

**MAGNEZYUM MATRİSLİ NANOPARTİKÜL
TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ
METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

**2018
DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

MUHAMMET EMRE TURAN

**MAGNEZYUM MATRİSLİ NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Muhammet Emre TURAN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Eylül 2018

Muhammet Emre TURAN tarafından hazırlanan “MAGNEZYUM MATRİSLİ NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yavuz SUN

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 14/09/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

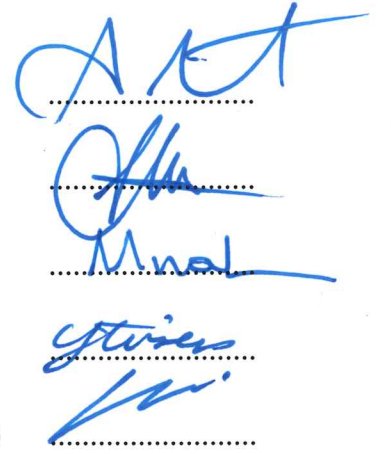
Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

Üye : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mehmet ÜNAL (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Cahit KARAOĞLANLI (BÜ)



...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





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

Muhammet Emre TURAN

ÖZET

Doktora Tezi

MAGNEZYUM MATRİSLİ NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Muhammet Emre TURAN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Yavuz SUN

Eylül 2018, 126 sayfa

Bu çalışmada, farklı matrisli magnezyum ve magnezyum alaşımlarına farklı oranlarda (ağırlıkça 0.1, 0.25 ve 0.5) karbon nanotüp, grafen ve fulleren başarılı bir şekilde katılarak toz metalurjisi yöntemiyle metal matrisli kompozitler üretilmiştir. Karbon nanopartiküller ile mikron boyuttaki matris malzemelerinin homojen karışması, mekanik alaşımlama gibi geleneksel yöntemlerle zor olduğu için sıvı bazlı özel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemle vakum destilasyon sistemi içerisinde manyetik karıştırıcı vasıtasıyla solüsyon içerisinde matris ve takviye malzemeleri uniform bir şekilde karıştırılmıştır. X ışını kırınımı yöntemiyle (XRD) faz analizleri yapılmış, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik, basma ve aşınma testleri ile mekanik özellikler incelenmiştir. Elektrokimyasal korozyon testleriyle karbon nanopartiküllerin takviyesiz matris malzemesinin korozyon direncine olan etkisi araştırılmıştır.

Mikroyapı analizleri neticesinde özellikle düşük oranlarda karbon nanopartikül ilavesi magnezyum matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır. Takviye oranının ağırlıkça %0.5'e ulaşması durumunda yapıda topaklanmalar görülmeye başlamıştır. Karbon nanotüp takviyesinde karbon atomları arasında güçlü van der waals bağlarının bulunması homojen bir şekilde karışımı zor hale getirmiştir. Bu da mekanik özellikler hususunda yeterince olumlu bir değişikliğe olanak sağlamamıştır. Diğer yandan grafen ve fullerenin matris içerisinde daha uniform dağıldığı gözlemlenmiştir. Karbon ilavesi matrislerde genellikle sertlik, basma dayanımlarını ve aşınma direncini arttırmış ve en iyi sonuçlar genellikle fulleren takviyeli kompozitlerde elde edilmiştir. Karbon nanotüp, grafen ve fullerenin mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki olumlu etkilerine rağmen korozyon dirençlerini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak magnezyum ve karbon nanopartiküllerinin arasında galvanik etkileşimin önem arz ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Magnezyum, karbon nanotüp, grafen, fulleren, korozyon, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.193

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

FABRICATION OF NANO PARTICLE REINFORCED MAGNESIUM MATRIX COMPOSITES VIA POWDER METALLURGY AND CHARACTERIZATION

Muhammet Emre TURAN

Karabük University

Institute of Science and Technology

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Yavuz SUN

September 2018, 126 pages

In this study, different matrix of magnesium and its alloys were reinforced with different weight fractions (0.1 wt.%, 0.25 wt.% and 0.5 wt.%) of carbon nanotubes, graphene and fullerene were fabricated successfully via powder metallurgy. Solution based technique was established for homogeneously mixture of powders because it can be serious problem such as agglomeration when the powders were mixed mechanical alloying. In this method, matrix and reinforcement were mixed uniformly using magnetic stirrer in the vacuum distillation system. Phase analysis was completed by X-ray diffraction method (XRD) and microstructures of samples were investigated using Scanning Electron Microscope (SEM). Mechanical performances were examined by hardness, compression and wear tests. However, effect of carbonaceous reinforcement on corrosion performances of magnesium matrix composites was evaluated with electrochemical corrosion tests. According to the microstructure

analysis, especially at low rates, the carbon nanoparticle addition was homogeneously dispersed in the magnesium matrix. If the reinforcement ratio reaches 0.5% by weight, agglomeration in the microstructure began to occur. The presence of strong van der Waals bonds between the carbon atoms in the carbon nanotube reinforcement makes the mixture homogeneously difficult. This situation didn't allow enough positive change in mechanical properties. On the other hand, it was observed that graphene and fullerenes were more uniformly distributed in the matrix. In carbon additive matrices, generally hardness, wear resistance and compressive strength were increased, and best results were generally obtained in fullerene reinforced composites. It was observed that carbon nanotubes, graphenes and fullerenes adversely affect the corrosion resistance despite the positive effects on the microstructure and mechanical properties. This could be attributed that galvanic interaction between magnesium and carbon nanoparticles has important effect to determine the corrosion performances.

Key Word : Magnesium, carbon nanotube, graphene, fullerene, corrosion, microstructure and mechanical properties.

Science Code : 915.1.193

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve akademik çalışmalarında ilgi ve desteğini esirgemeyen, sayın hocam Prof. Dr. Yavuz SUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Varlıkları ile bana güç veren ve hiçbir yardımı esirgmeden destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili eşim Tülay YILDIRIM TURAN'a manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda olduğu için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından KBUBAP-17-DR-048 proje numarası ile desteklendiğinden KBU BAP birimine ve aynı zamanda finansal desteklerinden dolayı ÖYP birimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI.....	3
2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ	3
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI.....	7
2.2.1. Otomotiv Uygulamaları.....	7
2.2.2. Uzay ve Havacılık Uygulamaları	8
2.2.3. Tıbbi Uygulamalar	9
2.2.4. Spor Malzemeleri Uygulamaları	10
2.2.5. Elektronik Uygulamaları	11
BÖLÜM 3	13
METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	13
3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	13
3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM	
YÖNTEMLERİ.....	14
3.2.1. Difüzyonla Bağlama.....	14

	<u>Sayfa</u>
3.2.2. Toz Metalurjisi	15
3.2.3. Sıvı-Metal infiltrasyon	16
3.2.4. Püskürtme.....	17
3.2.5. Karıştırılmalı Döküm.....	18
3.2.6. Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)	19
3.2.7. Reaktif (In-situ) Yöntemi	19
3.2.8. Sıkıştırılmalı Döküm	20
 BÖLÜM 4.....	 22
KARBON BAZLI NANO PARTİKÜLLER.....	22
4.1. KARBON NANOTÜPLER	22
4.2. GRAFEN.....	26
4.3. FULLEREN	29
 BÖLÜM 5	 31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
5.1. MATRİS VE TAKVİYE MALZEMELERİ.....	31
5.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ.....	32
5.3. KARAKTERİZASYON İŞLEMLERİ	36
 BÖLÜM 6	 40
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	40
6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	40
6.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI	43
6.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ	46
6.4. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	61
6.4.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Sertlik Davranışına Etkisi	61
6.4.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Sertlik Davranışına Etkisi	64
6.4.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Sertlik Davranışlarına Etkisi.....	66

6.5. BASMA TEST SONUÇLARI	70
6.5.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Basma Mukavemetine Etkisi	70
6.5.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Basma Mukavemetine Etkisi	73
6.5.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Basma Mukavemetine Etkisi	75
6.6. AŞINMA TEST SONUÇLARI	79
6.6.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Aşınma Performansına Etkisi	79
6.6.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Aşınma Performanslarına Etkisi	83
6.6.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Aşınma Performanslarına Etkisi	87
6.6.4. Aşınma Morfolojilerinin İncelenmesi	94
6.7. KOROZYON TEST SONUÇLARI	98
6.7.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Korozyon Performansına Etkisi	98
6.7.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Korozyon Performanslarına Etkisi	102
6.7.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Performanslarına Etkisi	104
BÖLÜM 7	111
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	111
EK AÇIKLAMALAR A	122
ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Magnezyumun sıkı paket hegzagonal kristal yapısı	5
Şekil 2.2. Galvanik korozyon türleri a) harici galvanik korozyon b) iç galvanik korozyon	7
Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı otomobil parçalarına örnekler.....	8
Şekil 2.4. Magnezyum alaşımlarının spor alanlarındaki uygulamalarına örnekler..	11
Şekil 3.1. Toz metalürjisi yönteminin üretim aşamaları	16
Şekil 3.2. İnfiltrasyon üretim yöntemleri a) Basınçlı infiltrasyon yöntemi, b) Basıncsız infiltrasyon yöntemi, c) Vakum infiltrasyon yöntemi	17
Şekil 3.3. Karıştırmalı döküm düzeneği.....	19
Şekil 3.4. Sıkıştırılmalı döküme ait şematik görüntü	21
Şekil 4.1. Karbonun allotropları.....	22
Şekil 4.2. Mg-Al-Sn/GNP kompozitine ait çekme diyagramı	27
Şekil 4.3. Grafen takviyeli Mg-10Ti matrisli kompozite ait çekme test sonuçları ..	28
Şekil 5.1. Karbon nanopartiküllere ait SEM görüntüleri (a) KNT (b) GNP (c) C60 ...	32
Şekil 5.2. Karıştırma amaçlı kullanılan Turbula mikser	33
Şekil 5.3. Kompozitlerin üretim yöntemi.....	34
Şekil 5.4. Sıcak pres cihazı	35
Şekil 5.5. Üretimi yapılan numunelere ait görüntüler.....	35
Şekil 5.6. XRD ve SEM cihazları	36
Şekil 5.7. 600 kN basma test cihazı	37
Şekil 5.8. UTS aşınma test cihazı	38
Şekil 5.9. Korozyon test cihazı	39
Şekil 6.1. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği.....	43
Şekil 6.2. % 0.5 KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği ..	44
Şekil 6.3. %0.5 C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği.....	45
Şekil 6.4. AZ91 matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait XRD grafiği.....	46

Şekil 6.5. Grafen takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Saf Mg, (B) Mg-%0.1 GNP, (C) Mg-%0.25 GNP, (D) Mg-%0.5 GNP.....	47
Şekil 6.6. Çizgi EDX ve haritalama görüntüleri (A-B-E) Saf Mg (C-D-F) Mg-%0.25 GNP	48
Şekil 6.7. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-%0.1 KNT, (B) Mg-%0.25 KNT, (C) Mg-%0.5 KNT	49
Şekil 6.8. Mg-%0.25 KNT kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri..	50
Şekil 6.9. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Saf Mg, (B) Mg-%0.1 C60, (C) Mg-%0.25 C60, (D) Mg-%0.5 C60	51
Şekil 6.10. Mg-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri...	52
Şekil 6.11. Karbon takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-3Al, (B) Mg-3Al- %0.25 KNT, (C) Mg-3Al- %0.25 GNP, (D) Mg-3Al- %0.25 C60.....	53
Şekil 6.12. Mg-3Al-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.....	54
Şekil 6.13. TEM numunesinin FIB tekniğiyle hazırlanması.....	54
Şekil 6.14. TEM ve STEM EDX sonuçları.....	55
Şekil 6.15. STEM Haritalama görüntüleri	56
Şekil 6.16. Karbon takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitlerin SEM görüntüsü (A) Mg-9Al-%0.25 GNP, (B) Mg-9Al-%0.25 KNT, (C) Mg-9Al- %0.25 C60.....	57
Şekil 6.17. Mg-9Al-%0.25 GNP kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.....	57
Şekil 6.18. Karbon takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-1Zn-%0.25 GNP, (B) Mg-1Zn-%0.25 KNT, (C) Mg-1Zn-%0.25 C60	59
Şekil 6.19. AZ31 matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) AZ31, (B) AZ31- %0.25 KNT, (C) AZ31-%0.25 GNP, (D) AZ31- %0.25 C60	59
Şekil 6.20. AZ91 matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) AZ91, (B) AZ91- %0.25 KNT, (C) AZ91- %0.25 GNP, (D) AZ91- %0.25 C60	60
Şekil 6.21. AZ91-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.....	61
Şekil 6.22. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	63

Sayfa

Şekil 6.23. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	63
Şekil 6.24. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	64
Şekil 6.25. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları	65
Şekil 6.26. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları	65
Şekil 6.27. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları	66
Şekil 6.28. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	67
Şekil 6.29. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	67
Şekil 6.30. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	68
Şekil 6.31. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	68
Şekil 6.32. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	69
Şekil 6.33. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	69
Şekil 6.34. Nanopartiküllerin sertlik performansına etkisinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 6.35. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	72
Şekil 6.36. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları	72
Şekil 6.37. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	73
Şekil 6.38. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitlerin basma test sonuçları	74
Şekil 6.39. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitlerin basma test sonuçları	75
Şekil 6.40. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitlerin basma test sonuçları	75
Şekil 6.41. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	76
Şekil 6.42. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	77

Sayfa

Şekil 6.43. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	77
Şekil 6.44. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	78
Şekil 6.45. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	78
Şekil 6.46. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.....	79
Şekil 6.47. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri....	80
Şekil 6.48. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	81
Şekil 6.49. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	81
Şekil 6.50. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	82
Şekil 6.51. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	82
Şekil 6.52. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	83
Şekil 6.53. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	84
Şekil 6.54. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	85
Şekil 6.55. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	85
Şekil 6.56. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	86
Şekil 6.57. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	86
Şekil 6.58. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	87
Şekil 6.59. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.....	88
Şekil 6.60. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	89
Şekil 6.61. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	89
Şekil 6.62. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	90
Şekil 6.63. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.....	90
Şekil 6.64. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	91
Şekil 6.65. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	91

Şekil 6.66. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	92
Şekil 6.67. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri	92
Şekil 6.68. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	93
Şekil 6.69. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.....	93
Şekil 6.70. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri	94
Şekil 6.71. 10 N ve 40 N aşınma yükü altında SEM yüzeylerinin görüntüsü (A-B) Mg, (C-D) Mg-% 0.50 C60.....	96
Şekil 6.72. Mg-%0.5 C60 kompozitinin 40 N aşınma yükü altında EDX analizi	97
Şekil 6.73. 10 N ve 40 N aşınma yükü altında SEM yüzeylerinin görüntüsü (A-B) AZ91-%0.5 KNT, (C-D) AZ91-% 0.5 GNP, (E-F) AZ91-%0.5 C60	97
Şekil 6.74. 40 N aşınma yükü altında EDX analizi (A-B) AZ91-% 0.5 KNT, (C-D) AZ91-%0.5 GNP.....	98
Şekil 6.75. Mg-GNP kompozitlerine ait Tafel eğrisi	101
Şekil 6.76. Mg-C60 kompozitlerine ait Tafel eğrisi	102
Şekil 6.77. Mg-Zn serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi	103
Şekil 6.78. AZ31 serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi	105
Şekil 6.79. AZ91 serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi	105
Şekil 6.80. Korozyona uğramış yüzeylerin optic görüntüsü (a) AZ91, (b) AZ91- 0.5 C60, (c) AZ91- 0.5 GNP, (d) AZ91- 0.5 KNT	107
Şekil 6.81. AZ91 serisine ait daldırma test sonuçları	109
Şekil 6.82. Daldırma sonrası SEM görüntüleri	110
Şekil Ek A.1. Magnezyum serisi daldırma test sonuçları.....	124
Şekil Ek A.2. Mg-3Al serisi daldırma test sonuçları.....	124
Şekil Ek A.3. Mg-9Al serisi daldırma test sonuçları.....	125
Şekil Ek A.4. Mg-1Zn serisi daldırma test sonuçları.....	125
Şekil Ek A.5. AZ31 serisi daldırma test sonuçları.....	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Magnezyumun kimyasal, fiziksel ve elektriksel özellikleri	5
Çizelge 2.2. İnsan kemiği ve bazı implant malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	10
Çizelge 4.1. AZ61-3GNP kompozitinin farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri..	28
Çizelge 5.1. Matris malzemelerinin kimyasal bileşimleri.	31
Çizelge 6.1. Magnezyum matrisli kompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları.....	41
Çizelge 6.2. Magnezyum matrisli kompozitlere ait korozyon sonuçları	99
Çizelge 6.3. Mg-Al ve Mg-Zn serisine ait korozyon sonuçları	103
Çizelge 6.4. AZ serisi numunelere ait korozyon sonuçları.....	106
Çizelge 6.5. Korozyona uğramış ve uğramamış bölgelerin analizi.	107

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mg : magnezyum

Al : alüminyum

Ar : argon

C : karbon

Zn : çinko

E_{kor} : korozyon potansiyeli

i_{kor} : korozyon akım yoğunluğu

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

KNT : Karbon Nanotüp

GNP : Grafen Nanopartikül

C60 : Fulleren

EN : European Norm (Avrupa Normu)

MMK : Metal Matris Kompozit

XRD : X-ray Diffraction (X ışını kırınım diffraksiyonu)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)

TEM : Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskopu)

FIB : Focussed Ion Beam (Odaklamalı İyon Demeti)

HV : Hardness Vickers (Vickers Sertlik)

TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çevrenin korunması ve enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanılması için başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok ticari firma yakıt tüketiminde zorunlu kısıtlamalara gitmekte ve bu amaç doğrultusunda tüm dünya da birçok Araştırma Geliştirme (AR-GE) çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle otomotiv sektörü göz önünde bulundurulacak olursa; araç lastiklerinde sürtünmenin azaltılması, ağırlıkta azalma, motor ve transmisyon verimliliğinin artırılması, araç ön alanının küçültülmesi gibi yaklaşımlarla çalışılmaktadır. Örneğin bunlardan en önemlisi olan araç ağırlığında yaklaşık 100 kg'lık bir azalma ile 100 km'de 0,5 litre bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır.

Düşük yoğunluğa sahip malzemeler özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe önemli bir talep haline gelmiştir. Son yıllarda magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde bu ihtiyacı karşılama hususunda tercih edilmeye başlamıştır. Çeliğin dörtte biri ve alüminyumun üçte ikisi oranında yoğunluğa sahip olan magnezyumu popüler malzeme haline getirmiştir. Öte yandan, magnezyumun mukavemet, rijitlik, aşınma ve korozyon özellikleri zayıf olduğu için pratik uygulamalarda kullanılabilmesi yönünde geliştirilmesi gerekmektedir. Bu zayıf özellikleri alaşımlama yoluyla veya takviye malzemeleriyle kompozit şeklinde ciddi oranda geliştirilebilmektedir. Son 20 yıllık çerçevede baktığımızda araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri, mikron boyuttaki silisyum karbür (SiC), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Titanyum karbür (TiC), B_4C (bor karbür) gibi malzemelerdir. Bu malzemelerin yüksek oranlarda verimli bir şekilde kullanımlarına rağmen çok üst düzey bir iyileşme göstermemesi araştırmacıları nano boyuttaki takviyelere yöneltmiştir.

Partiküller mikro boyuttan nano boyuta düşürüldüğünde, termal, optik, elektriksel ve mekanik özellikleri farklılık göstermektedir. Yüksek yüzey alanına sahip nanopartikül takviyeli kompozitler özellikle son 5 yıl içerisinde geniş bir teknoloji ağına ulaşmıştır. Bu nanopartiküller arasında en ilgi çekici olanları ise karbon bazlı nanopartiküllerdir. Benzersiz mekanik ve elektriksel özelliklere sahip bu karbon nanopartikülleri arasında en çok tercih edilen sıfır boyutlu 60 karbonlu yapıdan oluşan fulleren, bir boyutlu tüp şeklindeki karbon nanotüp ve iki boyutlu yeni nesil malzeme olarak gösterilen grafenlerdir. Literatür incelemeleri neticesinde çok düşük oranlarda metal matrisli kompozitlere ilave edilmesi neticesinde ciddi bir gelişime olanak sağlaması bu ürünleri sıra dışı bir malzeme haline getirmiştir.

Bu çalışmanın amacı, magnezyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini çok düşük oranlarda nanopartiküllere geliştirerek otomotiv ve havacılık sektörü gibi endüstriyel uygulamalarda kullanımının önünü açmak ve aynı zamanda ilave edilen karbon nanopartiküllerinin oranlarının ve çeşitlerinin matris malzemelerine olan etkisini incelenmesidir. Ayrıca geliştirilen yöntemle takviyenin homojen olarak dağıldığı nanokompozitlerin başarılı bir şekilde üretilmesi bu çalışma neticesinde hedeflenmiştir.

Hazırlanan bu çalışma, genel itibarıyla literatür taraması, deneysel çalışmalar ve deneysel sonuçlar olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Literatür taramasında magnezyum ve alaşımları, karbon nanopartiküller ve kompozit malzemelerle ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca, karbon nanotüp ve grafenin magnezyum matrisli kompozitler üzerindeki uygulamalarıyla alakalı yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde yapılan testler ve bu testlerin gerçekleştirildiği cihazlarla alakalı bilgiler yer almaktadır. Bu bölümde üretilen kompozitlerin hangi şartlarda ve parametrelerde yapıldığına dair bilgiler de mevcuttur.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı son bölümde ise karbon nanopartiküllerin oranlarının ve çeşitlerinin (karbon nanotüp, grafen ve fulleren) magnezyum matrisli kompozitlerin mikroyapı, sertlik, aşınma, basma ve korozyon özellikleri üzerinde nasıl etki yaptığı incelenmiş ve literatürdeki bulgularla kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

Magnezyum, yapısal alaşımların temeli olarak kullanılan tüm metallerin en hafifidir. Otomobil üreticilerini daha yoğun malzemeleri, sadece çelikleri, dökme demirleri ve bakır bazlı alaşımları değil, alüminyum alaşımlarını da magnezyum bazlı alaşımlarla değiştirmeye ikna eden bu özellik. Emisyonu sınırlayan mevzuatın getirilmesinin bir sonucu olarak araba bileşenlerinin ağırlığını azaltma gerekliliği, magnezyumda yeniden ilgi uyandırdı. Önümüzdeki 10 yıldaki büyüme oranının yılda% 7 olacağı tahmin edilmektedir. Magnezyum bazlı alaşımların daha geniş kullanımı birkaç paralel program gerektirir. Bunlar alaşım geliştirme, süreç geliştirme / iyileştirme ve tasarım konuları olarak sınıflandırılabilir. Bunlar kısaca tartışılacak ve ardından magnezyum ve gelecekteki eğilimlerin artan kullanımlarına ilişkin bazı örnekler takip edilecektir.

2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum periyodik cetvelin IIA grubunda yer alan, dünya yüzeyinde en çok bulunan sekizinci elementtir. Ayrıca alüminyum ve demirden sonra yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü metaldir.

Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının avantajları aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Tüm metalik yapıların en düşük yoğunluğu malzemeler;
- Yüksek özgül mukavemet;
- İyi basınç, yüksek basınç için uygun;

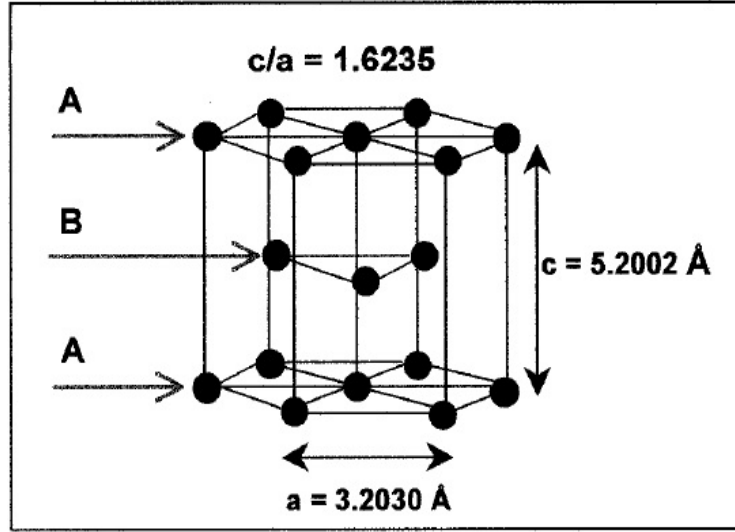
- Yüksek hızda döndürülebilir / öğütülebilir;
- Atmosfer kontrollü ortamda iyi kaynak edilebilirlik;
- Magnezyumun yüksek saflıkta kullanılmasıyla geliştirilen korozyon direnci;
- Polimer esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında:
 - ✓ Daha üstün mekanik özellikler;
 - ✓ Yaşlanmaya dirençli;
 - ✓ Daha iyi elektriksel ve termal iletkenlik;
 - ✓ Geri dönüştürülebilir [1] .

Magnezyumun sınırlı kullanımının nedeni ise ticari uygulamalardaki dezavantajlarıdır. Magnezyum ve alaşımlarının dezavantajı olarak;

- Düşük elastik modül;
- Limitli soğuk işlenebilirlik ve tokluk değeri;
- Yükseltilmiş sıcaklıklarda limitli mukavemet ve sürünme dayanımı;
- Kolay kimyasal tepkimeye girebilme

gibi eksiklikler gösterilebilmektedir. Magnezyum, sıkı paket hegzagonal (SPH) kristal yapıya sahiptir ve bu nedenle soğuk şekillendirmeye elverişli değildir. 225 °C'nin altındaki şekillendirme işlemlerinde sadece tek kayma düzleminin olması nedeniyle kırılgan bir özelliğe sahiptir [2].

Birçok magnezyum alaşımı çok iyi işlenebilirlik ve dökülebilme özelliğine sahiptir. Döküm, dövme ve enjeksiyon gibi yöntemler ile üretilen malzemeler, asal gaz ortamlarında kolaylıkla işlenebilir ve kaynak edilebilirler. Magnezyum alaşımlarının diğer önemli özelliği ise, ses ve titreşimi absorbe edebilmesidir. Bu özelliği ile magnezyum kullanıldığı makinaların ve makina parçalarının ömrü artmaktadır. Saf magnezyumun dökme demire göre çok daha yüksek titreşim sönümleyici özelliği vardır [1].



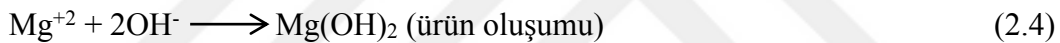
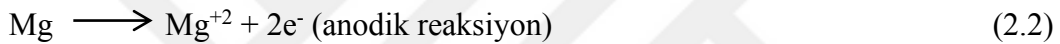
Şekil 2.1. Magnezyumun sıkı paket hegzagonal kristal yapısı [2,3].

Çizelge 2.1. Magnezyumun kimyasal, fiziksel ve elektriksel özellikleri [3].

Özellikler	Değer	Birim	Açıklama
Element Simgesi	Mg		
Element Sınıfı	Toprak Alkali Metal		
Atom Numarası	12		
Kristal yapı	Sıkı Paket Hegzegonal $a=0,32092$ $b=0,52105$	nm nm	20 °C
Atom Ağırlığı	24.3050(6)		
Katı Haldeki Yoğunluğu	1,738 1.650	g/cm^3 g/cm^3	20 °C 650 °C
Elastikiyet Modülü	45	GPa	
0,2% Akma Mukavemeti	21	MPa	
Çekme Mukavemeti	80-180	MPa	
Kopmaya Kadarki Uzama	1-12	%	
Sertlik	30-47	HB	
Poisson Oranı	0,35		
Elektriksel Direnç	45,3 37,8	$\text{n}\Omega\text{m}$ $\text{n}\Omega\text{m}$	a ekseni c ekseni
Ergime Noktası	650 ± 1	°C	
Isısal İletkenlik (Katı Halde)	156 149 130	W/m.K W/m.K W/m.K	27 °C 327 °C 650 °C
Isısal İletkenlik (Sıvı Halde)	78	W/m.K	650 °C

Magnezyum alaşımlarının zayıf korozyon özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda kullanımları sınırlı kalmıştır. Magnezyum alaşımı belirli metalik safsızlıklar içerdiğinde veya $Cl \pm$ iyonları gibi agresif elektrolit türlerine maruz kaldığında korozyon direnci çok daha zayıf hale gelmektedir.

Sulu ortamlarda magnezyumun korozyonu genellikle magnezyum hidroksit ve hidrojen gazı üretmek için suyla elektrokimyasal bir reaksiyonla ilerlemektedir. Oksijenin varlığı her ne kadar atmosferik korozyon için en önemli faktör olsa da magnezyum korozyonu açısından oksijen konsantrasyonu çokta etkin olmamaktadır. Sulu ortamlardaki korozyon saldırısı genellikle katodik ve anodik alanlar arasında mikro-galvanik birleşme ile gerçekleşmektedir. Genel korozyon reaksiyonu:

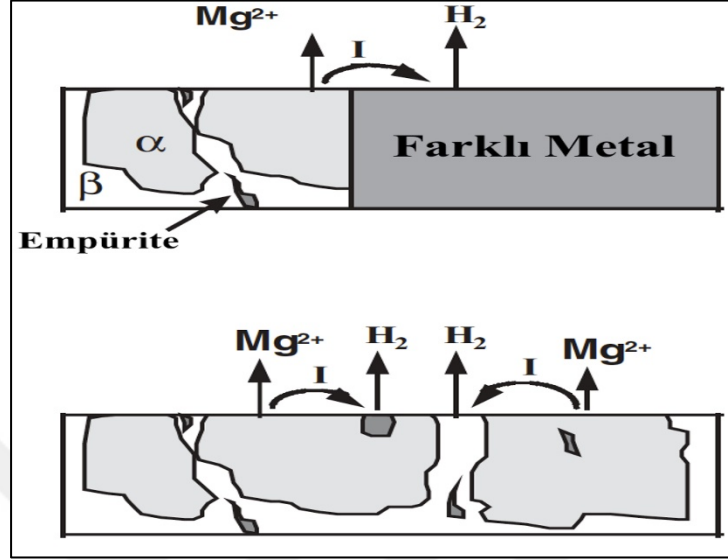


Anodik reaksiyon (Denklem 2.2), genellikle kısa ömürlü magnezyum iyonu (Mg^+) üretebilen ara basamakları içermektedir. Hidrojen iyonlarının indirgenme süreci ve katodik fazın hidrojen gerilimi magnezyumun korozyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Düşük gerilim katotları, hidrojen gelişimini kolaylaştırır ve önemli bir korozyon hızına neden olmaktadır.

Magnezyum alaşımları galvanik korozyona oldukça duyarlıdır. Galvanik korozyon genellikle katoda bitişik magnezyumun ağır lokalize korozyonu olarak gözlemlenir. Katotlar, magnezyum ile temas halinde olan diğer metaller gibi hem harici hem de ikinci veya safsızlık fazlarını kapsayacak şekilde içsel de olabilmektedir. Bu da Şekil 2.2’de gösterildiği gibi magnezyum ve alaşımlarında dış ve iç galvanik korozyon olarak adlandırılmaktadır.

Ni, Fe ve Cu gibi düşük hidrojen gerilimine sahip metaller, magnezyum için etkili katotlar oluşturur ve şiddetli galvanik korozyona neden olur. Aktif bir korozyon

potansiyeline sahip Al, Zn, Cd ve Sn gibi yüksek hidrojen potansiyelli metaller ise korozyon açısından çok daha az zararlıdır.



Şekil 2.2. Galvanik korozyon türleri a) harici galvanik korozyon b) iç galvanik korozyon

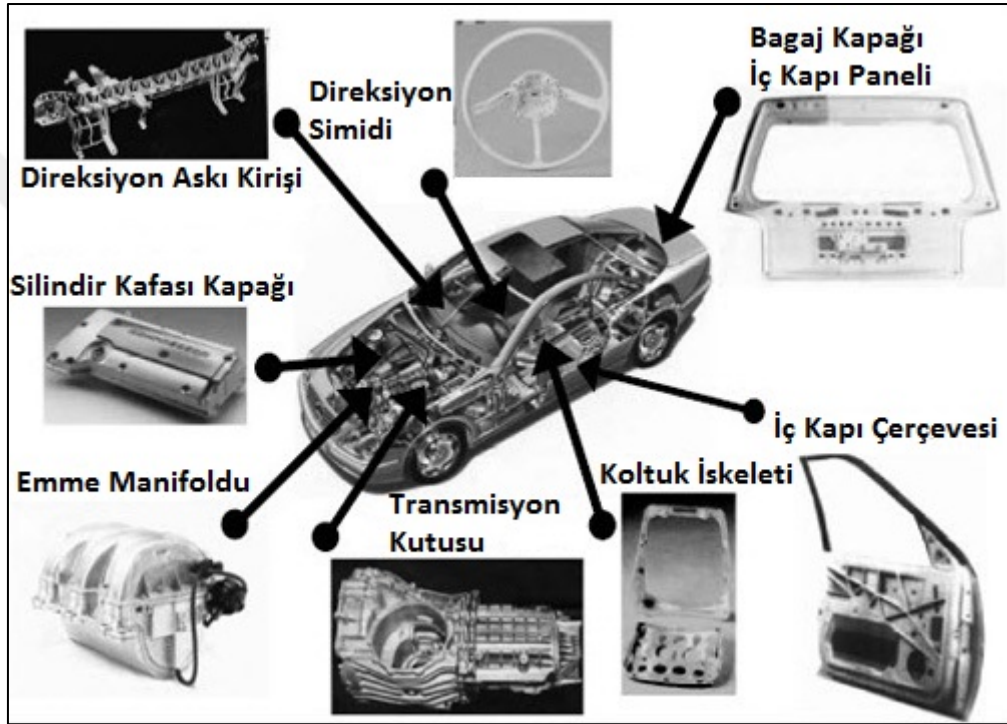
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI

2.2.1. Otomotiv Uygulamaları

Otomotiv alanında yapılan çalışmalarda, taşıtlarda enerji tüketiminde azaltmaya gidilmesi ve hava kirliliğinin önüne geçilmesi gibi çalışmalar önemli hale gelmektedir. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin hafif ve aynı zamanda mukavemetli malzemeler kullanması zorunludur. Bu kapsamda otomotiv üretiminde hafif malzemeler kullanılarak ağırlık azalması amaçlanmaktadır. Çevreyi ve havayı kirletmemenin en aktif yolu araçlarda karbon monoksit emisyonunun azaltılmasıdır. Otomobil üretiminde ağırlığı azaltmak için beş ana sistem üzerinde çalışma yapılabilmektedir. Bunlar; 1- otomobil gövdesi, 2- motor aksanları, 3- elektrik ve elektronik aparatları, 4- transmisyon, 5- süspansiyon ve tekerleklerdir. Otomotiv endüstrisinde magnezyum kullanımı Volkswagen fabrikalarında başlamaktadır. 1980'lerin başlarına kadar 19 milyondan fazla Beetle' da yaklaşık 480 bin ton magnezyum kullanılmıştır. Beetle'larda sadece transmisyon gövdesi ve karterlerde kullanılan magnezyum parçalar 17 kg gelmektedir. Aynı parçaların dökme demirden

yapılması durumuna göre 50 kg'lık bir ağırlık avantajı sağlanmıştır. Bir başka örnek ise otomobillerde kullanılan ön panelin çelik ve plastik ile üretiminde yaklaşık 60 parça gelmekte ve 25-30 kg.'dır. Magnezyumla üretildiği takdirde ise tek bir parça halinde ve yalnızca 10 kg olacaktır.

Şekil 2.3'de magnezyum alaşımlarından üretilen bazı otomobil parçaları örnekler verilmiştir.



Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı otomobil parçalarına örnekler [4].

2.2.2. Uzay ve Havacılık Uygulamaları

Uzay ve havacılık endüstrisinde zararlı gaz salınımının azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlanabilmesi için araçların ağırlıklarının azaltılması, en önemli konulardan biridir. Bir uzay aracının toplam ağırlığının azaltılması yakıt tasarrufu sağlamakla birlikte toplam operasyon maliyetini de azaltmaktadır. Metal elyafli laminatlar ve düşük yoğunlukğa sahip polimerler gibi alternatif malzemelerin geliştirilmesi devam etmektedir. Fakat metal elyafli laminatların yüksek maliyeti bu konuda bir sorun teşkil etmektedir. Bunlara ek olarak düşük yoğunluğa sahip polimerlerin sergiledikleri düşük

darbe direnci ve hasar toleransları da uygulamalar açısından bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca bu malzemeler yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında düşük mekanik özellikler göstermektedirler. Sonuç olarak bütün bu kısıtlamalar magnezyum alaşımlarının alternatif olmasına neden olmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılması çok eskilere dayanmaktadır. Geçmiş yıllarda magnezyum alaşımları sivil ve askeri uçaklarda yoğun olarak kullanılmıştır. Bunlara örnek olarak itici güç ters çeviricisi (Boeing 737, 747, 757, 767 modellerinde), vites kutusu (Rolls-Royce), motorlar ve helikopterlerin iletim kovanları, Eurofighter Typhoon, Tornado ve F16 gibi askeri uçakların iletim kovanları verilebilir. Uzay araçlarında ve roketlerde kalkış anındaki ağırlığın azaltılabilmesi için hafif malzeme kullanılmasının gerekliliğinden dolayı magnezyum alaşımları tercih edilmektedir. Bunun nedeni, magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yüksek sıcaklığa, ozona, yüksek enerjili parçacık bombardımanına ve küçük göktaşlarına karşı dayanıklı olması gibi etkileyici özellikleri ile de desteklenebilmesidir. Titan, Agena ve Atlas gibi kıtalararası balistik füzelerde, yüksek miktarlarda magnezyum (saç halde) kullanılmıştır.

2.2.3. Tıbbi Uygulamalar

Magnezyum ortopedik biomalzeme olarak ilk kez 20. yüzyılın ilk yarısında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak magnezyumun sahip olduğu düşük korozyon direnci sebebiyle hastaya nakledilen implantın etrafında hidrojen birikmesi olduğu tespit edilmiştir. Bu olay, magnezyumun yaygın bir şekilde biomalzeme olarak kullanılabilmesini sınırlandırmaktadır. Bütün bunlara rağmen, magnezyum sahip olduğu etkileyici özellikler sebebiyle, sağlık endüstrisinde taşıyıcı implant uygulamalarında hala potansiyel bir adaydır.

Magnezyum implant uygulamalarında kullanılan diğer malzemelere göre çok daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bununla birlikte Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi elastik modülü ve basma mukavemeti, diğer metalik implant malzemelere göre insan kemiğinin sahip olduğu değerlere daha yakındır [5].

Çizelge 2.2. İnsan kemiği ve bazı implant malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	Basma Mukavemeti (MPa)
İnsan Kemiği	1,8-2,1	3-6	130-180
Ti Alaşımları	4,4-4,5	55-115	758-1117
Paslanmaz Çelik	7,9-8,1	50-200	170-310
Magnezyum	1,74-2,0	15-40	65-100
Hidroksiapatit	3,1	0,7	600

Magnezyum insan vücudunda iyon halinde bulunmaktadır. 70 kg ağırlığa sahip bir insanda yaklaşık 1 mol magnezyumun depolanabilmektedir. Ayrıca insan sağlığı açısından toksik olmayıp insan vücudunda meydana gelen birçok metabolik olaya yardımcı olmaktadır. Bütün bu bahsi geçen özellikler magnezyum esaslı malzemelerin implant olarak kullanılabilmesi için ümit vermektedir [6–8].

Magnezyum esaslı malzemelerin ortopedik uygulamalarda kullanımını sınırlandıran bu korozyon dayanımlarının artırılabilmesi için, son yıllarda farklı alaşım elementleri ilave ederek yeni alaşımlar geliştirilmesine (malzemenin yüzeyine koruyucu kaplama yapılarak) çalışılmaktadır [5].

2.2.4 Spor Malzemeleri Uygulamaları

Spor malzemeleri endüstrisinde en önemli meselelerden birisi spor tutkunlarının sürekli artan beklentilerinin üretilmekte olan spor malzemeleri ile karşılanabilmesidir. Magnezyum alaşımlarının ve magnezyum bazlı kompozitlerin karmaşık şekillerde üretilbilme bu alandaki üretimi arttırmaktadır. Magnezyum alaşımları okçuluk, tenis, golf, vb. branşlarda kullanılabilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Magnezyum alaşımlarının spor alanlarındaki uygulamalarına örnekler [9].

Magnezyum alaşımları hafif olması ve mükemmel sönümleme kabiliyeti nedeniyle, bisiklet iskeleti ve paten şasisi olarak kullanılabilecek popüler bir tercih olmuştur (Şekil 2.4). Magnezyum alaşımlarından ya da magnezyum kompozitlerden üretilen bisiklet iskeletinin şok ve titreşimi emme özelliği vardır [1]. Dolayısıyla biniciye daha az enerji sarf ederek daha rahat bir sürüş keyfi sağlar.

2.2.5. Elektronik Uygulamaları

Magnezyum alaşımları iyi ısı dağıtımı ve iyi ısı iletimi özellikleri nedeniyle soğutucular ve sabit sürücü okuyucu kollarının üretiminde kullanılmaktadır. Magnezyumun hafifliği ve özgül mukavemeti gibi üstün özellikleri göz önünde bulundurulacak olursa, magnezyum esaslı kompozit malzemeler enerji verimliliği ve yakıt tasarrufu açısından otomotiv ve havacılık sektöründe ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Böyle mükemmel özelliklerinin yanında, magnezyum alaşımlarının kullanımında bazı sınırlılıklar da vardır. Magnezyumun yanmaya karşı yüksek reaktif özelliğinin yanında, düşük korozyon direnci bunlardan bazılarıdır [10]. Ayrıca

belirtildiği gibi HCP yapısından dolayı düşük sünekliliğe sahiptir. Araştırmacılar bu sorunun üstesinden gelmek ve bu eksikleri kapatmak için özel takviye elemanlarıyla magnezyumu geliştirebilme yoluna gitmiştir. Yaygın olarak SiC, B₄C, Y₂O₃, Al₂O₃ gibi takviyeleri kullanmış ve neticesinde magnezyum ve alaşımlarında bu takviye elemanlarının etkisiyle sertlikte ve modülüste bir artış gözlemlemişler fakat sünekliliğin daha da azaldığı ya da çok etkilenmediği sonuçlarına varmışlardır [11–16]. Bu mikro boyuttaki tozların yerine nanoboyuttaki takviyeler kullanılırsa, nanoboyuttaki malzemelerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı/hacim oranından ötürü mükemmel mekanik özellikler sergileyebileceği gözlemlenmiştir. Nanopartiküller arasında, araştırmacılar tarafından en fazla rağbet göreni karbon bazlı yapılarıdır [17–19].

BÖLÜM 3

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Kompozit malzemeler; metal, plastik ve seramik gruplarından ayrı iki ya da daha fazla malzemenin istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere bir araya getirilmesi ile kimyasal bağ oluşturmaksızın imal edilen malzeme türüdür. Amaç, malzemelerin uygun olan ve ihtiyaç duyulan özelliklerini tek bir materyalde toplamak veya yeni bir özellik kazandırmaktır. Bu sebeple kompozit malzemeler, makro düzeyde birleştirilme ile oluşturulur. Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya gelmesiyle elde edilen yeni ürünlerdir. Bahsi geçen istenilen özellikler; rijitlik, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık performansları, elektriksel iletkenliği, ağırlığı, çekme dayanımı, aşınma direnci, yorulma davranışı, korozyona direnci, termal iletkenlik vb.dir [20].

Metal matrisli kompozit malzemeler tek bileşenli sistemlerle ulaşılamayan özellikleri sağlamak üzere, bir metal matris içinde fiber halinde, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içermektedirler [21]. Metal matrisli kompozit malzemeler üç gruba ayrılmaktadır.

- Partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler,
- Yüksek mukavemete sahip uzun veya kısa fiber takviye metal matrisli kompozit malzemeler,
- Sürekli fiber esaslı metal matrisli kompozit malzemeler.

MMK 'ler önemli rijitlik gerektiren uygulamalarda verdikleri iyi sonuçlar sebebiyle uzun yıllardır özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Özellikle hafiflikleri nedeniyle bu malzemelere olan ilgi son yıllarda iyice artmıştır. Genel olarak baktığımız zaman metal matrisli kompozit malzemelerin, metallere göre üstün olduğu görülmektedir. Göze çarpan ve tercih sebebi olan özellikler şunlardır; yüksek dayanım ve sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık performansı, yüksek termal ve mekanik yorulma direnci, daha iyi aşınma direnci ve yüksek sürünme direnci. Fakat yeni gelişmekte olan bir teknoloji nedeniyle başta üreticilerin tecrübe eksikliği olmak üzere birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Bunun yanında maliyet ve üretim zorluğu da kompozit malzemelerin, metallere göre eksik yanlarındandır.

3.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

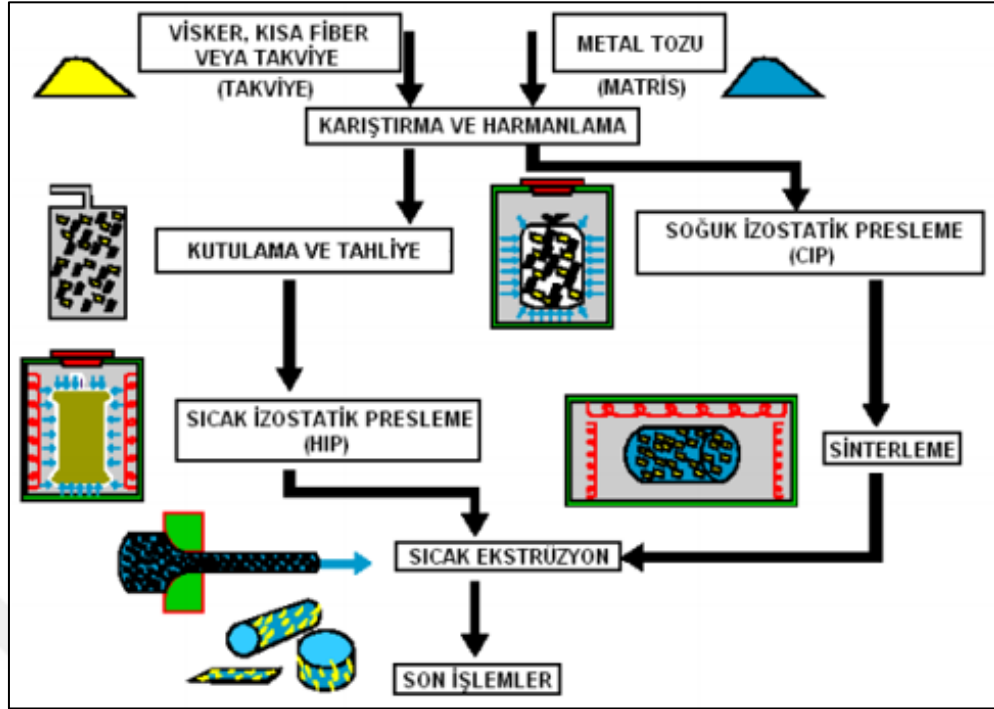
Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinde farklı yöntemlerin geliştirilmesinin sebebi farklı matris ve takviye elemanlarının kullanılıyor olmasıdır. Üretim sırasında matrisin farklı fiziksel fazlarda (katı, sıvı, buhar) olmasına göre MMK 'lerin üretim yöntemlerini aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz.

