, Materials & Design, 55: 165-175 (2014).
40. Yasser, M.S., Hugh, A.B., Michael, L.P., ve Jonathan, G.K., Modeling the evolution of stress due to differential shrinkage in powder-processed functionally graded metal–ceramic composites during pressureless sintering, International Journal of Solids and Structures, 43 (2006) 7852–7868
41. Erdem, M., Türker, M., “Farklı Sürelerde Mekanik Alaşımlanan Nikel Esaslı Süperalaşım Tozun Karakterizasyonu”, 6. International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, 717-726, Ankara, (2011)
42. Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling, Progress in Materials and Science, 46 (2001) 1-184.
43. Aktaş, H., Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007
44. Kaya, H., “Spex Tipi Mekanik Alaşım Cihazının Tasarımı, İmalatı Ve Öğütme Kabiliyetinin İncelenmesi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İats’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye (2009).
45. Adamiak, M., Mechanical alloying for fabrication of aluminium matrix composite powders with Ti-Al intermetallics reinforcement, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 31 (2008) 191-196.

46. Özgün, E.C., Mekanik Alaşım Yöntemiyle Sentezlenen Al-TiC ve Al-Ti-C Toz ve Sinter Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
47. Cebeci, H.A., Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2008.
48. Goff, A., 2003. Modeling and synthesis of a piezoelectric ceramic-reinforced metal matrix composites. MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
49. Bostan, B., “Alüminyum Karbon Tozlarından Mekanik Alaşım Ve Sonrası İşlemlerle Al4C3 Sentezlenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, (2003).
50. Di, L., M., Bakker, H. J., “Phase transformation of the compound V3Ga induced by mechanical grinding”, *Phsy. C: Condens. Matter*, 3: 3427-3432 (1991).
51. Güler, Ö., “Oksit Takviyeli Bakır Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilmesi Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2006).
52. Dörtbölük, C., “Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu”, Bilim Uzmanlık Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Eylül (2006).
53. *Metals Handbook*, 9th edition, Volume 7, Powder Metallurgy, ASM, U.S.A., 1984
54. Özbek, Ğ., 1999, “Borlama Yöntemiyle (AISI M50 ve AISI M2) Yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
55. Eyre, T. S., 1991, “Friction and Wear Control in Industry”, *Surface Engineering*, Vol. 7, 143–148.
56. Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., “Bakım ve Tamir İşlerinde Kaynak ve Metal Püskürtme”, *Metal ve Kaynak*, 49: 21-25 (1993).
57. Silva, F. J., Casais, R. B., Martinho, R. P. and Baptista, A. P. M., “Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests”, *Wear*, 271 (9): 2632-2639 (2011).
58. Holmberg, K., Matthews A., 1994, “Coating Tribology”, Elsevier Science B.V., pp: 4574.
59. Ulukan, L., 1993, “Makine Elemanları III”, Ders Notu, İstanbul.
60. Suzin S.H., 2011, Grafit ve SiC Takviyeli ZA 27 Hibrit Kompozit Malzemelerin Isıl İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek lisans tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

61. Lipson, C., Colwell, L.V., 1961, "Handbook of Mechanical Wear", University of Michigan, Michigan.
62. Hutchings, I. M., "Tribology: Friction And Wear Of Engineering Materials, Metallurgy And Materials Science Series, First Published in Great Britain, (1992).
63. Anık, S., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", W. Weissbach'ın Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung adlı eserinden çeviri, Kurtuluş Matbaası, İstanbul, 28-35, (1977).
64. Sarıkaya, Ö., "Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri", Korozyon Derneği Yayını, Ankara, 1-60 (2007).
65. Campbell, F.C. (2008). Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, p. 323-549, ASM International, Materials Park, Ohio
66. Uluengin, B., "Mimari Metaller Özellikleri, Bozulma Nedenleri, Koruma Ve Restorasyon Teknikleri", Birsen Yayınevi, İstanbul, (2006).
67. Kumar, P., Ghosh, M.M., ve Ghosh, K.S., Effect of solution pH on electrochemical and stress corrosion cracking behaviour of a 7150 Al-Zn-Mg-Cu alloy, Materials Science & Engineering A ,604 (2014) 156–165. 57
68. Erdemir, F., Canakci, A., Varol, T., ve Ozkaya, S., Corrosion and wear behavior of functionally graded Al2024/SiC composites produced by hot pressing and consolidation, Journal of Alloys and Compounds, 644 (2015) 589–596.
69. Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V. and Ojeda, R., "Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures – a technical review", J. Loss Prev. Process Ind., 37: 39-62 (2015).
70. De Meo, D. and Oterkus, E., "Finite element implementation of a peridynamic pitting corrosion damage model", Ocean Engineering, 135: 76-83 (2017).
71. Bilhan, H., "Çeşitli organik tükürük komponentlerinin diş hekimliğinde kullanılan farklı döküm alaşımları ve amalgam'ın korozyonu üzerine etkisi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 25-29 (2003).
72. Bardal, E., "Corrosion and protection", Springer, London, 122-135 (2007).
73. Revie, R. W., and Uhlig, H. H., "Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering", Hoboken New Jersey, 425-434 (2008).
74. Zhu, Y.T., Torres, G., Piha, G., Complex microstructural changes in as-cast eutectic Zn-Al alloys. Journal of Materials Science 29 (1994) 1449–1452
75. Prasad, B.K., Sliding wear response of a zinc-based alloy and its composite and comparison with a gray cast iron: influence of external lubrication and microstructural features. Materials Science and Engineering A 392 (2005) 427–439.
76. Gervais, E., ZA alloys – a challenge to the metal industry. CIM Bulletin 80 (1987) 67–142.