3.2.1. Difüzyonla Bağlama

Bu yöntem fiber takviyeli mmk 'ları üretmek için kullanılmaktadır. Difüzyonla birleştirme tekniğinde, levhamsı veya yaprak şeklindeki matris materyaller ile levha veya uzun fiber halindeki takviye malzemeleri daha önceden belirlenen yönlerde, açılarda ve istenilen aralıklarda bir araya getirilerek ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta presleme işlemi uygulanarak difüzyon bağlanmaları sağlanmaktadır. Bağlanmanın daha iyi olması açısından fiberler bazen plazma sprey veya iyon kaplama yöntemleri ile kaplanmaktadır. İşlem sırasında uygulanan basınç, sıcaklık ve bekleme süresi kompozit sistemine göre farklılık göstermektedir. Matris ve takviye malzemelerinin bir araya gelecek yüzeylerinin pürüzsüz ve temiz olması difüzyonla birleşme de etkin bir rol oynar. Yöntemin en büyük dezavantajı mmk 'ların üretiminde kullanılan en pahalı yöntem olmasıdır. Ayrıca karmaşık şekilli parçaların üretilmesi de bu yöntemle çok zordur [22,23].

3.2.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi süreksiz takviyeli MMK 'ların üretiminde kullanılan en yaygın kompozit malzeme üretim tekniğidir (Şekil 3.1). Toz şeklindeki matriks ve güçlendirici partiküller mekanik alaşımlandırılır ve istenilen şekildeki kalıplara dökülerek nihai ürün elde edilir. Bu yöntemle toz halindeki matris ve takviye malzemeleri mekanik olarak karıştırılır ve istenilen formu oluşturmak için uygun kalıba aktarılır. Daha sonra tozların sıkışması için pres işlemi uygulanır. Tozların birleşmesini kolaylaştırmak amacıyla, preslenmiş tozlara ergime sıcaklığını geçmeyecek şekilde ve katı-faz difüzyonunun gerçekleşmesi için yeterli sıcaklıkta sinterleme işlemi uygulanır. Diğer bir durum ise doğrudan sıcak pres uygulanmasıdır. Preslemeden sonra sinterleme yapılarak parçanın daha dayanıklı hale gelmesi sağlanır. Son şekil verme için sinterleme sonrasında ekstrüzyon veya haddeleme gibi ikincil işlemler yapılabilir. Ergitme ve döküm gibi maliyet gerektiren işlemler olmadığından diğer üretim yöntemlerine göre daha ucuz bir yöntemdir. Yöntemin uygulanışı şematik olarak aşağıda verilmiştir [22,24]. Toz metalurjisi yönteminin en büyük avantajı, geleneksel döküm yöntemlerine göre üretiminin daha kolay olmasıdır. Ayrıca takviye fazı ile matris alaşımının etkileşerek bozunması bu yöntemde en aza indirgenmektedir. Düşük işlem sıcaklığı sebebiyle arayüzey reaksiyonlarının en aza indirgenerek mekanik özelliklerin artırılması bu yöntemin diğer avantajlarından. Yöntemin uygulanışı şematik olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Yöntemin dezavantajları ise toz karıştırma işleminin uzun sürmesi, pahalı ve tehlikeli olmasıdır. Ayrıca kompozit özelliklerinin olumsuz etkilenmemesi için tozların çok temiz olması, takviye fazının homojen dağılması gerekmektedir [23].



Şekil 3.1. Toz metalürjisi yönteminin üretim aşamaları [25].

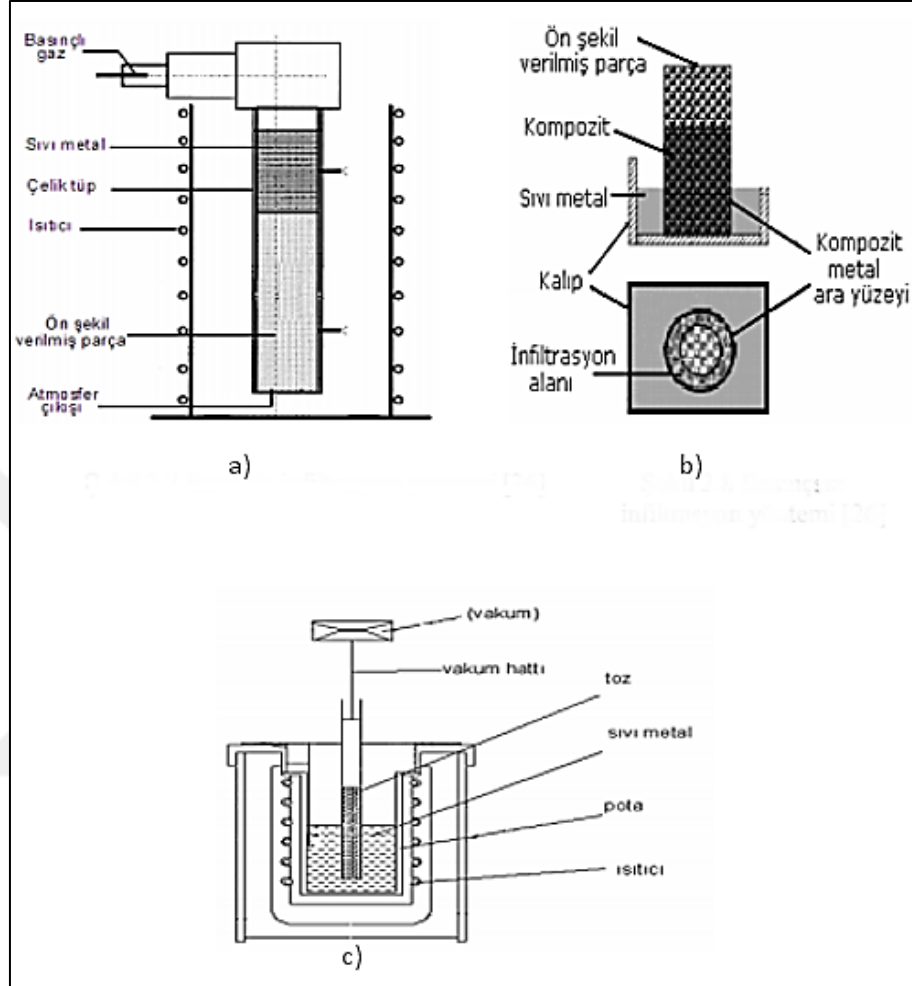
3.2.3. Sıvı-Metal infiltrasyon

Yöntemde, preform (ön şekil verilmiş) denilen düzenli biçimde dizilmiş kısa fiberlerin arasındaki boşluklara sıvı metalin basınçlı veya basınçsız biçimde enjekte edilmesi esastır. Preform genelde döküm sonrası nihai parçanın şeklini alacak şekilde tasarlanır. Preformlar sıvı süspansiyondan kısa fiberlerin çökmesi ile üretilir. Şekillerini bozmamak için bağlayıcı kullanılır. Katılaşma sırasında poroz yapıların çekirdekleşme bölgeleri olarak davranış sergilemekte ve ince tanelerin meydana gelmesine olanak sağlamaktadır [23,24].

İnfiltrasyon işlemi atmosfer kontrollü olarak, vakum altında veya inert gaz ortamlarında yapılabilir. En çok tercih edileni vakumdur. Çünkü vakum altında fiberlerin yüzey aktiviteleri daha iyi olduğundan ıslanabilirlik daha fazladır.

Vakum infiltrasyon yönteminde sıvı matris belirli bir basınçla preform içerisine infiltrate edilmektedir. Yöntem kolay ve ekonomiktir. Ancak Alüminyum alaşımlarında matrisin yüzeyinde oksitlenme tabakasının meydana gelmesi, takviye elemanının ıslanabilirliğini zorlaştırdığından infiltrasyon prosesini negatif yönde etkilemektedir.

Bu durum sıvı matrise, ıslanabilirliği artırıcı partiküllerin ilavesiyle aşılmaktadır. Şekil 3.2’te değişik infiltrasyon şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.2. İnfiltrasyon üretim yöntemleri a) Basıncılı infiltrasyon yöntemi, b) Basıncısız infiltrasyon yöntemi, c) Vakum infiltrasyon yöntemi [24].

3.2.4. Püskürtme

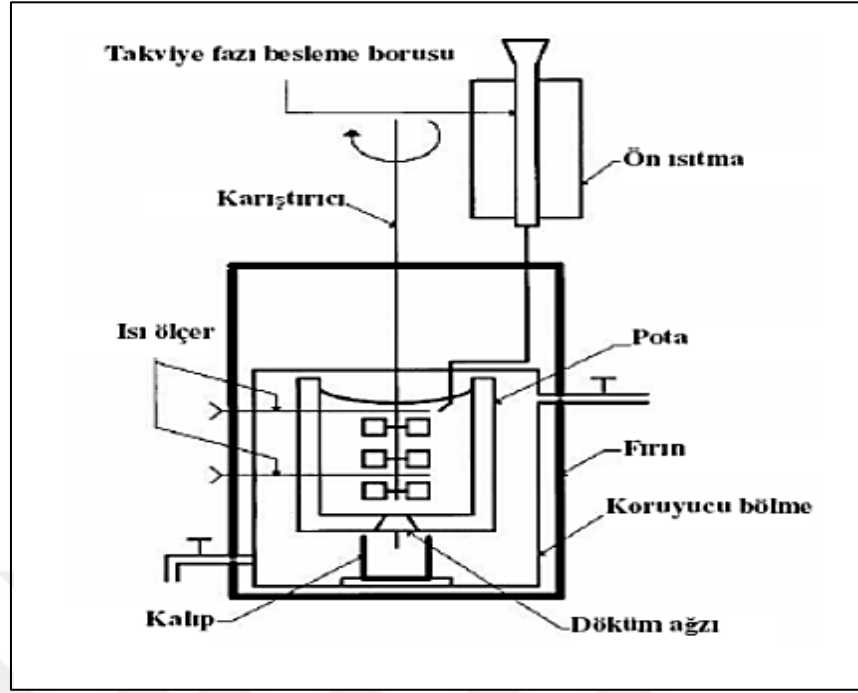
Atomize edilmiş ergimiş metal parçalarının takviye elemanları üzerine belirlenen kalınlıkta püskürtülmesi prosesidir. Püskürtülen ergiyik metal, takviye malzemelerine yapışarak çok çabuk katılaşmaktadır. Bu üretim biçimi ergime sıcaklığı düşük metallerle göre yapılabilen bir yöntemdir. Yöntemin avantajlı yönü takviye ile ergiyik arasındaki temas süresi çok kısa olduğundan reaksiyon oluşumu en aza indirgenmektedir. Ayrıca hızlı soğumadan dolayı ince bir yapı meydana gelmektedir.

Püskürtme yöntemi, osprey ve plazma çöktürmesi şeklinde iki grupta incelenebilir. Osprey prosesi, sıvı metalin tek aşamada, yoğun, ince tane yapısına sahip ve homojen bir ürüne dönüştürüldüğü bir tekniktir. Alaşım indüksiyon ocağında argon gazı altında ergitilir ve yüksek hızlı nitrojen gazıyla atomize edilir. Yöntemin avantajı, atomizasyon ile birleştirme arasındaki birçok ara kademeyi kaldırarak üretim maliyetlerini düşürmesidir [25].

3.2.5. Karıştırmalı Döküm

Toz metalurjisi, püskürtme, difüzyonla bağlama ve sıkıştırırmalı döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında MMK 'ların üretiminde kullanılan en ekonomik yöntemdir. Bu yöntemin diğer bir adı da Vorteks yöntemidir. Yöntemde takviye elemanları sıvı metal içerisine ilave edilerek karıştırma işlemi gerçekleşir. Uniform bir dağılım elde edildikten sonra kalıplara dökülerek katılaşmanın gerçekleşmesi beklenir. Karıştırmalı dökümün başarılı olabilmesi için ıslanabilirliğin iyi olması gerekmektedir. Viskozitenin artması nedeniyle ergiyik içerisine partikül veya fiberlerin ilave edilmesi zorlaşabilir. Bu da homojen bir yapının elde edilmesini zorlaştırır. Bu yöntemde, matriks ve takviye fazı uzun bir süre etkileşimde kaldığından arayüzey reaksiyonları daha da önem kazanmaktadır. Arayüzey mukavemetinin iyi olmaması, homojen bir dağılımın sağlanamaması kompozitler açısından önemli olan mekanik özellikleri olumsuz etkiler. Bu yüzden ekstrüzyon veya haddeleme gibi son bir işlemde geçirilerek kullanılmalıdır.

Yöntem uygulanırken iyi bir ürün elde etmek için birçok parametreyi doğru olarak kontrol altında tutmak gerekir. Bunlar karıştırıcının hızı, pozisyonu, boyutu ve bekletme sıcaklığıdır. Karıştırmalı döküm yöntemine ait düzenek Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Karıştırılmalı döküm düzeneği.

3.2.6. Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)

PVD yöntemleri göreceli olarak yavaştır. Bunlar arasında en hızlısı buharlaştırma metodudur. Monofilaman takviyeli titanyum kompozitlerin üretiminde kullanılan bu yöntemde, fiber çökeltilecek metalin yüksek buhar basıncında olan bir bölgeden geçirilir ve bu esnada yoğunlaşma ile kalın bir kaplama üretilir. Yüksek güçte (~10kW) bir elektron demeti ile buhar elde edilir. Yöntemin başlıca avantajı düşük işlem sıcaklığıdır. Dezavantajı ise maliyetinin yüksek olmasıdır [23].

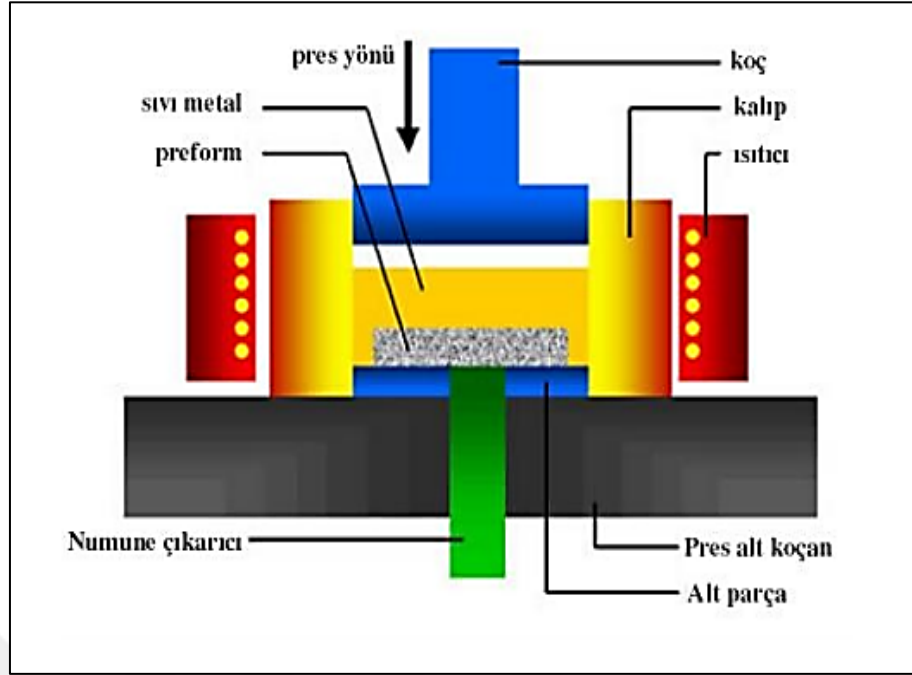
3.2.7. Reaktif (In-situ) Yöntemi

Takviye elemanın ergiyik metalin içerisinde çekirdeklenmesi neticesine dayanan reaktif üretim yöntemleri, maliyet ve proses açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Reaktif üretim yöntemlerinde, takviye miktarının ve boyutunu kontrol altına alınması mümkün olabilmektedir. Bu durum, kompozit malzemenin özellikle mekanik performanslarının geliştirilmesini sağlamaktadır. Ergiyik içeriği ve kimyası kontrol altında tutularak karbür, nitrür, oksitli ve borürlü bileşikler meydana getirilebilmektedir. Başlangıç fazlarına bağlı olarak reaksiyonlar genellikle gaz-sıvı,

sıvı-katı ve sıvı-sıvı olarak kategorize edilebilir. Düşük ve yüksek sıcaklık alarım sistemlerinde ergiyik faz içinde çekirdeklenerek oluşan takviye fazın bulunması, ana alarım malzemesinin dayanımını ve elastiklik modülünü olumlu yönde etkilemektedir. Diğer bir faydası da, yüksek sıcaklık performansını artırmasıdır [25] . Ti ve B tozlarının karıştırılarak Al-TiB₂ kompozit malzeme üretimi bu yöntemle örnek olarak verilebilir. Sıvı-gaz reaksiyon metodu ile TiC takviyeli alüminyum bazlı kompozit malzemeler üretilmektedir. Örneğin Al-Ti eriyik içerisinde metanol gibi karbon bazlı gaz gönderip yüksek sıcaklıklarda Al-TiCp kompozit malzeme üretilmektedir.

3.2.8. Sıkıştırılmalı Döküm

Sıkıştırma Dökümün temel işlevini, sıvı metalin belirlenen sıcaklıkta kalıba konması ve üst kalıbın indirilerek veya pistonun yukarı çıkartılmasıyla metalin katılaşmasının gerçekleştiği anda basınç uygulaması oluşturmaktadır. Doğrudan ve dolaylı olmak üzere yöntem iki ana gruptan oluşmaktadır. Kolay ve maliyet açısından uygun bir teknik olup yüksek üretim miktarlarında seri üretim potansiyeline sahiptir. Diğer döküm yöntemlerine göre uygulanan kuvvetli basınç sayesinde porozite miktarı azaltılmış ve ince taneli mikro yapıya sahip ürünler meydana getirilebilmektedir. Ticari uygulama alanı olarak piston, jant, rulman materyalleri, miller ve fren diskleri gibi parçalar bu yöntemle kolaylıkla üretilebilmektedir. Sıkıştırma döküm prosesinin çeşitli alaşımlarla en etkin bir şekilde yapılabilmesi için teknikteki parametrelerin nihai malzeme üzerindeki davranışlarının eksiksiz bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler, döküm esnasındaki metalin sıcaklığı, kalıbın sıcaklığı, basınç uygulanana kadar geçen zaman, uygulanan basınç ve bekleme süresi, kalıp malzemesinin türü ve tasarımı olarak ifade edilebilir [26]. Şekil 3.4'te sıkıştırılmalı döküme ait şematik görüntü verilmiştir.

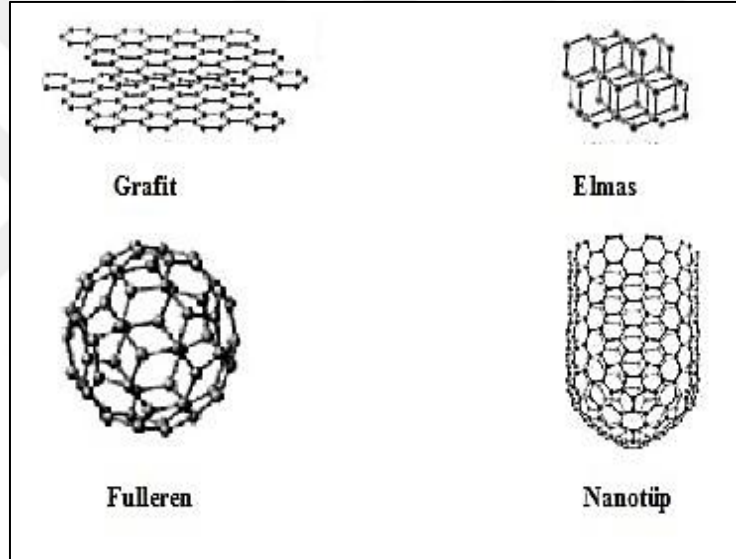


Şekil 3.4. Sıkıştırırmalı döküme ait şematik görüntü [23].

BÖLÜM 4

KARBON BAZLI NANO PARTİKÜLLER

Karbon, grafit, elmas, karbon nanofiberler, siyah karbon, amorf karbon, grafen, fulleren (C₆₀) ve karbon nanotüpler gibi farklı allotroplara sahiptir. Şekil 4.1’de bazı karbon türleri şematik olarak sunulmuştur [27].



Şekil 4.1. Karbonun allotropları.

4.1. KARBON NANOTÜPLER

Karbon nanotüpler, üstün özelliklere sahip moleküler ölçekli grafit karbon tüpleridir. Karbon nanotüpler Elastiklik modülleri 1 TPa kadar ve 63 GPa'ya kadar gerilme mukavemetleri ile bilinen en sert ve en güçlü fiberler arasındadır. Ayrıca önemli elektronik özelliklere sahiptirler yapılarına ve çaplarına bağlı olarak metalik veya yarı iletken olabilirler. Şu anda karbon nanotüpleri bir matris şeklinde birleştirilerek bu özelliklerden yararlanma konusunda büyük ilgi var. Çok çeşitli polimer matrisler

kullanılmıştır ve nanotüp / seramik ve nanotüp / metal kompozitlere artan ilgi vardır. Bu derleme, karbon nanotüplerin özelliklerini özetlemekte ve karbon nanotüp kompozitlerin hazırlanmasını ve özelliklerini açıklamaktadır. Bu malzemelerin ticari kullanımı için beklentiler tartışıldı.

Karbon nanotüpler, son 30 yılda keşfedilen en heyecan verici yeni malzemeler arasındadır [28]. Karbon nanotüplerin üstün özellikleri bilim insanlarının ve endüstrinin ilgisini çekmiştir. Bu ilgi ile birlikte günde yaklaşık 7 makale çalışmasına konu olmuştur. Karbon nanotüplere olan ilginin patlaması, Sumio Iijima' nın 1991 tarihli Nature makalesine kadar uzanabilir [29]. Iijima, helyum atmosferinde grafitin ark buharlaşmasıyla üretilen karbonu incelemek için yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM) kullanıyordu. Birkaç yıl önce, bu yöntemin yüksek verimde C60 ve diğer fullerenerin üretilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir [30]. Bu nedenle diğer yeni karbon formlarının aynı zamanda oluşabileceği düşünülmüştür. Ark buharlaşmasının ardından Iijima'nın keşfini yaptığı grafit katodu üzerinde oluşan sert birikinti incelendiğinde deponun merkezi kısmı, tipik olarak çapı yaklaşık 10 nm olan konsantrik grafen silindirlerinden oluşan çok sayıda küçük grafit karbon tüpünü içeriyordu. Katalitik olarak üretilen karbon nanotüpler uzun yıllardır bilinmesine rağmen Iijima tarafından keşfedilen yapılar öncekilerine göre çok daha iyiydi. Sonraki çalışmalarda, iki grup, tek duvarlı nanotüplerin, bir veya iki elektrotun kobalt, nikel veya başka bir metal içerdiği benzer bir aparatta üretilbildiğini gösterildi [31,32]. Bu tek duvarlı tüpler genellikle çok duvarlı nanotüplerden daha küçük çaplara sahiptir (tipik olarak 1–2 nm çaplı). 1996 yılında, çok duvarlı nanotüpler gibi tek duvarlı nanotüplerin katalitik olarak üretilbileceği kanıtlanmıştır [33].

Şu anda karbon nanotüplerin olağanüstü özelliklerine ilişkin bol miktarda deneysel kanıt bulunmaktadır. In-situ transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak yapılan ölçümler, elastiklik modülünün 1 TPa düzeyinde olduğu açığa çıkmıştır [34–36]. Karşılaştırma yapmak için, en sert geleneksel karbon fiberler elastiklik modülü yaklaşık 800 GPa değerine sahipken, cam fiberler tipik olarak yaklaşık 70 GPa'lık bir elastiklik modülüne sahiptir.

Atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak münferit nanotüpler üzerinde yapılan doğrudan ölçümler, kırılmadan aşırı deformasyonları barındırabileceklerini göstermiştir [37].

Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri hususunda hem teorik hem de deneysel olarak çok sayıda çalışması olmuştur. İlk sertlik ve mekanik ölçümler 1996 yılında Treacy ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [34]. Karbon nanotüplerin düşük yoğunlukta olması ve elastic modülüslerinin oldukça yüksek olmasından dolayı bilinen en sağlam malzemelerdendir. Doğada gözlenmiş en kuvvetli bağın grafitdeki karbonlar arasındaki bağ olduğundan mütevellit karbon nanotüplerin en sağlam ve en mukavemetli malzemeler olması doğaldır [38–41].

Nanotüplerin mukavemet değerleri çelikten kat be kat daha yüksektir. Kurşun geçirmez malzeme üretiminde genel olarak kullanılan kevlar liflerinin mekanik performansları dahi karbon nanotüplerden daha düşüktür [38]. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tek duvarlı karbon nanotüplerin gerilme mukavemeti 45 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer düşünülecek olursa, en sağlam çeliğin sahip olduğu 2 GPa 'lık gerilme mukavemetinden daha fazla olduğu açıkça görülmektedir [42]. Elmas kadar yüksek mekanik dayanıma sahip olan karbon nanotüplerin, Elastik Modülleri 1,0- 1,4 TPa arasında yer almaktadır [43].

Ayrıca, karbon nanotüplerin elektronik özelliklerinin önemli sayıda çalışması da yapılmıştır [44]. Erken kuramsal çalışmalar, nanotüplerin yapılarına ve çaplarına bağlı olarak metalik veya yarı iletken olabileceğini göstermiştir [45–47]. Ebbesen ve arkadaşları nanotüplerin elektronik özelliklerinin tüpten tüpe geniş ölçüde değişebileceğini deneysel olarak doğrulamıştır [48].

Çok araştırmanın konusu olan bir diğer alan ise karbon nanotüplerin kimyasal modifikasyonudur. Nanotüplerin kimyasal tedavileri önce uç kapakların seçici olarak çıkarılması ve moleküler kaplar olarak kullanılması için gerçekleştirilmiştir. 1994 yılında, nanotüp kapaklarının, görünüşte, beşgen halkalarda seçici oksidasyonun bir sonucu olarak, sıcak nitrik asit ile işlenerek çıkarılabileceği gösterilmiştir [49].

Sonraki çalışmalarda, asit-baz titrasyonu ile gösterilmiştir ve bu asit muamelesinin, yüzey yüzeyindeki karboksilik asit ve diğer yüzeylerin tüp yüzeylerinde oluşması ile sonuçlanan ayrıştırma sıcaklığı ve sıcaklıkla programlanmıştır [50]. Bu yüzey asit grupları daha sonra çeşitli şekillerde daha fazla modifiye edilebilirler [51]. Fonksiyonelleştirme, kompozit materyallerin hazırlanmasında bir başlangıç olarak çözücüler içinde nanotüplerin dağılmasını kolaylaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır ve ayrıca, tüpler ve matrisler arasındaki bağlanmayı geliştirmeye yardımcı olabilmektedir [52].

Bu göze çarpan özelliklerin birçoğu nanotüplerin bir matris formuna dahil edilmesiyle en iyi şekilde kullanılabilir ve nanotüp içeren kompozit materyallerin hazırlanması artık hızla büyüyen bir konudur [53,54]. Birçok durumda, bu kompozitler polimer matrisleri kullanmışlardır, fakat seramik ve metaller gibi diğer matris malzemelerine de ilgi vardır.

Karbon nanotüplerin üstün mekanik özellikleri, nanotüpleri magnezyum matrisi içine takviye edilebilecek nanopartikül olarak popüler kılmıştır. Shimizu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda karbon nanotüpün AZ91 magnezyum alaşımı içerisindeki etkisi incelenmiş ve yapılan mekanik testler sonucunda çekme mukavemetinde ve elastik modülüsünde artış olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp miktarları % 0,5' den % 5 e kadar değişiklik göstermiş fakat shimizu tozların homojen karışımını sağlayamamış ve topaklanmaların olduğunu tespit etmiştir. Özellikle %1 ve daha az oranlarda ilavesi yapılan karbon nanotüplerde bu problem daha belirgindir. Bu topaklanmanın sebebi ise, karbon nanotüplerin sahip oldukları güçlü vander waals bağlarıdır. Bu topaklanmalar çözülmediği takdirde ise CNT lerin bir nanopartikül olarak potansiyel uygulanmalarını kısıtlayacağını vurgulamıştır [55].

G.Han ve arkadaşları AZ31 magnezyum alaşımında CNT'lerin homojen dağılabilmesi için çalışmalar yapmış ve sadece %1,5 oranında karbon nanotüp kullanarak vakum destilasyon sistemiyle homojen karıştırmayı başaramıştır. Karbon nanotüp ilavesiyle yapılan çekme testi neticesinde akma ve çekme mukavemetinde artış gözlemlenmiştir [56].

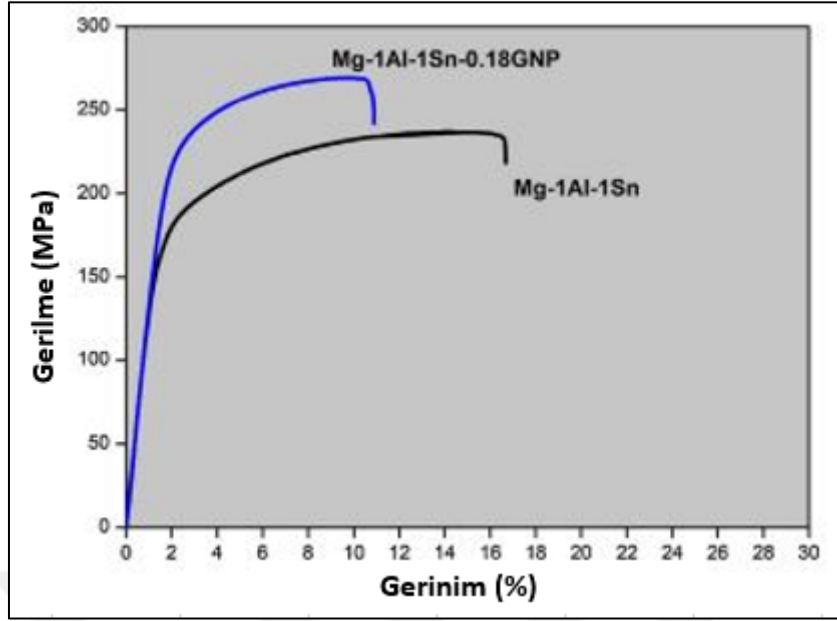
J.Wei ve arkadaşları karbon nanotüpün magnezyumun korozyonuna herhangi bir etki yapıp yapmadığını araştırabilmek için %0.3, 1.3 ve 1.6 oranlarında karbon nanotüp ilavesi yapmış korozyon direncini düşürdüğünü gözlemlemişler fakat karışımın homojen sağlanamaması ve topaklanmalardan dolayı bu durumun ortaya çıkabileceği kanısına varmışlardır [42].

4.2. GRAFEN

Yeni nesil malzeme olarak adlandırılan grafen 2004 yılında bulunmuştur. İki boyutlu bir yapıya sahip olan grafende, karbon atomları 1s ve 2p orbitallerinin bir araya gelmesi ile 120 derece açısında sp^2 melezleşmesi yaparken boşta kalan p_z orbitalleri de bu olağan üstü malzemeye sıradışı özellikler kazandırmaktadır.

Karbon-karbon bağı arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 1.42 Angstrom iken grafen tabakalarının üst üste gelmesi ile meydana gelen grafitte iki grafen tabakası arasındaki mesafe yaklaşık 3,35 Angstrom'dur. Grafendeki güçlü karbon bağları ona yeryüzündeki bilinen en dayanıklı malzemelerden biri olma özelliğini sunmuştur [57].

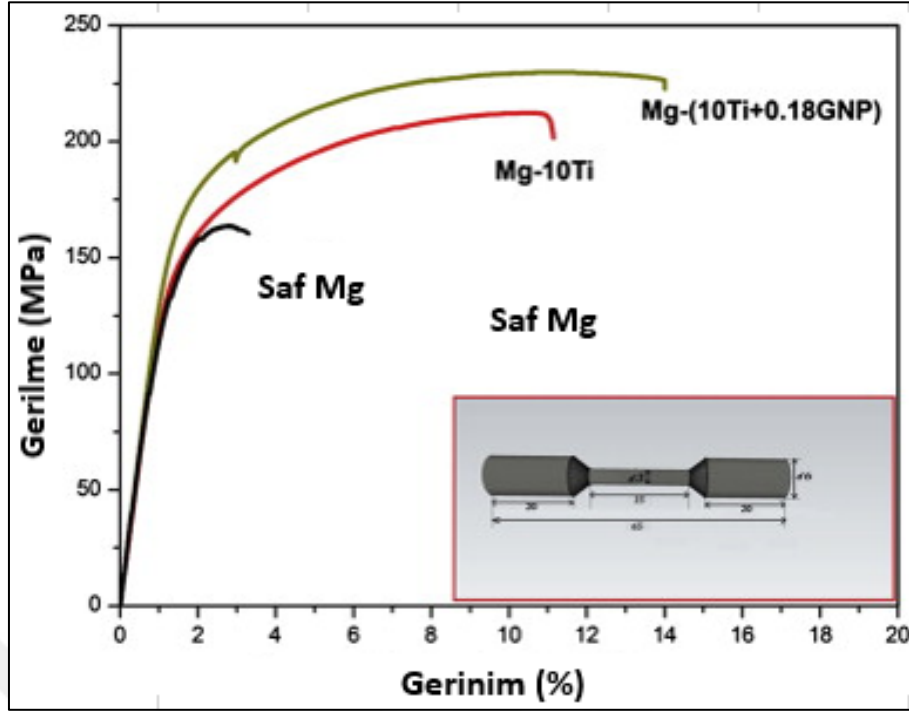
1 TPa gibi yüksek bir elastik modüle ve 125 GPa mukavemete sahip olması bir nanopartikül olarak kullanılabilirliğini gündeme getirmiş ve araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Rashad ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında Mg-%1Al-%1Sn alaşımına %0.18 grafen ilave etmişler ve çekme testine tabi tutarak young modülünde ve çekme dayanımında artış görmüşlerdir [55].



Şekil 4.2. Mg-Al-Sn/GNP kompozitine ait çekme diyagramı [55].

Şekil 4.2’de Mg-1Al-1Sn alaşımının çok düşük miktarda grafen ilavesiyle akma ve çekme mukavemetindeki artış gösterilmiştir. Ağırlıkça %0.18 grafen ilavesi, takviyesiz alaşımın akma mukavemetinde %29, çekme mukavemetinde ise %14 lük bir artış sağlamıştır. Alüminyum ve kalayın düşük oranlarda saf magnezyuma ilave edilmesinin sebebi, matris ile takviye arasındaki etkileşimi güçlendirmek için yağlayıcı etki sağlamasıdır.

Fusheng pan ve arkadaşları, magnezyum-titanyum alaşımına yaklaşık %0,2 grafen ilave ederek mikroyapı analizleriyle grafenin magnezyum matrisi içerisindeki dağılımını incelemişlerdir. Ayrıca çekme testiyle bu alaşımın grafen ilavesiyle dayanımının arttığını görmüşlerdir [57]. Grafen etkisiyle saf magnezyumun ve magnezyum titanyum alaşımının oda sıcaklığında çekme mukavemetindeki değişiklik Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Yaklaşık %0.2 oranında grafen kullanımıyla, akma ve çekme mukavemetlerindeki ciddi artışın sağlanması, grafenin iki boyutlu doğası, yüksek adhezyon ve yüksek spesifik yüzey alanına sahip olmasıyla açıklanmıştır.



Şekil 4.3. Grafen takviyeli Mg-10Ti matrisli kompozite ait çekme test sonuçları [57].

Grafenin oda sıcaklığında magnezyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisinin yanı sıra Rashad ve arkadaşları farklı sıcaklıklarda çekme testleri yaparak grafenin, AZ61 magnezyum alaşımının yüksek sıcaklıklarda akma ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada %3 oranında grafen kullanılarak eriyik çökeltme yöntemiyle (Disintegrated Melt Deposition) AZ61 matrisli kompozit üretilmiş ve oda sıcaklığına ek olarak üç farklı sıcaklıkta çekme testleri uygulanmıştır. Sıcaklık arttıkça akma ve çekme mukavemetlerinde düşüş fakat süneklilikte ciddi bir artış görülmüştür. Bu artışın sebebi olarak, grafenin yüksek sıcaklıkta matrisi yumuşatması gibi bir rol üstlendiği vurgulanmıştır. 225 °C de akma mukavemetinde çok ciddi bir düşüş görülmüş ve bunun sebebi olarak ta bu sıcaklığın yeniden kristalleşme sıcaklığı olduğu raporlanmıştır [58].

Çizelge 4.1. AZ61-3GNP kompozitinin farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri [58].

Sıcaklık (°C)	%0.2 Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kırılma Şekil Değişimi (%)
25	232 ± 5.5	335 ± 9.1	10.7 ± 5.5
75	212 ± 7.1	318 ± 7.5	17.4 ± 6.1
150	194 ± 4.9	280 ± 8.9	38.1 ± 5.9
225	168 ± 5.8	197 ± 8.5	68.1 ± 6.9

4.3. FULLEREN

Karbon, sadece iki mevcut formda elmas ve grafit olarak biliniyordu, ancak tamamen yeni bir form olan ‘buckminsterfulleren’, Kroto tarafından 1985'te keşfedilmiştir. Sadece 1 nm. çapında olan bu yeni karbon allotropun büyük potansiyelini sunmak için araştırmacılar tarafından çok sayıda buluş gerçekleştirilmiştir. Böylece tıp, fizik, kimya, matematik ve mühendislik gibi farklı disiplinlerin büyük ilgisini çeken materyal bilimi alanında yeni bir alan kurulmuştur. Buckminsterfullerene veya iyi bilinen ‘C60 isminin keşfi, Kimyada Nobel Ödülü'nü almıştır.

Buckminsterfullerene moleküler bir top oluşturmak için simetrik olarak dizilmiş 12 pentagonal (5 yüzlü) ve 20 altıgen (6 yüzlü) yüz içeren bir futbol topu şeklindedir. Fulleren sp² bağ yapısıyla çok güçlü bir moleküler yapıya sahiptir ve çok büyük basınç yüklerine karşı dayanım gösterebilir.

Fullerenler 3000 atmosfer basınca maruz kaldıktan sonra üzerindeki yük kaldırıldığında, ilk hallerine dönebilecek kadar dayanımı yüksek malzemelerdir. Bu açıklamaya paralel olarak teorik hesaplar göstermektedir ki bir C60 molekülünün elastiklik modülü yaklaşık olarak 668 GPa mertebesindedir.

1990'ların ortalarından beri bir dizi cesaret verici fulleren uygulaması önerilmiştir.

Fullerenler, daha verimli güneş pilleri, virüs inhibisyonu, süperiletkenlik, lityum-iyon piller, ilaç verme, nanoelektronik, vb. yeni kompozit malzemeler gibi burada bahsedilen farklı alanlardaki konuları kapsayan nanosistemin multidisiplinerliğini göstermektedir [59–62].

Karbon nanotüp ve grafenin magnezyum matrisli kompozitler üzerine, aşınma ve korozyon alanında eksik olsa da mekanik ve mikroyapı incelemeleriyle ilgili makale

alışmaları mevcuttur. Fakat fullerenin magnezyum matrisli kompozitler üzerine çok nadir çalışmalar yapılmış ve bu tez çalışmasıyla, karbon nanotüp ve grafenin yanında fullereninde metal matrisli kompozit üzerine etkisi incelenerek kıyaslamalar yapılmıştır.



BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

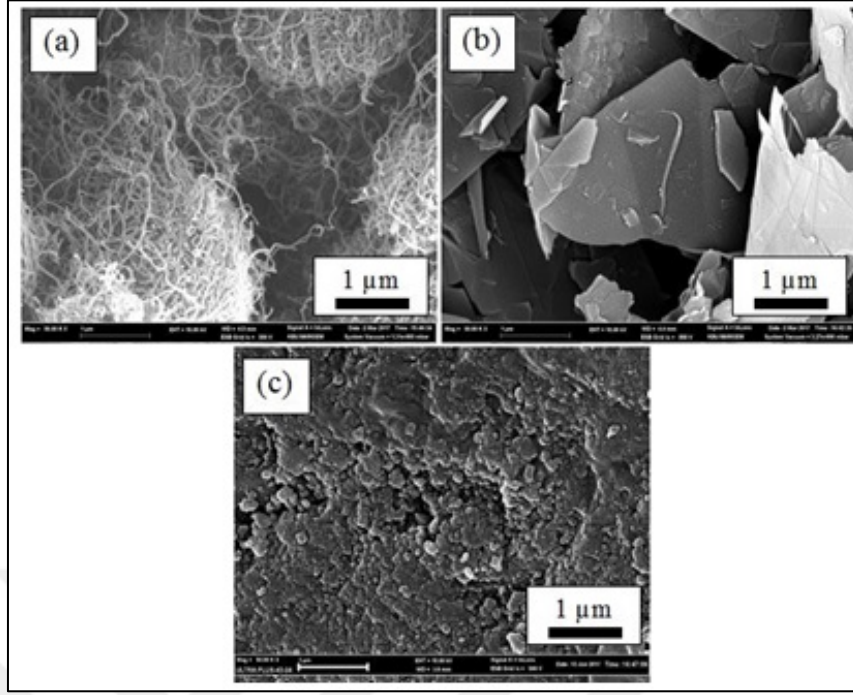
5.1. MATRİS VE TAKVİYE MALZEMELERİ

Bu çalışmada magnezyum ve magnezyum alaşımları matris malzemesi olarak seçilmiş, takviye malzemesi olarak ise karbon bazlı nanopartiküller (karbon nanotüp, grafen ve fulleren) kullanılmıştır. Saf magnezyum, AZ31 ve AZ91 magnezyum alaşımları %99 saflıkta ve 100 µm boyutunda olup, kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Matris malzemelerinin kimyasal bileşimleri.

Kimyasal Bileşim Ağırlıkça (%)					
Element	Al	Zn	Mn	Fe	Mg
AZ31	2,753	1,129	0,616	0,019	Kalan
AZ91	9,019	1,112	0,597	0,018	Kalan

Tez çalışmasında kullanılan karbon nanotüp, grafen ve fullerene ait SEM görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Karbon nanopartiküllere ait SEM görüntüleri (a) KNT (b) GNP (c) C60.

5.2. KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

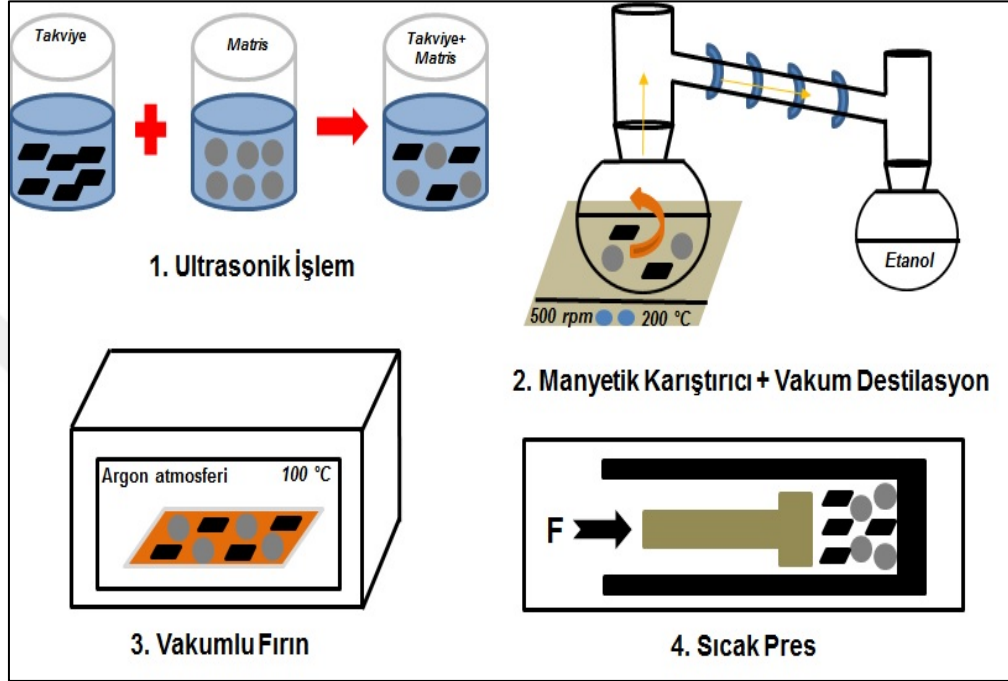
Bilyalı Alaşımlama ile magnezyum matrisli kompozitlerin karıştırılması, meydana gelen ısıdan dolayı magnezyumun kolaylıkla yamasına neden olmaktadır. Bu yüzden mekanik alaşımlama uygun kolayca oksitlenebilen ve yanıcı özelliğe sahip malzemeler için uygun bir yöntem değildir. Bu yüzden çalışmamızda mekanik alaşımlama yöntemi denenmemiş fakat magnezyum bazlı matris ve karbon bazlı nanopartikül takviyelerinin karıştırılmasında üç boyutlu karıştırıcı olan turbula mikser denenmiştir. Tozlar 100 dev/dak. hızda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma amaçlı bu çalışmada kullanılan Turbula mikserine ait görüntü Şekil 5.2’te verilmiştir.



Şekil 5.2. Karıştırma amaçlı kullanılan Turbula mikser.