77. Savaskan, T., Hekimoglu, A.P., Purcek, G., Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc–aluminumcopper alloys. *Tribology International* 37 (2004) 45–50.
78. Savaşkan, T., Bican, O., Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0.5)Si alloys, *Materials Science and Engineering A* 404 (2005) 259-269.
79. Prasad, B.K., Sliding wear response of a zinc-based alloy and its composite and comparison with a gray cast iron: influence of external lubrication and microstructural features. *Materials Science and Engineering A* 392 (2005) 427–439.
80. Mishra.,S.K, Biswas.S, Satapathy.A .Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India (2014) 958-965
81. KHW Seah, SC Sharma, BM Girish, Mechanical properties of cast ZA-27/graphite particulate composites, *Materials & Design* 16 (1995) 271-275,
82. M.T. Abou El-khair, A. Lotfy, A. Daoud, A.M. El-Sheikh, Microstructure, thermal behavior and mechanical properties of squeeze cast SiC, ZrO₂ or C reinforced ZA27 composites, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 2353-2362.
83. B.M. Girish, K.R. Prakash, B.M. Satisha, P.K. Jainb, Kameshwary Devic, Need for optimization of graphite particle reinforcement in ZA27 alloy composites for tribological applications, *Materials Science and Engineering A* 530 (2011) 382-388
84. Prasad B.K., Investigation into sliding wear performance of zinc-based alloy reinforced with SiC particles in dry and lubricated conditions, *Wear*, 262 (207) 262-73
85. Cunzhu Nie, Jiajun Gu, Junliang Liu, Di Zhang, Investigation on microstructures and interface character of B₄C particles reinforced 2024Al matrix composites fabricated by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds* 454 (2008) 118-122.
86. T. Varol and A. Canakci, Effect of Weight Percentage and Particle Size of B₄C Reinforcement on Physical and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Al2024-B₄C Composites, 19 (2013) 1227-1234.
87. Chuandong Wu, Pan Fang, Guoqiang Luo, Fei Chen, Qiang Shen, Lianmeng Zhang, Enrique J. Lavernia, Effect of plasma activated sintering parameters on microstructure and mechanical properties of Al-7075/B₄C composites, *Journal of Alloys and Compounds* 615 (2014) 276-282.
88. Yuhai Dou, Yong Liu, Yanbin Liu, Zhiping Xiong, Qingbing Xia, Friction and wear behaviors of B₄C/6061Al composite, *Materials and Design* 60 (2014) 669-677.
89. A. Baradeswaran, S.C. Vettivel, A. Elaya Perumal, N. Selvakumar, R. Franklin Issac, Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B₄C and graphite reinforced aluminium hybrid composites, *Materials and Design* 63 (2014) 620-632.

90. Rajkumar K, Aravindan S, Microwave sintering of copper–graphite composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 5601–5605.
91. Rajkumar K, Aravindan S, Tribological behavior of microwave processed copper–nanographite composites, *Tribology International*, 57 (2013) 282–296.
92. Wang J, Li Z, Fan G, Pan H, Chen Z, Zhang D, Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites, *Scripta Materialia*, 66 (2012) 594–597.
93. Chen LY, Konishi H, Fehrenbacher, A, Ma C, Xu JQ, Choi H, Xu, HF, Frank E, Pfefferkorn and Xiao-Chun Li, Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites, *Scripta Materialia*, 67 (2012) 29-32.
94. R. Perez-Bustamante, D. Bolanos-Morales, J. Bonilla-Martinez, I. Estrada-Guel, R. Martinez-Sanchez, Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.225>
95. Muhammad Rashad, Fusheng Pan, Muhammad Asif, Aitao Tang, Powder metallurgy of Mg-1%Al-1%Sn alloy reinforced with low content of graphene nanoplatelets (GNPs), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.028>
96. K.H.W. Seah, F.S.C. Sharmas and B.M. Girishs, Corrosion Characteristics of Za-27-Graphite Particulate Composites, *Corrosion Science*, 39 (1997) 1-7.
97. Bobic, B., Bajat, J., Bobic, I., and Jegdic, B., (2016). Corrosion Influence on Surface Appearance and Microstructure of Compo Cast ZA27/SiCp Composites in Sodium Chloride Solution, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26 pp. 1512–1521.
98. Güler O., Çuvalcı H., Çanakçı A., Çelebi M. “The Effect of Nano Graphite Particle Content on the Wear Behaviour of ZA27 Based Hybrid Composites” *Advanced Composites Letters*, vol.26, pp.30-36, 2017
99. Güler O., Çuvalcı H., Gökdag M. , Çanakçı A., Çelebi M., "Tribological behavior of ZA27/Al₂O₃/graphite hybrid nanocomposites", *Particulate Science and Technology*, no.7, pp.899-907, 2018
100. Dalmış R., Çuvalcı H., Çanakçı A., Güler O., "Effect of nano-sized B₄C addition on the mechanical properties of ZA27 composites", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, vol.32, pp.747-752, 2017
101. Dalmış R., Çuvalcı H., Çanakçı A., Güler O., "Investigation of Graphite Nano Particle Addition on the Physical and Mechanical Properties of ZA27 Composites" *Advanced Composites Letters*, Vol. 25, pp. 37-42, 2016
102. Gollapudi, S., “Grain size distribution effects on the corrosion behaviour of materials”, *Corrosion Science*, 62: 90-94 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2005 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisansını tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği anabilim dalında doktora eğitimine başladı. Şuan Karadeniz Teknik Üniversitesi Abdullah Kanca MYO'da Öğretim görevlisi olarak görev yapmakta olup, yayınlanmış 3 adet SCI makalesi, 22 adet uluslararası bildirisi, 2 adet ulusal makalesi bulunmakta ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