Yapılan karıştırma neticesinde nanopartiküllerin homojen dağılamaması ve yüzeyde topaklanmasından dolayı bu yöntemden vazgeçilip, literatürden yola çıkarak sıvı bazlı karıştırma yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, takviye malzemeleri ilk olarak ultrasonik banyoda bir saat boyunca etanol içerisinde titreşime maruz bırakılmış ve böylelikle karbon atomları arasındaki güçlü Van der waals bağlarının zayıflatılması amaçlanmıştır. Bu Van der waals bağlarının zayıflatılması, karbon nanopartiküllerinin matris içerisindeki topaklanma eğilimini önlemektedir. Bir saat süren bu ultrasonik işlemin ardından aynı prosese devam edilerek matris tozu aşama aşama sıvıya eklenmiş böylelikle ultrasonik işlem yarım saat daha sürdürülmüştür. Akabinde tozların içinde bulunduğu sıvı Şekil 5.3'te gösterilen vakum destilasyon düzeneğine taşınmıştır. Bu sistemde karıştırıcı olarak manyetik karıştırıcı kullanılmış ve vakum sistemi sayesinde karıştırma işlemi süresince etanolün sistemden uzaklaşması sağlanmıştır. Manyetik karıştırıcının sıcaklığı 150-200 °C aralığında ayarlanmış ve karıştırma hızı, içindeki sıvı miktarı göz önünde bulundurularak 500-700 rpm aralığında seçilmiştir. Etanolün sistemden tamamen uzaklaştığına emin olmak için karıştırma sonrası elde edilmiş tozlar atmosfer kontrollü fırına koyularak 100 °C' de gece boyunca kurumaya bırakılmıştır.

Presleme ve sinterleme işlemi sıcak pres cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yüksek saflıkta argon gazı kullanılarak, presleme ve sinterleme aşamasında karşılaşılabilecek olası oksitlenme ve yanma olayı engellenmiştir. Üretilen kompozitlere ait presleme ve sinterleme parametreleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

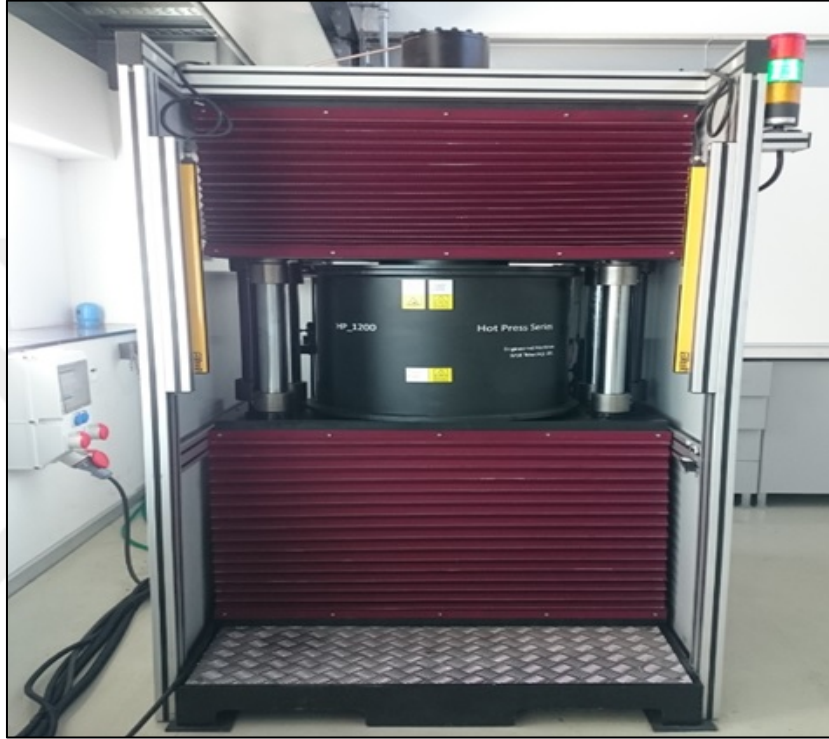


Şekil 5.3. Kompozitlerin üretim yöntemi.

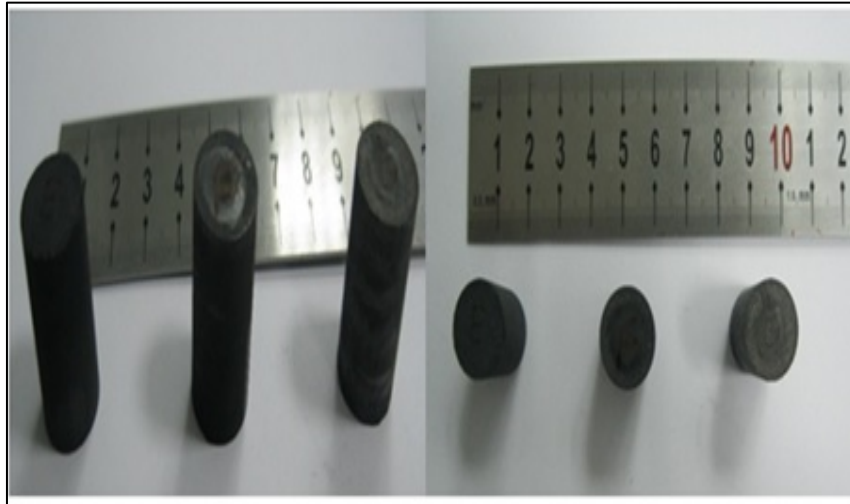
Sinterleme ve presleme işlemleri sıcak pres cihazı kullanılarak yapılmış, kalıp olarak grafit kalıp kullanılmıştır. Saf Magnezyum için sinterleme sıcaklığı 550 °C, sinterleme süresi 90 dakika olarak yapılmıştır. Mg-3Al, Mg-9Al, Mg-1Zn, AZ31 ve AZ91 alaşımları matris olarak kullanıldığında sinterleme sıcaklıkları 500 °C ve sinterleme süresi 2 saat olarak ayarlanmıştır. Koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılmıştır.

Saf magnezyuma ek olarak alüminyumun etkisini incelemek için Mg-3Al ve Mg-9Al alaşımları, çinkonun etkisini incelemek için Mg-1Zn alaşımları da matris malzemesi olarak kullanılmış, bu alaşımların üretim parametresi ise AZ31 ve AZ91 alaşımlarının presleme ve sinterleme parametreleriyle aynı seçilmiştir.

Toplamda altı adet matrise, ağırlıkça %0,1, %0,25 ve %0,5 oranlarında karbon nanotüp, grafen ve fulleren ilave edilerek, 15 mm. çapında kalıplar kullanılarak, toz metalürjisi yöntemiyle kompozitlerin başarılı bir şekilde üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin üretildiği sıcak pres cihazı ve numune görüntüleri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Sıcak pres cihazı.



Şekil 5.5. Üretimi yapılan numunelere ait görüntüler.

5.3. KARAKTERİZASYON İŞLEMLERİ

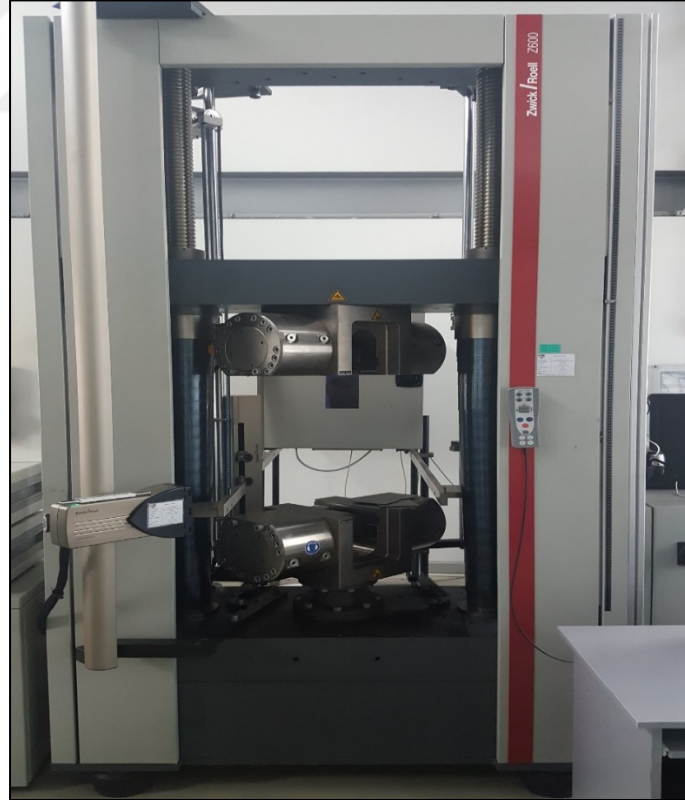
Üretim işleminin ardından numunelere ait deneysel yoğunluklar Arşimet kuralına göre hesaplandı ve teorik yoğunluklarla karşılaştırılarak yapıdaki porozite oranı da belirlendi. Yoğunluk ölçümünün ardından numunelerin mikroyapı karakterizasyonu için metalografik işlemler yapıldı. Hassas kesmede uygun boyutlarda numuneler kesildi ve Struers marka sıcak gömme cihazı kullanılarak bakalite alma işlemi gerçekleştirildi. Bakalite alınan numuneler otomatik zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla 240,400,600,800,1000, 1200 ve 2000 taneli SiC zımparalarıyla yüzeyleri parlatma için hazır hale getirildi. Parlatma işlemi 6 µm ve 1 µm elmas parlatma solüsyonları kullanılarak demir dışı alaşımlara has parlatma keçeleriyle yapıldı. Dağlama işlemi 0,8 gr pikrik asit, 2 ml. asetik asit, 3 ml. su ve 20 ml. etil alkol karışımı hazırlanarak bütün numunelere uygulanmıştır. Kompozitlerdeki mevcut bileşimlerin ve fazların tespiti için Şekil 5.6’de gösterilen Rigaku marka XRD cihazı kullanılmıştır. 10-90° aralığında bakır tüp kullanarak sürekli tarama yapılmıştır. Tüm ölçümler için makina 40 kV ve 40 mA parametreleri altında çalıştırılmıştır. Üretilen numunelerin mikroyapıları Carl Zeiss Ultraplus SEM (Şekil 5.6) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca EDX ve Haritasal görüntüleme analizleri ile takviye malzemelerinin matris içerisindeki dağılımı bu cihaz sayesinde görüntülenmiştir.



Şekil 5.6. XRD ve SEM cihazları.

Mikroyapı incelemelerinin ardından QNESS Q10A+ mikrosertlik cihazı kullanılarak kompozitlerin sertlik performansları belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri 500 gr. Yük 15 saniye süreyle uygulanarak tamamlanmıştır. Her bir numune için üçer ölçüm alınarak elde edilen sonuçlar kaydedilmiş, böylelikle takviye türünün ve oranının matris malzemesinin sertlik davranışına olan etkisi incelenmiştir.

Numunelerin basma mukavemetleri Zwick Roel 600 kN test cihazı kullanılarak elde edildi. Basma testi için 15x15 mm boyutlarında aynı üretim parametreleri kullanılarak numuneler üretildi. Basma hızı 0.002 mm/dak. olacak şekilde belirlenerek oda sıcaklığında basma testleri yapıldı. Test neticesinde %0,2 basma akma mukavemeti, basma birim şekil değişimi ve nihai basma mukavemet değerleri elde edildi. Böylelikle, farklı oranlardaki karbon bazlı nanopartiküllerin magnezyum alaşımları üzerindeki basma mukavemet performansları değerlendirildi. Basma testi için kullanılan Zwick model test cihazı Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. 600 kN basma test cihazı.

Sertlik ve basma testlerinin ardından kuru ortamda oda sıcaklığında aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri UTS Tribometer T10 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma yükü olarak 10N, 20N ve 40N olmak üzere üç farklı yük tek bir aşınma hızında (50 mm/s) uygulanmıştır. Aşınma mesafesi olarak malzemeler 1000 metre yol almıştır. Aşınma testi öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları 0,1 mg hassasiyetli elektronik hassas terazide ölçülmüş ve aşınma mesafesi sonucunda meydana gelen ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Aşınma testleri neticesinde cihazdan alınan aşınma derinliği verileri kullanılıp, profil projektörde aşınma genişliği ve uzunluğu ölçülerek, 1000 metre sonucunda hacimsel olarak kayıp belirlenmiştir. Aşınma hızı böylelikle hem kütsel hem de hacimsel olarak hesaplanmıştır. Ayrıca cihazdan elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri göz önünde bulundurularak, uygulanan yükün, karbon bazlı nanopartiküllerin türünün ve oranının alaşımın sürtünme özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Aşınma sonrası en düşük ve en yüksek yükler değerlendirilerek, numuneler SEM analizine tabii tutulmuştur. Kompozitlerin aşınma mekanizmaları yüke bağlı olarak gözlemlenmiş ve EDX ile desteklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan aşınma cihazı Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. UTS aşınma test cihazı.

Üretilen kompozitlerin korozyon direnci oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisinde elektromekanik test metoduyla Tafel tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Potansiyodinamik eğriler bilgisayar tarafından kontrol edilen DC105 korozyon analiziyle birlikte Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat tarafından elde edilmiştir. Numuneler korozyon testi öncesi 10*10 mm boyutlarında işlenmiş ve bakır bir tel ile etrafi sarılarak bakalit içerisine alınmıştır. Telin ucu iletkenlik sağlaması amacıyla bakalit dışında tutulmuştur. Numunenin açık kısmı 2000 taneli zımparaya kadar zımparalanmış ve yüzey hazır hale getirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -0.25 V (vs Eoc) ile +0.25 V (vs Eoc) arasında 1mVs-1 tarama alanında çizilmiştir. Referans elektrot olarak kalomel elektrot kullanılmıştır. Potansiyodinamik teste ek olarak numunelere daldırma testi yapılmıştır. %3.5 NaCl içerisinde farklı zaman dilimlerinde (1,2,4,8 ve 24 saat) numuneler tutulmuş ve ağırlık kayıpları incelenmiştir. Böylelikle numunelerdeki korozyon gelişimi incelenmiştir. Saf magnezyum ve AZ91 magnezyum alaşımı için sabit oranlarda karbon nanopartiküllerinin ilavesi göz önünde bulundurularak SEM ile her bir zaman dilimi için mikroyapı analizi yapılmıştır. Korozyon analizi için kullanılan potansiyostat cihazı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Korozyon test cihazı.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Magnezyum matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozit malzemeler sıcak pres cihazında yarı toz metalürjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Deneysel çalışmalar kısmında belirtilen test prosedürlerine uygun olarak yoğunluk ölçümleri tamamlanmış, mikroyapı analizleri yapılmış, sertlik, basma, aşınma ve korozyon testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜM SONUÇLARI

Üretimi tamamlanan magnezyum matrisli karbon nanopartiküllerinin deneysel yoğunlukları ölçülerek teorik yoğunluklarıyla kıyaslama yapıldı. Böylelikle yapıdaki porozite miktarı da hesaplanmış oldu. Yoğunluk ölçümü, bir sıvıya batırılan bir nesnenin görünürde yerine geçtiği sıvı ağırlığına eşit miktarda kaybettiği ağırlığı ifade eden Arşimet prensibi vasıtasıyla gerçekleştirildi. Yoğunluk ölçümünde Arşimet kitinden faydalanılarak numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları 0,1 mg. hassasiyetindeki elektronik terazide ölçüldü. Aşağıdaki formül kullanılarak deneysel yoğunluk hesaplandı.

$$F = V \times D$$

F: Arşimet itmesi

V: Cismin hacmi

D: Sıvının yoğunluğu

Bu denkleme göre, kullanılan sıvı saf su olduğu için yoğunluk değeri 1 g/cm³ olarak hesaba katıldı. Dolayısıyla Arşimet itmesi cismin hacmine eşit oldu.

$$V = W_A - W_L$$

W_A: Kompozitin havadaki ağırlığı

W_L: Kompozitin sıvıdaki ağırlığı

Sonuç olarak üretilen kompozitlerin yoğunluğunun ölçümünde kullanılan formül;

$$D_{\text{kompozit}} = W_A / (W_A - W_L)$$

şeklinde. Takviyesiz magnezyum ve alaşımları ile karbon bazlı nanopartiküllerinin ilavesiyle üretilmiş kompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Magnezyum matrisli kompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları.

Kompozit	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)
Mg	1,7380	1,7340
Mg-%0.10 GNP	1,7382	1,7208
Mg-%0.25 GNP	1,7386	1,7125
Mg-%0.50 GNP	1,7393	1,6958
Mg-%0.10 KNT	1,7382	1,7210
Mg-%0.25 KNT	1,7386	1,7120
Mg-%0.50 KNT	1,7393	1,6940
Mg-%0.10 C60	1,7382	1,7208
Mg-%0.25 C60	1,7386	1,7125
Mg-%0.50 C60	1,7393	1,6958
Mg-3Al	1,7688	1,7511
Mg-3Al-%0.25 KNT	1,7700	1,7452
Mg-3Al-%0.25 GNP	1,7700	1,7412
Mg-3Al-%0.25 C60	1,7700	1,7471
Mg-9Al	1,8200	1,8038
Mg-9Al-%0.25 KNT	1,8276	1,8017
Mg-9Al-%0.25 GNP	1,8276	1,8022
Mg-9Al-%0.25 C60	1,8276	1,8026
Mg-1Zn	1,7940	1,7880
Mg-1 Zn-%0.25 CNT	1,8456	1,8084
Mg-1 Zn-%0.25 GNP	1,8456	1,8149
Mg-1 Zn-%0.25 C60	1,8456	1,8185
AZ31	1,8228	1,7991
AZ31-%0.10 GNP	1,8233	1,7923

Çizelge 6.1. (devam ediyor).

AZ31-%0.25 GNP	1,8241	1,7894
AZ31-%0.50 GNP	1,8253	1,7833
AZ31-%0.10 KNT	1,8233	1,7911
AZ31-%0.25 KNT	1,8241	1,7875
AZ31-%0.50 KNT	1,8253	1,7805
AZ31-%0.10 C60	1,8233	1,7920
AZ31-%0.25 C60	1,8241	1,7900
AZ31-%0.50 C60	1,8253	1,7845
AZ91	1,8804	1,8653
AZ91-%0.10 GNP	1,8809	1,8620
AZ91-%0.25 GNP	1,8816	1,8552
AZ91-%0.50 GNP	1,8829	1,8471
AZ91-%0.10 KNT	1,8809	1,8598
AZ91-%0.25 KNT	1,8816	1,8513
AZ91-%0.50 KNT	1,8829	1,8420
AZ91-%0.10 C60	1,8809	1,8625
AZ91-%0.25 C60	1,8816	1,8567
AZ91-%0.50 C60	1,8829	1,8498

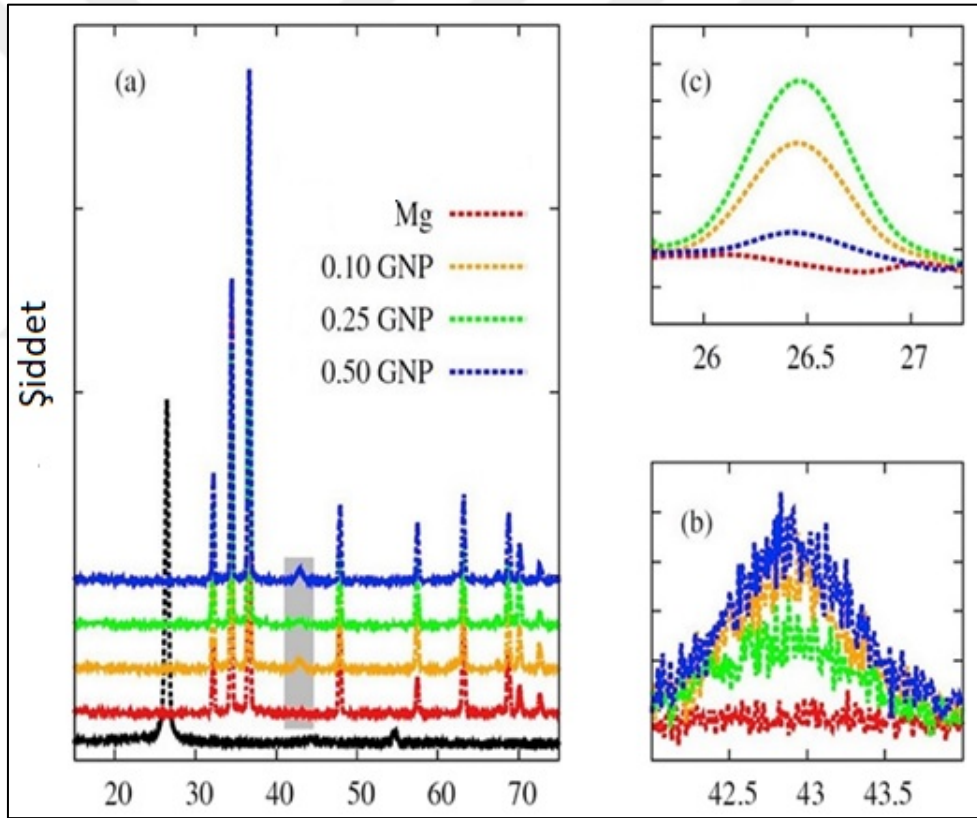
Teorik ve deneysel yoğunluklar göz önünde bulundurulduğunda yapılan üretimler neticesinde %98-99 civarında doluluk oranı gözlemlenmiştir. Bu durum toz metalurjisiyle üretimin büyük avantajından dolayı kaynaklanmaktadır. Ayrıca yüksek sinterleme sıcaklıklarında atomlar daha kolay difüze olmaktadır. Presleme ve sinterleme aşamasında meydana gelen büzülme ve çekmeler kompozitlerin teorik ve deneysel yoğunluklarında farklılıklara yol açmaktadır [57]. Kompozit sistemlerdeki bileşenlerin basma mukavemetleri ve ergime noktalarındaki küçük farklılıklar dahi malzemelerin yoğunluklarında kayda değer bir farklılığa yol açabilmektedir. Bu farkın mümkün olduğunca az olması malzemenin doluluk oranının artmasına ve aynı zamanda daha iyi mekanik ve mikroyapısal performans sergilemesine yol açmaktadır.

Takviyesiz saf magnezyum ve magnezyum alaşımlarından oluşan matrislerin üretimi neticesinde yapılan yoğunluk ölçümlerinde %99'ların üzerinde yoğunluğa ulaşılmış, karbon nanopartiküllerin eklenmesiyle ve bu takviyelerin oranlarının artmasıyla yoğunluklarda düşük bir miktarda azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebinin matris

ve takviye arasındaki bağlardan ve de homojenliğin yeni takviyelerle azaltılmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

6.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI

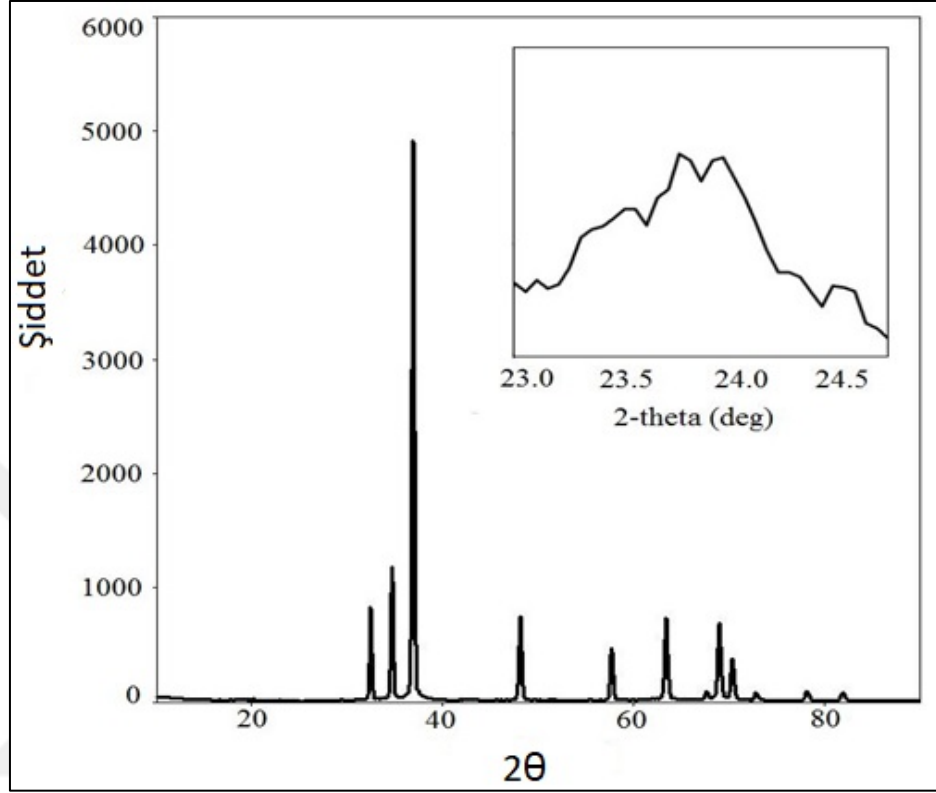
Şekil 6.1’de farklı oranlarda gafen içeren magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği verilmiştir. Sürekli tarama neticesinde yapıda karbon miktarı az olduğu için her hangi bir karbon piki görülmemiştir. Bu yüzden belirli zamanlama (fix time) olarak adlandırılan yavaş tarama neticesinde 26.4 derece civarlarında yeni bir pik oluşmuş, bu da yapıdaki grafenin varlığını kanıtlamıştır.



Şekil 6.1. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği.

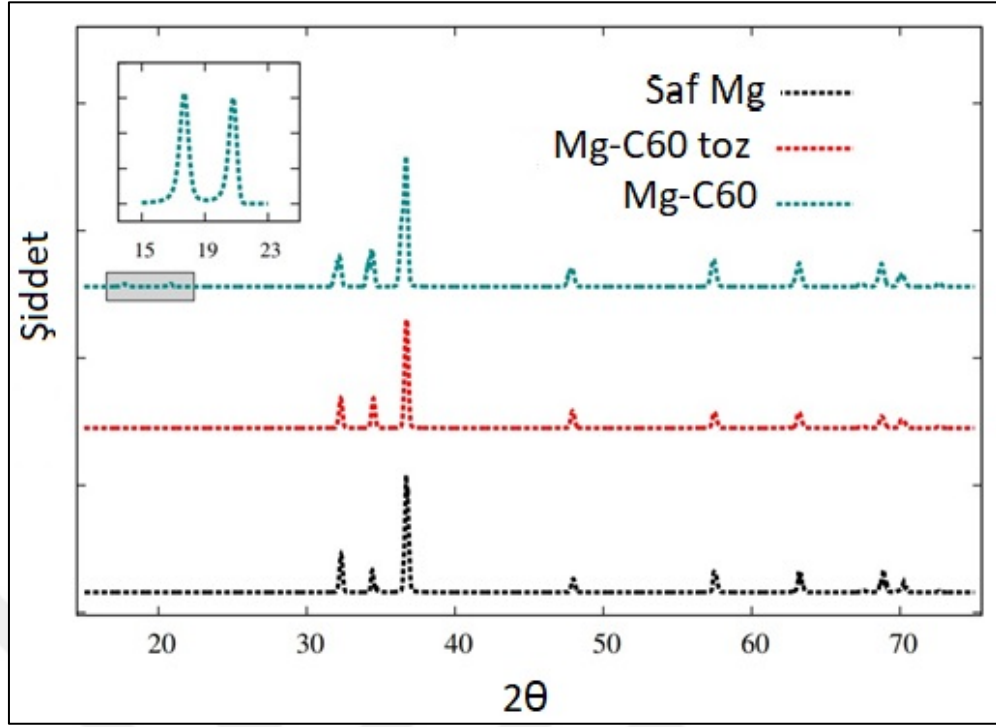
Ağırlıkça % 0.5 KNT içeren magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Magnezyuma ait farklı fazlar 2θ açısının 32.17° , 34.38° , 36.603° , 47.80° , 57.36° , 63.05° , 67.36° , 68.65° , 69.99° , 72.47° , 77.77° ve 81.54° olduğu bölgelerde tespit edilmiştir. Fakat karbon oranının ağırlıkça %2’den az olması

neticesinde tekrardan fix time metoduna ihtiyaç duyulmuş ve 26 derece civarlarında KNT'ye ait bir pik elde edilmiştir.



Şekil 6.2. % 0.5 KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği.

% 0.5 oranında fulleren içeren saf magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği Şekil 6.3' de verilmiştir. Ayrıca toz halindeki kompozitle bulk halindeki numuneye ait faz analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Magnezyum piklerine ek olarak, hacimsel numunede 17°de <220> düzleminde ve 20°de <311> düzleminde çok küçük şiddette bir pik görüntüsü tespit edilmiştir. Bu derece civarlarında yapılan yavaş tarama neticesinde fulleren yapıda tespit edilmiştir. Kompozit malzemenin X-ışını analizi neticesinde herhangi bir ara faza rastlanılmamıştır.



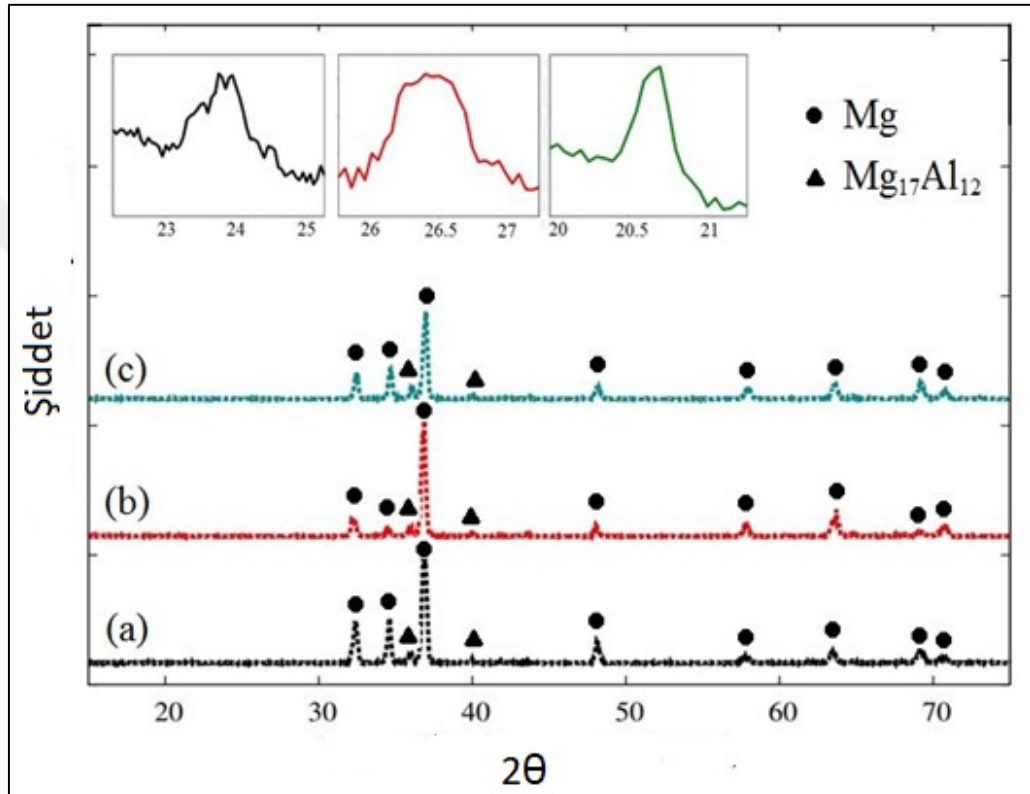
Şekil 6.3. %0.5 C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozite ait XRD grafiği.

Mg-3Al ve Mg-Zn serilerinin XRD grafikleri incelenmiş ve genel tarama neticesinde magnezyum dışında herhangi bir pike rastlanmamıştır. Mg-9Al matrisli kompozitlerde çok düşük şiddette alüminyuma ait pik bulunmuş fakat bu magnezyum alaşımlarının hiçbirinde herhangi bir ara faz (Mg₁₇Al₁₂ gibi) tespit edilmemiştir. Karbon nanopartiküller ise cihaz veri tabanında ve literatürde vermiş oldukları pikler göz önünde bulundurularak özel taramalar neticesinde elde edilmiştir.

KNT, GNP ve C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozite (Ağırlıkça %0.25 oranlarında) ait fazları içeren XRD sonuçları Şekil 6.4'de verilmiştir. 2θ açısının 35.95°, 39.90°, 41.92°, 43.55° and 64.85° olduğu yerlerde intermetalik faz olan Mg₁₇Al₁₂ fazı görülmüştür.

Karbon miktarının az olması ve karbon atomları arasındaki van der waals etkileşimleri nedeniyle KNT, GNP ve C60 numunelerine ait herhangi bir faz sürekli tarama neticesinde görülememiştir. XRD cihazının veri tabanında kayıtlı ve literatürde de yer verilen karbon nanotüp ve grafen kristallerine ait maksimum pik 26-27 derece civarlarında görüldüğü için 25.50 ile 27.50 arasında fix time metoduyla ölçümler

yapılmıştır. Bu yavaş tarama neticesinde 26.40 civarlarında grafene ait pik gözlemlenmiştir. KNT'deki düzensizlik ve şiddetin düşük olması fix time metodu neticesinde de görülmemesine neden olmuştur. Fulleren matrisli kompozitte ise 15-23 derece aralığında yavaş tarama yapılmış ve böylelikle 2θ açısının 17.70 ve 20.12 derece olduğu yerlerde yeni pik elde edilmiştir. Bu var olan pikler kompozit içerisinde karbon bazlı nanopartiküllerin varlığını göstermektedir.



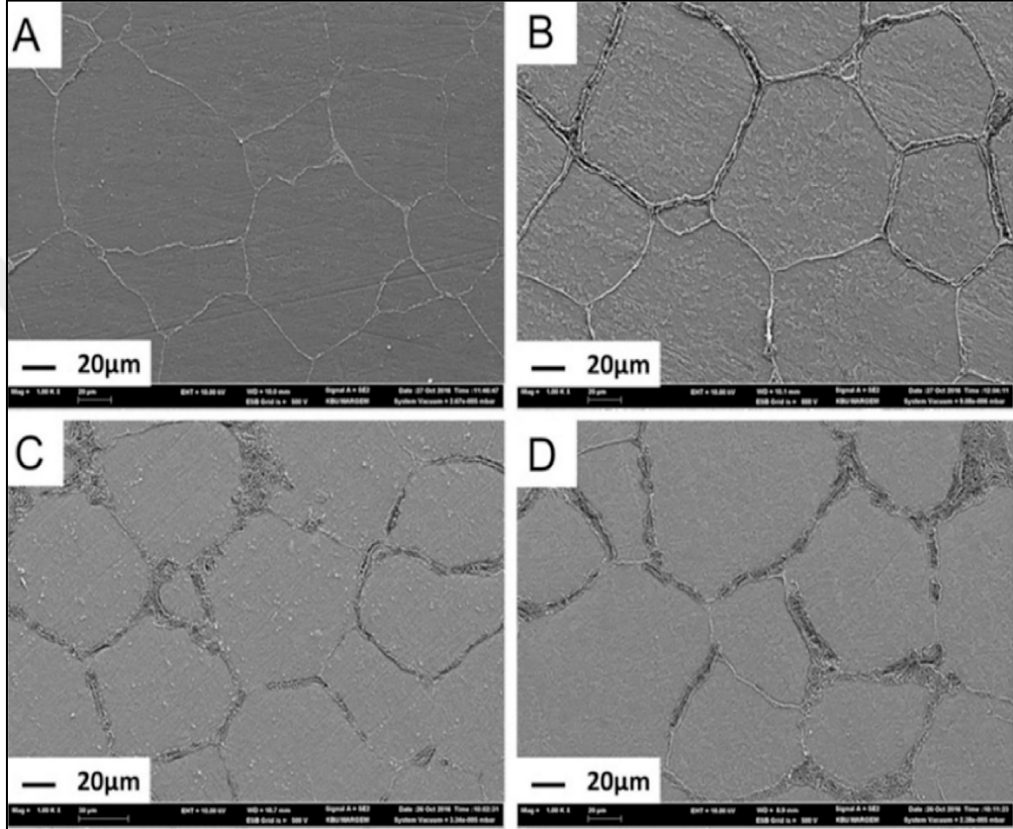
Şekil 6.4. AZ91 matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait KNT grafiği.

6.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ

SEM cihazı kullanılarak karbon nanotüp, grafen ve fulleren takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.5'de saf magnezyum ve farklı oranlarda grafen takviyeli kompozit malzemelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler 1000 X büyütmede alınmış ve detaylı inceleme yapılmıştır.

Mikroyapılar incelendiğinde yapılarda çatlak ve porozite gibi makro kusurlar görülmemektedir. Ayrıca saf magnezyum ve karbon nanopartikülleri arasında oluşan

herhangi bir bağ görülmemiştir. Grafen oranı ağırlıkça %0.25'e çıktığında kısmi topaklanma görülmekte ve bu topaklanmalar %0.50 grafen takviyeli kompozitin tane sınırlarında daha belirgin halde görülmektedir. Yine de herhangi bir kusurun görülmemesi ve topaklanmaların kabul edilebilir seviyede olması matris ile takviye arasında güçlü kimyasal bağın olduğunu göstermektedir [63,64].

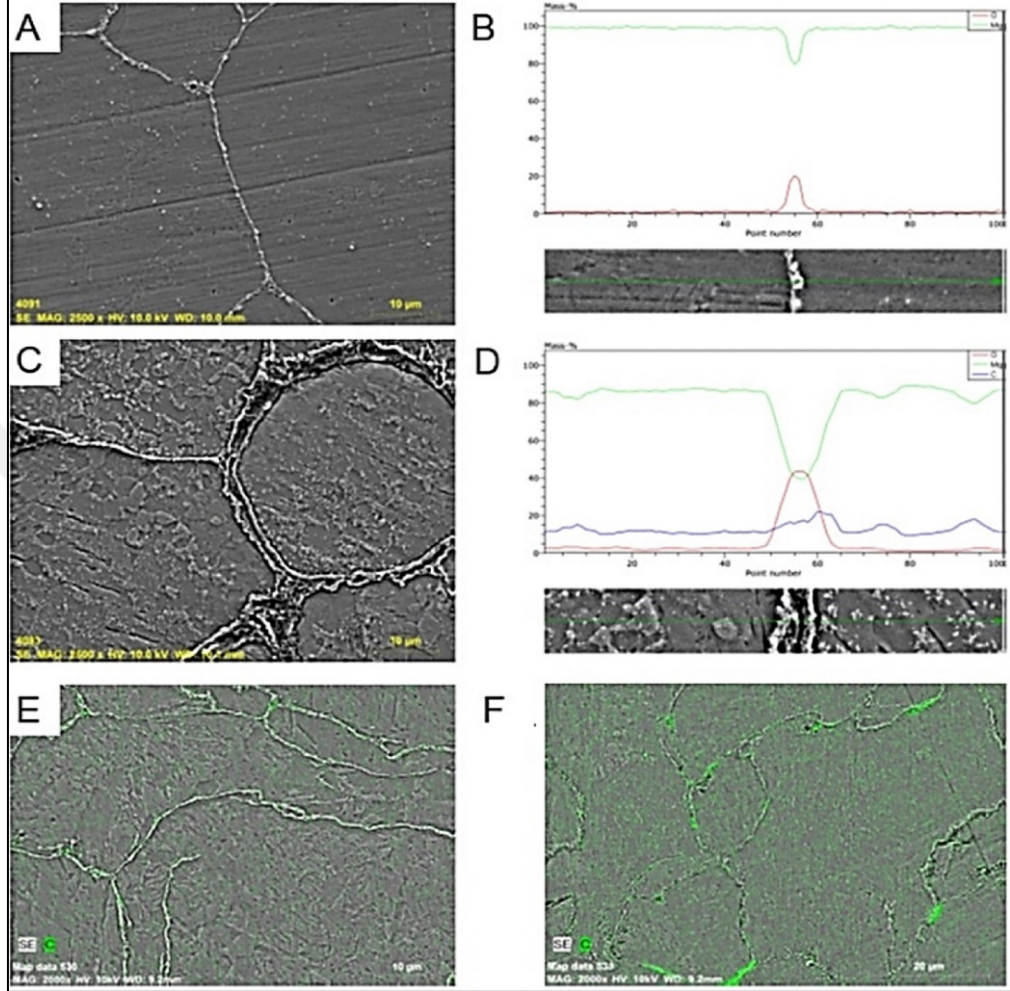


Şekil 6.5. Grafen takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Saf Mg, (B) Mg-%0.1 GNP, (C) Mg-%0.25 GNP, (D) Mg-%0.5 GNP.

Şekil 6.6'da grafen takviyeli kompozite ait EDX ve haritalama görüntüleri yer almaktadır. EDX tekniği genel olarak malzemelerde mevcut olan elementlerin yapıdaki varlığını tespit etmek ve dağılımlarını görüntülemek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmada magnezyumda ve magnezyum matrisli grafen takviyeli kompozitte herhangi bir intermetalikğin görünüp görünmediği ve karbon atomlarının matris içerisinde nasıl dağıldığını incelemek amacıyla bu teknik uygulanmıştır.

Saf magnezyum da tane sınırlarında yüksek yüzey enerjisinden dolayı oksit oluşumu EDX piklerinde görülmüştür. Grafen takviyeli kompozitte ise karbon atomu bir çizgi boyunca neredeyse homojen bir şekilde dağılmıştır. Haritalama görüntüleri neticesinde

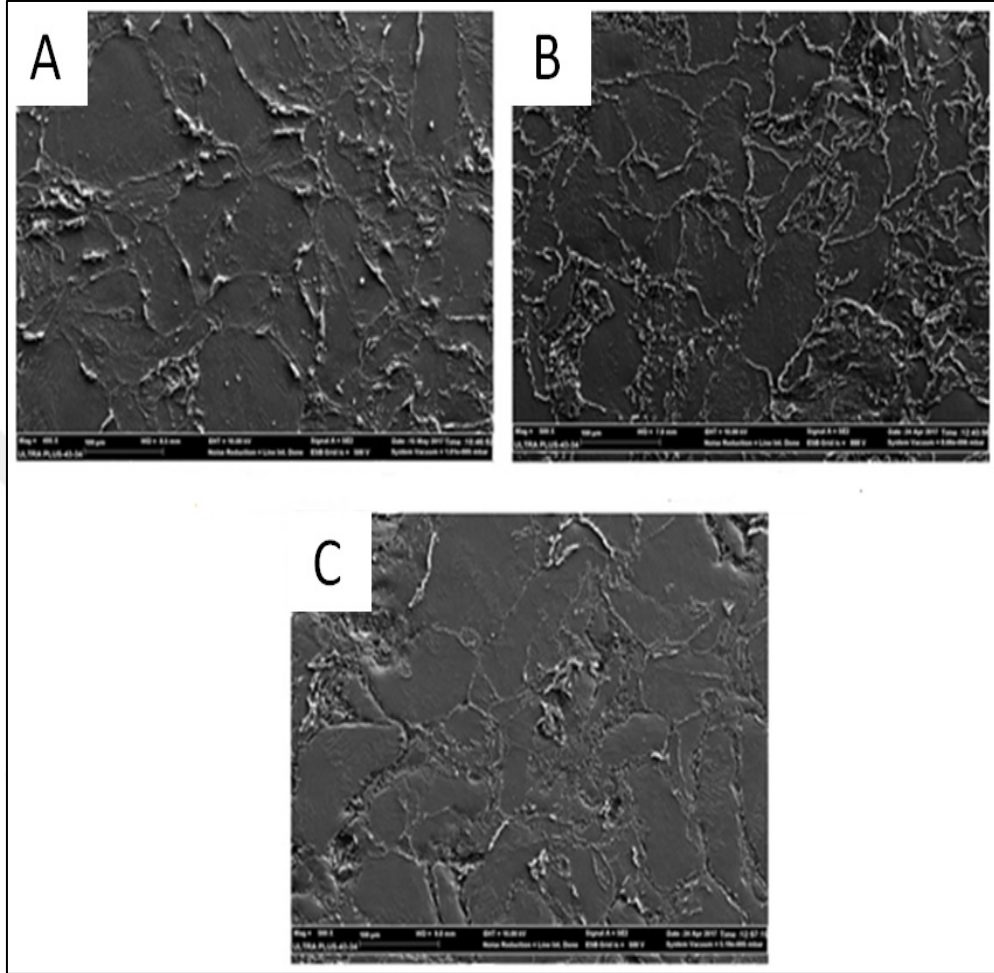
ise tane sınırlarının bazı bölgeleri hariç grafenin matris içinde homojen dağıldığı görülmüştür.



Şekil 6.6. Çizgi EDX ve haritalama görüntüleri (A-B-E) Saf Mg, (C-D-F) Mg-%0.25 GNP.

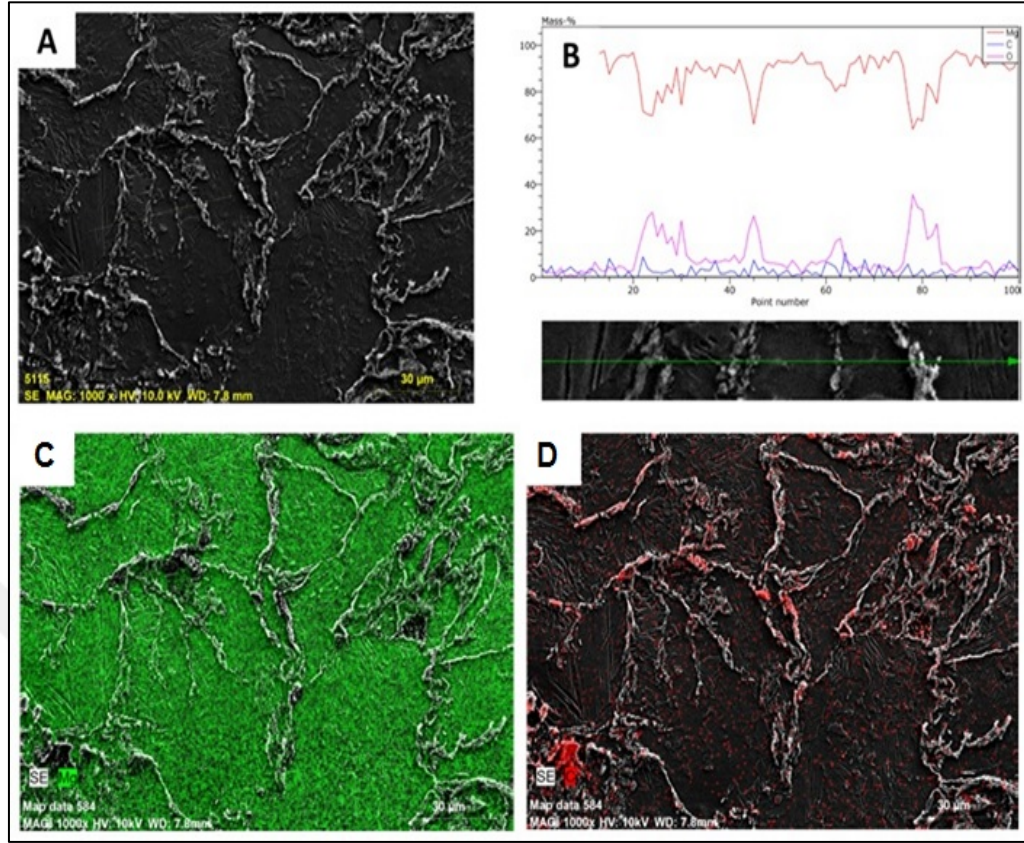
KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitlere ait SEM görüntüleri Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Ağırlıkça %0.1 KNT içeren kompozitte diğer numuneler gibi herhangi bir çatlak ve yeniden bağ oluşumu olmamakla beraber tane sınırlarında sinterleme sürecinde veya üretime hazırlık aşamasında meydana gelebilecek oksitlenmelerden dolayı mikroporlar oluşmuştur. %0.25 KNT takviyeli kompozitte KNT’nin uniform bir şekilde matris içerisinde yayıldığı görülmektedir. KNT takviyesi ağırlıkça %0.5’e ulaştığında ciddi aglomerasyonlar ve beraberinde oksitlenmeler olduğu görülmektedir. KNT’de grafene nazaran karbon atomları arasında güçlü van der waals bağları bulunmakta ve üretim aşamasında yüksek oranlarda KNT takviyesinde bu

bağların kırılması oldukça zor olmaktadır ve böylelikle matris içerisinde homojen dağılmasını engellemektedir.



Şekil 6.7. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-%0.1 KNT, (B) Mg-%0.25 KNT, (C) Mg-%0.5 KNT.

Şekil 6.8’de ağırlıkça % 0.25 oranında KNT içeren kompozite ait EDX ve haritalama görüntüleri verilmiştir. Düşük miktarda karbonun yapı içerisinde detekte edilmesi oldukça zor olmasına rağmen yapılan bu mikroyapı analizi neticesinde zaman oksijen piklerinde artış görülse de karbon piklerinde çok bir değişim görülmemiştir. Fakat haritalam sonucunda bazı bölgelerde karbon atomunun yoğunlaştığı tespit edilmiş fakat kabul edilebilir düzeyde olması karbon nanotüplerin ağırlıkça % 0.25 oranında homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir.

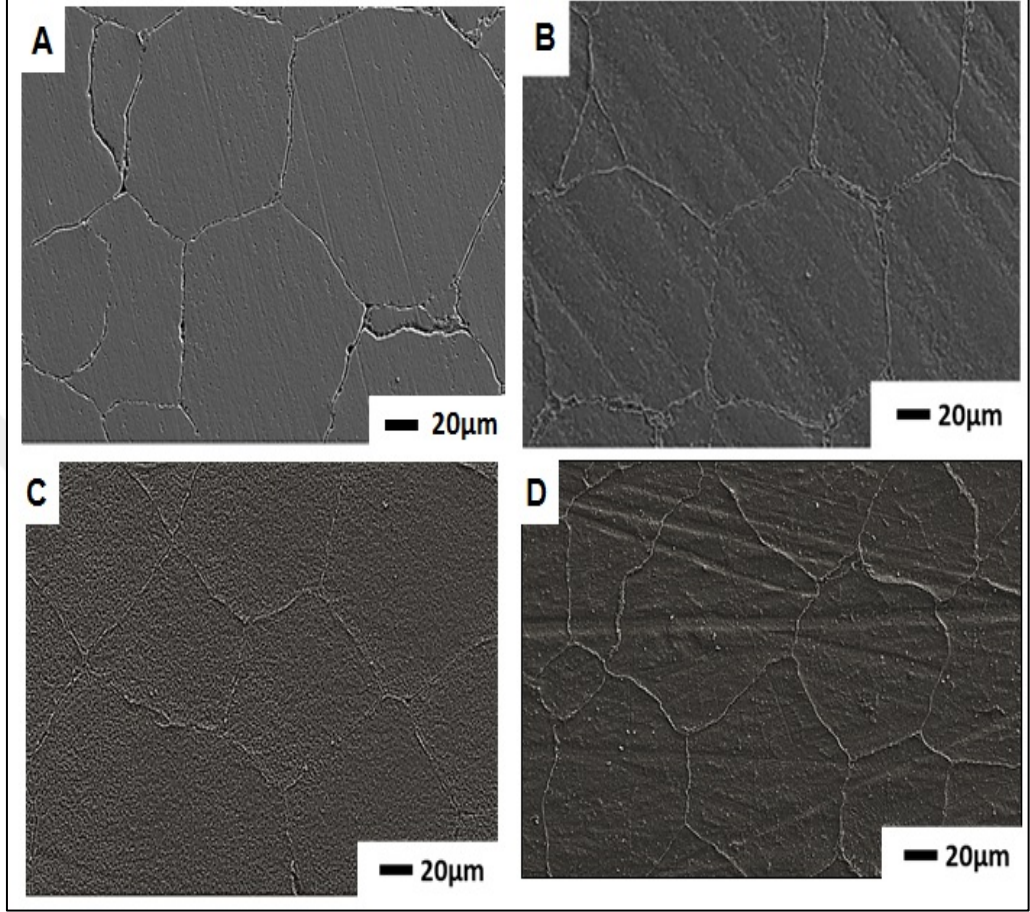


Şekil 6.8. Mg-%0.25 KNT kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.

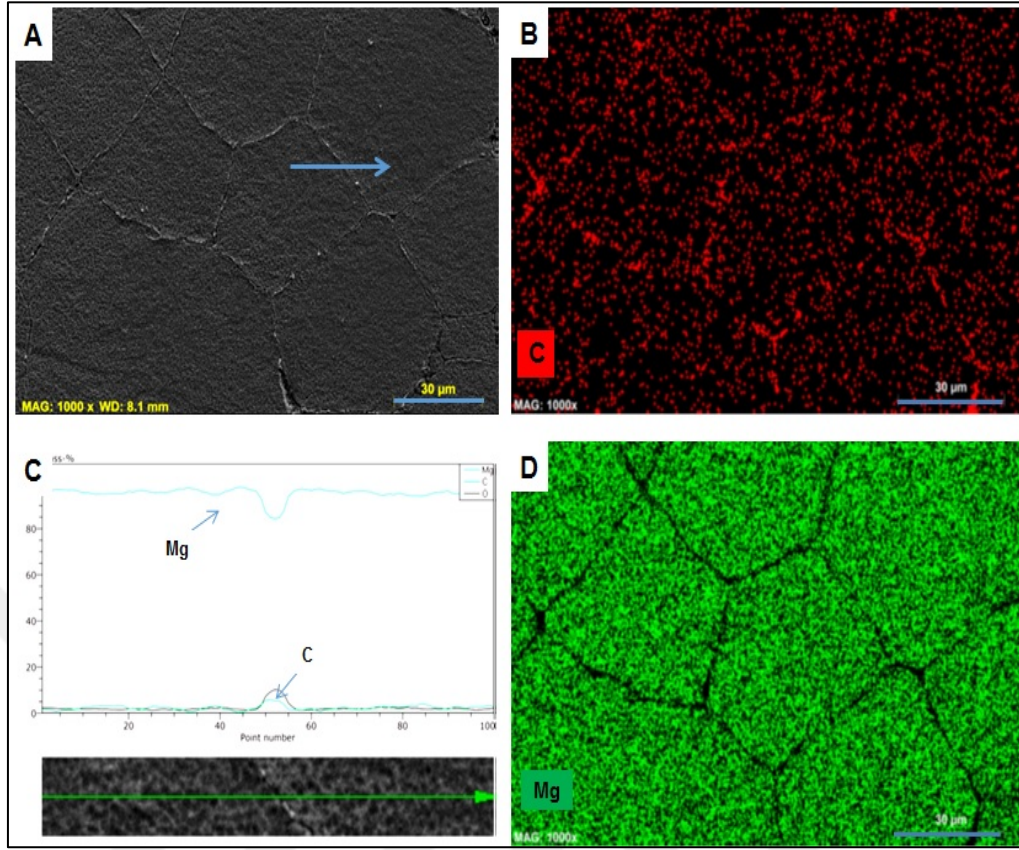
Şekil 6.9 ve 6.10 C60 takviyeli magnezyum matris kompozitlere ait SEM ve EDX görüntülerini sunmaktadır. Saf magnezyumda tane sınırları oldukça temiz görülmekle beraber herhangi bir oksitlenme ya da kırılmalar görülmemiştir. Bunun dayanağı olarak magnezyum partikülleri arasındaki iyi metalurjik bağlanmalar öne sürülmektedir [65,66]. Düşük oranlarda fulleren takviyeli numunelerde karbonların matris içerisindeki dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Karbon takviyesi 0.5% oranlarına çıktığında kısmi agglomerasyon görülmektedir. Ayrıca özellikle %0.5 oranında fulleren içeren numunede toz hazırlama veya sinterleme aşamasında oluşmuş ufak tefek poroziteler mevcuttur.

Şekil 6.10'da 0.25% oranında fulleren içeren kompozite ait çizgi EDX ve haritalama görüntüsü verilmiştir. Tane sınırlarında fullerenin kısmi birikiminin olduğu kısımlarda magnezyum pikinde azalma oksijen pikinde artış görülmektedir. MgO formunun olduğu ve ayrıca bu bölgelerdeki karbon trendlerinde bir düzensizlik görülmektedir. Fakat çizgi genelinde karbon pikinde ciddi bir değişiklik söz konusu

değildir. Genellikle matris içerisinde karbon ile magnezyum arasında iyi bir kimyasal bağın olduğu söylenebilir.



Şekil 6.9. Fulleren takviyeli magnezyum matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Saf Mg, (B) Mg-%0.1 C60, (C) Mg-%0.25 C60, (D) Mg-%0.5 C60.

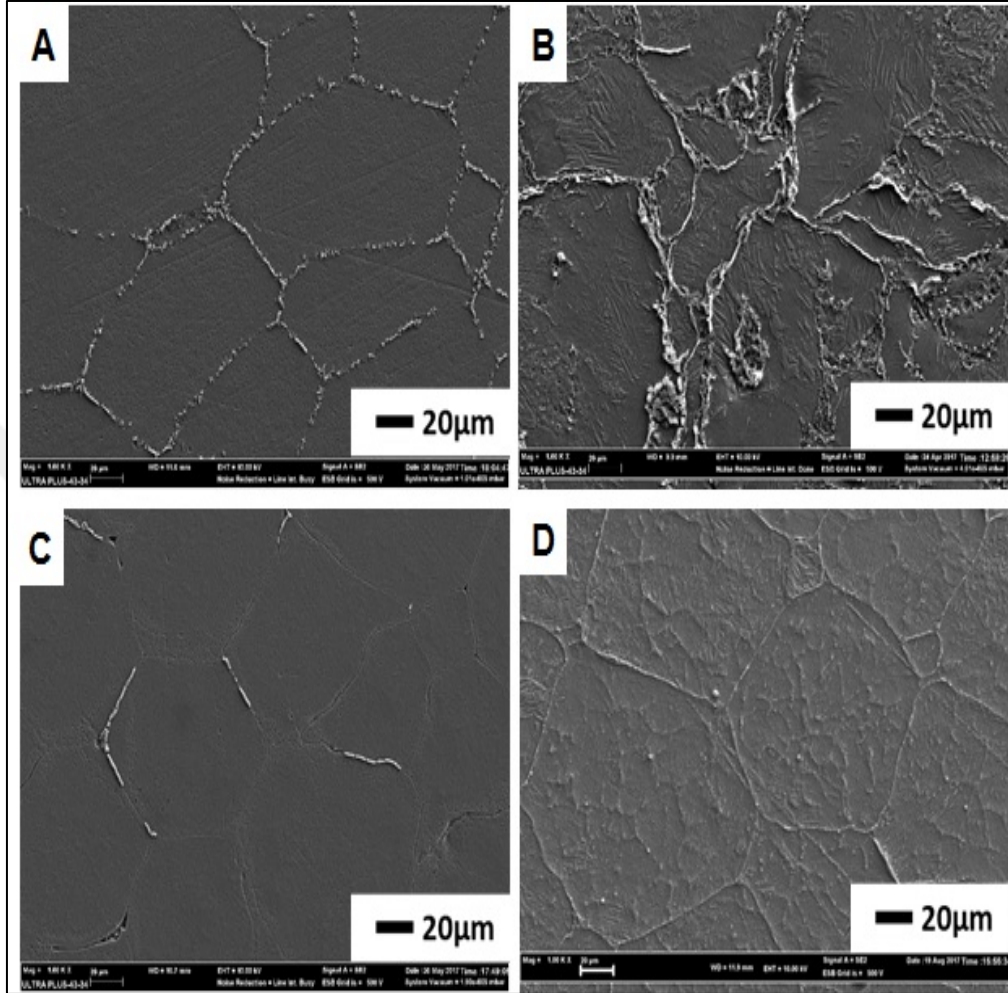


Şekil 6.10. Mg-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.

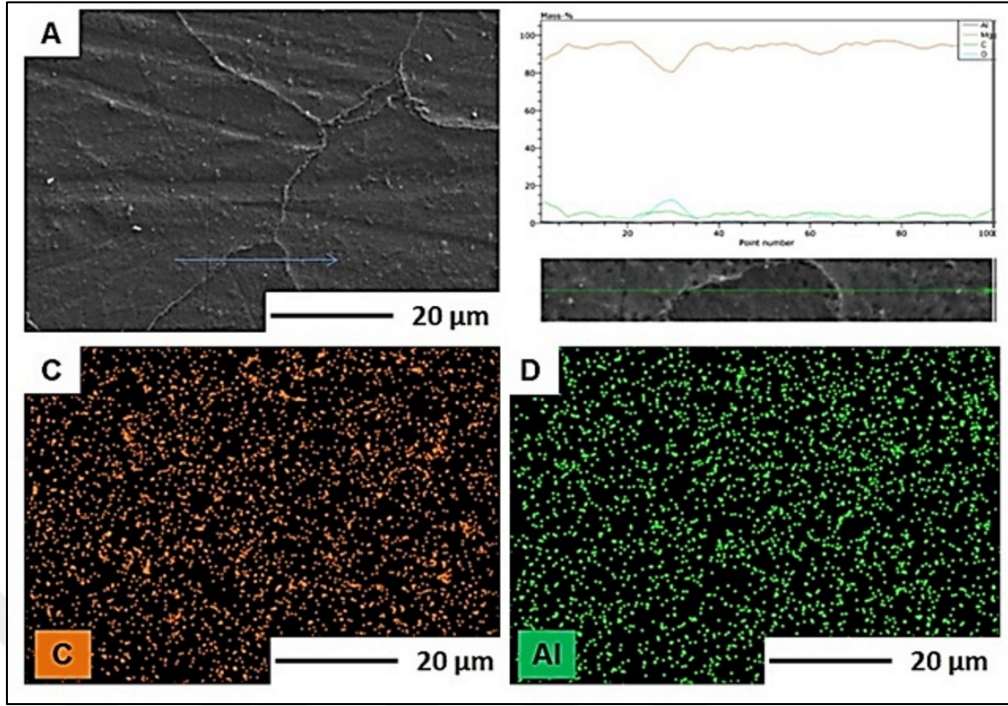
Şekil 6.11’de Mg-3Al serisi kompozitlere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Karbon miktarlarının düşük olmasından dolayı yapıda özellikle grafen ve fulleren için karbon atomlarının varlığı net bir şekilde belli olmamaktadır. Ayrıca $MgxCy$ ya da $MgxAlxCy$ gibi intermetalik bileşiklerin var olup olmaması hem XRD yöntemiyle hem de mikroyapı analizleriyle tespit edilememiştir. Fakat literatür araştırmalarına göre karbon bazlı nanopartikül takviyeli kompozit sistemlerde 773 °K in üzerinde sinterleme gerçekleşiyorsa ve alüminyum miktarının %6 ‘dan fazla olması durumunda malzemede Al_2MgC_2 gibi karbürlü bileşikler oluşmaktadır [67,68]. Fakat Mg-Al matrisli kompozitlerde herhangi bir ara faza SEM incelemeleri neticesinde ulaşamadığı gibi, Mg-Al-Fulleren (Şekil 6.13-6.15) serisi kompozitte yapılan TEM incelemelerinde de herhangi bir karbürlü yapıya rastlanmamıştır.

Mg-3Al-Fulleren kompozitine ait EDX ve haritalama görüntüleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Karbon ve alüminyum elementlerinin yapıda homojen bir şekilde karıştığı net bir şekilde görülmektedir. Takviyenin uniform bir şekilde dağılması magnezyum

matris ile fulleren arasında güçlü bir bağın olduğu ve bu bağında kompozitin mekanik özelliklerine olumlu etki sunduğu ön görülmektedir [57].

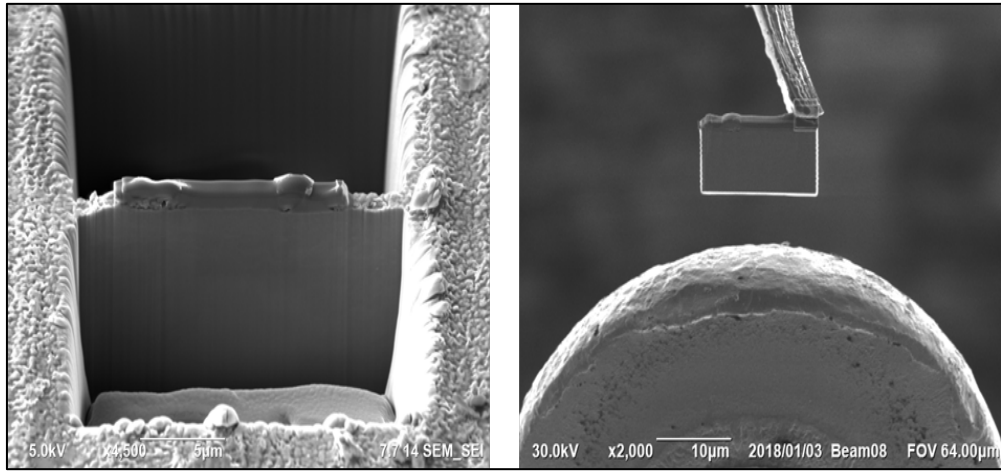


Şekil 6.11. Karbon takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-3Al, (B) Mg-3Al- %0.25 KNT, (C) Mg-3Al- %0.25 GNP, (D) Mg-3Al- %0.25 C60.



Şekil 6. 12. Mg-3Al-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri

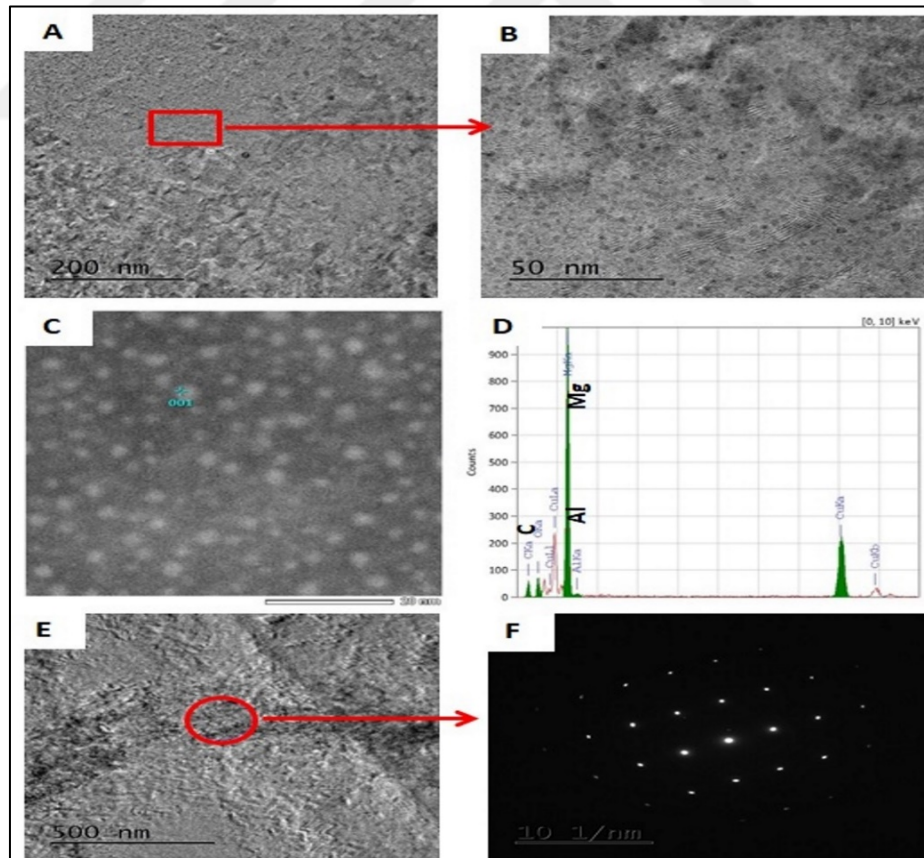
SEM görüntülerine ek olarak Mg-Al-% 0.5 fulleren numunesi için TEM analiz yapılmıştır. Numune FIB (Focussed Ion Beam) tekniğine göre hazırlanmıştır. FIB tekniğinin en önemli avantajı, mikroyapı üzerinden numunenin belirli bölgelerinden örnekler almaya olanak sağlamasıdır [69,70]. Alınan örnek bakır ızgara (grit) üzerine alınıp TEM incelenmesine tabii tutuldu. Hazırlanan numuneye ait görüntü Şekil 6.13’de verilmiştir.



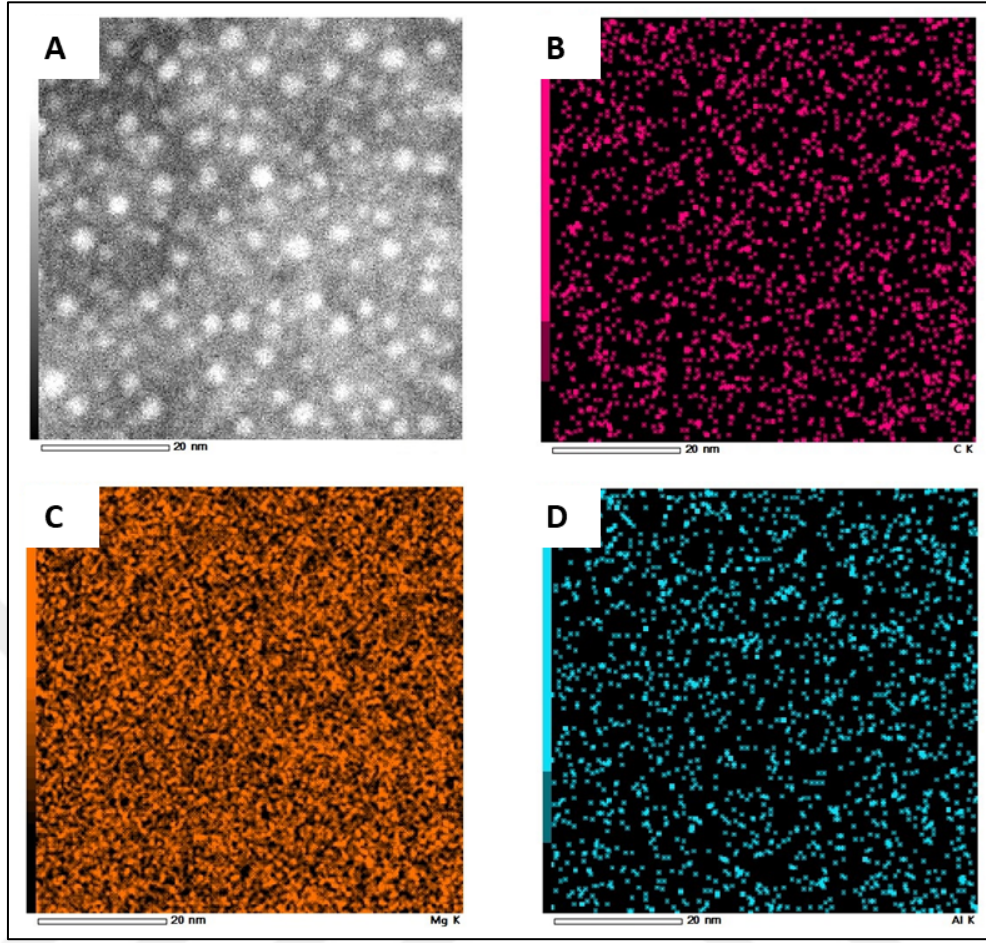
Şekil 6.13. TEM numunesinin FIB tekniğiyle hazırlanması

Yapılan TEM analizi ile numune içerisinde fullerenin bulunduğuna dair inceleme yapılmıştır. Şekil 6.14'te verilmiş olan STEM EDX sonucuna göre yapıda karbona ait pik bulunmuştur. Ayrıca numunenin farklı bölgelerinde yapılan incelemeler neticesiyle fullerenin tespit edildiği de görülmektedir.

TEM incelemelerinin bir diğer amacı ise Mg-Al matrisi arasında veya bu matrisle fulleren takviyesi arasında meydana gelebilecek olası bileşiklerin ve fazların yapıda bulunup bulunmadığının tespit edilmesidir. Bu bağlamda numunenin farklı bölgelerinde yapılan analiz sonucuna göre çıkartılan difraksiyon patternleri (Şekil 6.14 e-f) hegzagonal magnezyuma ait olup ekstradan bir bileşik oluşmamıştır. Benzer sonuç Rashad ve arkadaşlarının grafen takviyeli Mg-1Al-KNT+GNP kompozitinde ortaya koymuş oldukları sonuç ile tutarlıdır [65]. Ayrıca Şekil 6.15'te verilen STEM haritalama tekniğiyle karbonun yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiş ve SEM sonuçlarını desteklemiştir.



Şekil 6.14. TEM ve STEM EDX sonuçları.

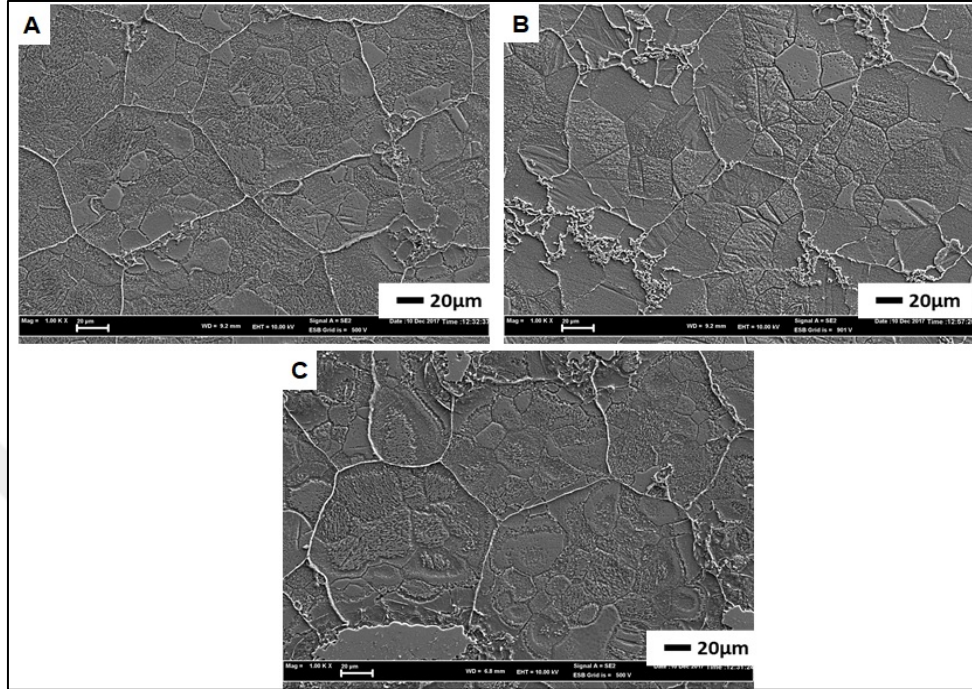


Şekil 6.15. STEM Haritalama görüntüleri.

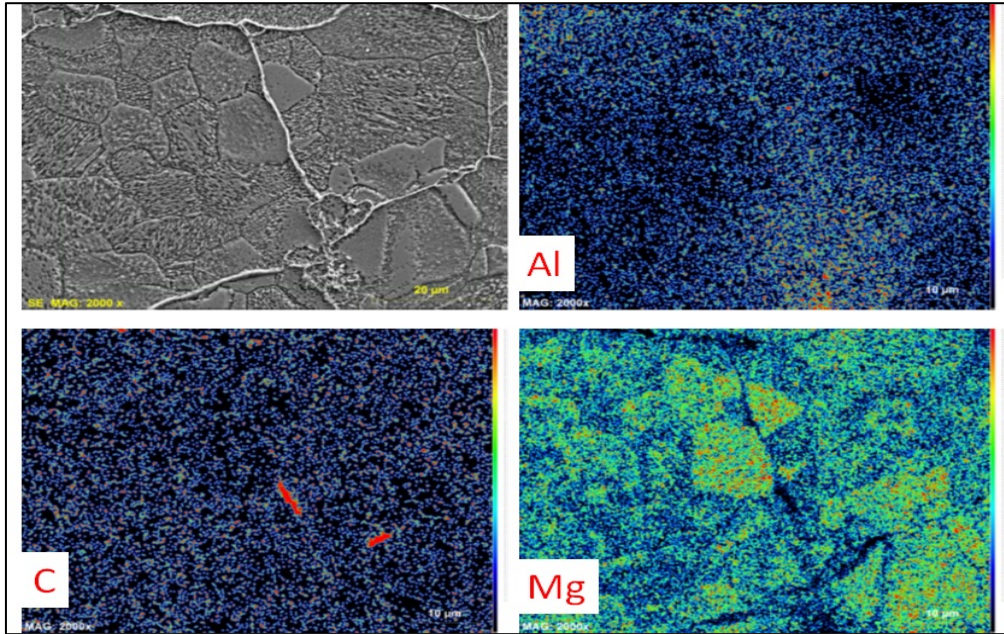
Şekil 6.16’da Mg-9Al matrisli KNT, GNP ve C60 takviyeli kompozite ait SEM görüntüleri verilmiştir. Mikroyapıda herhangi bir poroziteye veya çatlaklara rastlanılmamış ve temiz bir yüzey görülmektedir. Diğer numunelerde olduğu gibi karbon oranının çok düşük olmasından dolayı mikroyapıda net bir şekilde görülememektedir. Mg-3Al ve Mg-9Al serisi kendi aralarında kıyaslandığında, Mg-9Al matrisli kompozitlerde alüminyumun daha belirgin bir şekilde yapı içerisinde dağılmış olduğu gözlemlenmiştir.

Mg-9Al matrisli kompozitlerde $Mg_{17}Al_{12}$ veya $MgAlC$ gibi bileşiklere rastlanmamıştır. Tane sınırları oldukça net görülmekte ve alüminyum partikülleri bu bölgelerde daha yoğun bulunmaktadır. Şekil 6.17’de grafen takviyeli Mg-9Al matrisli kompozite ait EDX ve haritalama görüntüleri sunulmuştur. Genel olarak karbonun ve

alüminyumun homojen olarak dağıldığı görülmekte fakat bir iki noktayı kırmızı olarak belirtilmiş karbon topaklanmasına ait detay verilmiştir.



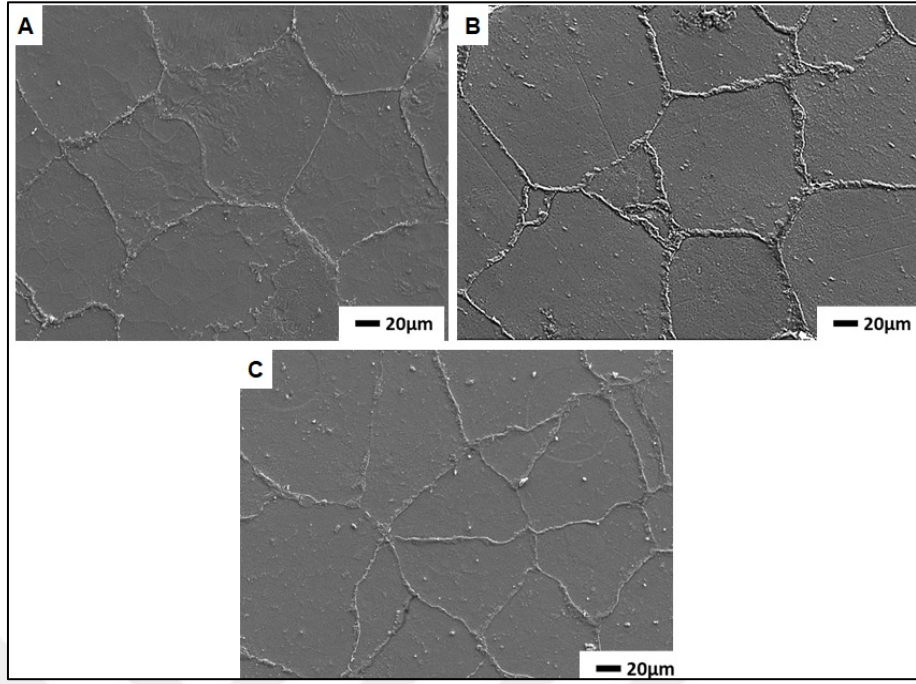
Şekil 6.16. Karbon takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-9Al-%0.25 GNP, (B) Mg-9Al-%0.25 KNT, (C) Mg-9Al-%0.25 C60.



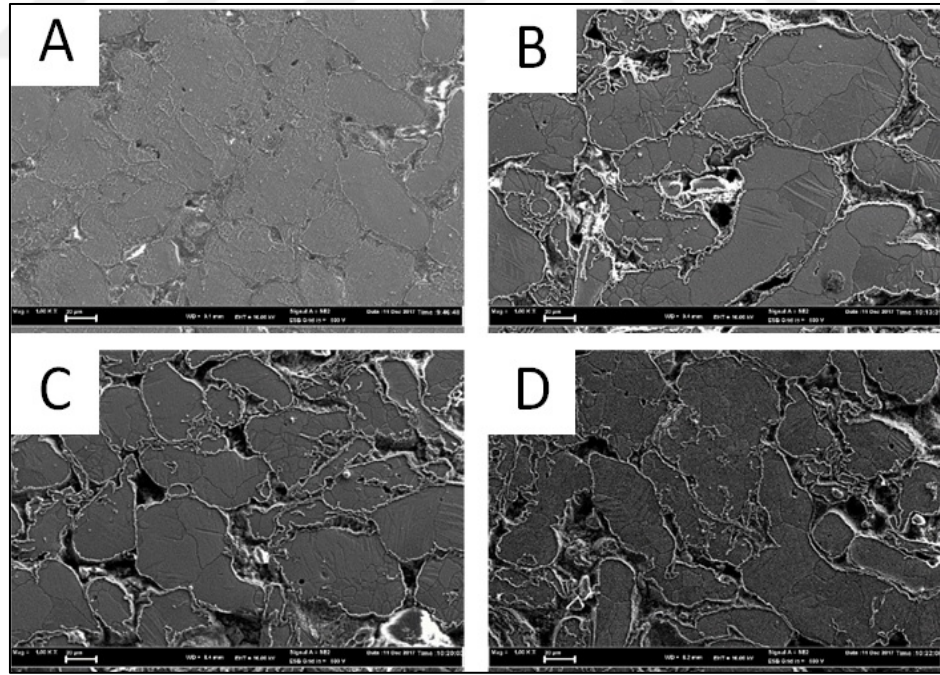
Şekil 6.17. Mg-9Al-%0.25 GNP kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.

Mg-Zn matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait SEM görüntüsü Şekil 6.18’te verilmiştir. Grafen takviyeli kompozitte herhangi bir topaklanma ya da por oluşumu gözlemlenmezken, karbon nanotüp takviyeli kompozitte tane sınırlarında topaklanma ve fulleren takviyeli kompozitlerde sinterlemeden kaynaklı mikropor oluşumu mevcuttur. Mg-Zn matrisli kompozitlerde mg-zn faz dağılımı düşük oranlarda çinkonun bulunmasından dolayı net bir şekilde gözlemlenememiştir. Ayrıca bu seride de Mg-Al serisi kompozitlerde olduğu gibi tek bir oranda karbon nanopartikül denenmiştir. Rashad ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmaya göre Mg-Zn fazları tane sınırlarında görülmüş ve grafen oranının artmasıyla bu faz dağılımının tane incelme etkisinden dolayı daha net bir şekilde açığa çıktığını iddia etmişlerdir [71].

AZ31 matrisli kompozitlere ait SEM görüntüsü Şekil 6.19’da verilmiştir. Düşük sinterleme sıcaklıklarında malzemeler üretilmiş ve hem sürenin hem de sıcaklığın etkisiyle bazı bölgelerde oksit oluşumu görülmüştür. Yine aynı şekilde karbon nanotüp takviyeli kompozitte topaklanmalar daha belirgin halde görülmektedir. Bunun sebebi hem ultrasonik ile titreşim aşamasında karbon atomları arasındaki güçlü kovalent bağlarının kırılmaması hem de manyetik karıştırıcı ile karışım neticesinde homojenitenin yakalanamaması öngörülmektedir. Ayrıca tane sınırlarının yüksek enerjili olması buralarda nanopartiküllerin birikmesine de sebep olabilmektedir.



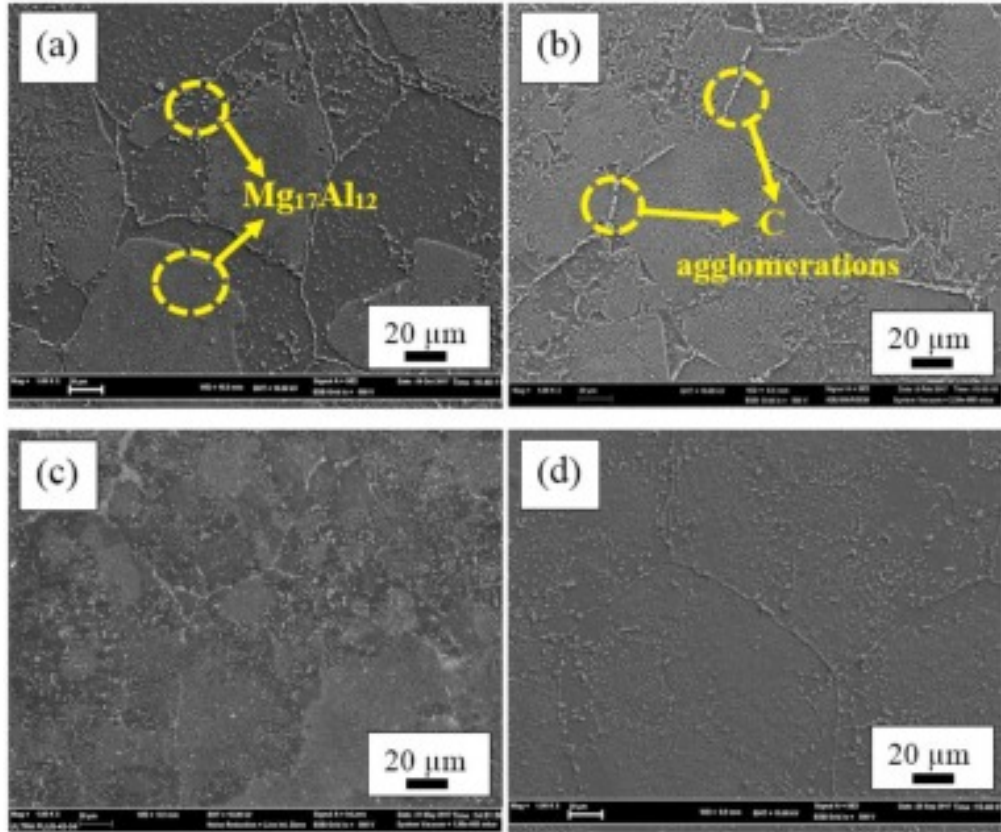
Şekil 6.18. Karbon takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) Mg-1Zn-%0.25 GNP, (B) Mg-1Zn-%0.25 KNT, (C) Mg-1Zn-%0.25 C60.



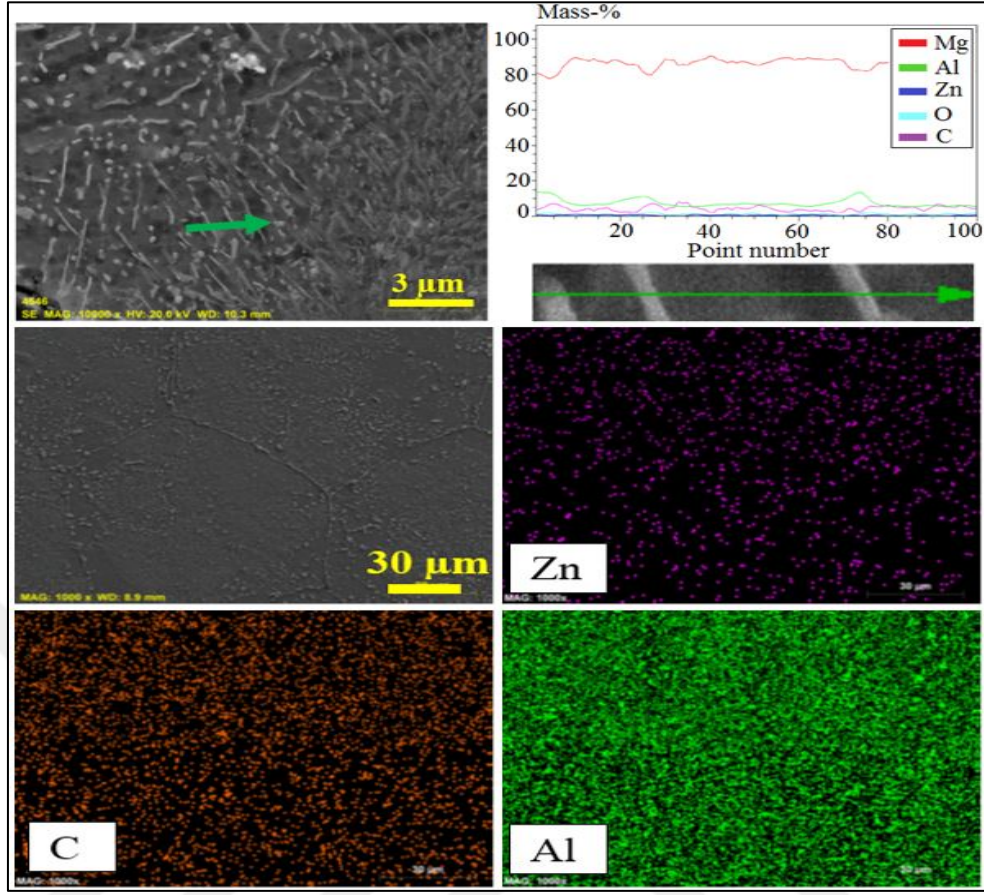
Şekil 6.19. AZ31 matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) AZ31, (B) AZ31- %0.25 KNT, (C) AZ31-%0.25 GNP, (D) AZ31- %0.25 C60.

Şekil 6.20’de AZ91 matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Genel olarak yapı içerisinde ötektik β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazları açıkça görülmekte ve özellikle tane içinde bu faz oluşumu tespit edilmektedir. Süreksiz β çökeltileri ise tane içinde bulunmakta ve tanelerin çevresinde ötektik fazlar görülmektedir. Bu fazlar magnezyum ve alüminyum arasındaki reaksiyon sonucu üretilmektedir.

Şekil 6.21’de fulleren takviyeli AZ91 matrisli kompozite ait EDX ve haritalama görüntüleri verilmiştir. Fulleren takviyeli kompozitlerde, matris ve takviyeler arasındaki iyi kimyasal bağın veya karbon atomları arasındaki metalurjik bağın bir sonucu olarak takviye elemanlarının matris içerisinde iyi dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu uniform dağılım efektif dolgu malzemelerinin (karbon nanopartiküllerin) yüksek mukavemet sağlayarak kompozitlerin deformasyonun önlemede büyük önem arz etmektedir.



Şekil 6.20. AZ91 matrisli kompozitin SEM görüntüsü (A) AZ91, (B) AZ91- %0.5 KNT, (C) AZ91- %0.5 GNP, (D) AZ91- %0.5 C60.



Şekil 6.21. AZ91-%0.25 C60 kompozitine ait çizgi EDX ve haritalama görüntüleri.

6.4. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

6.4.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Sertlik Davranışına Etkisi

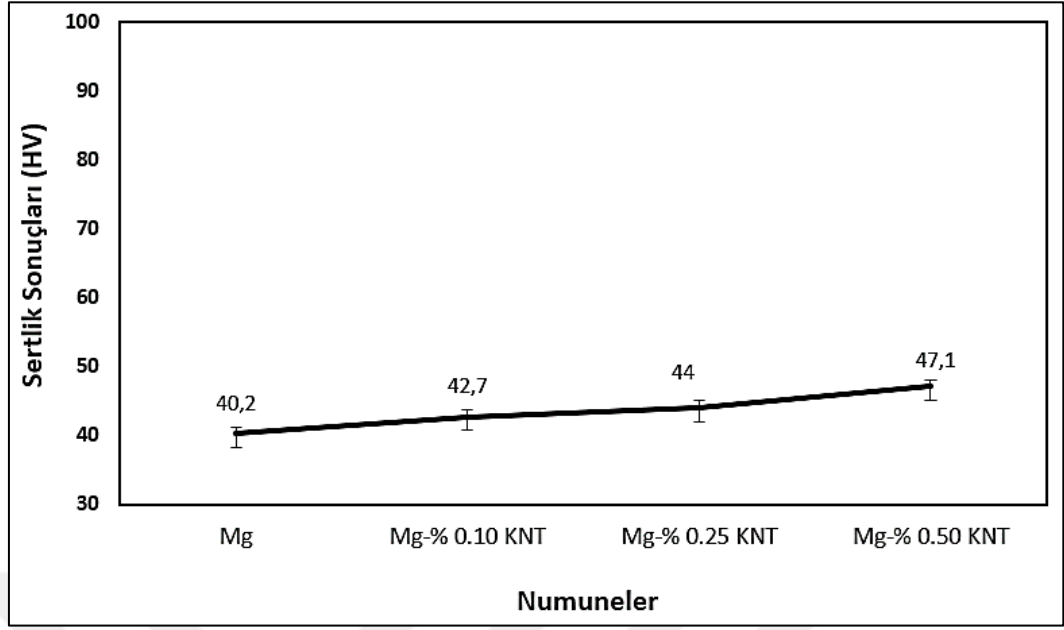
HV05 metodu uygulanarak 15 saniye süreyle vickers sertlik ölçümleri yapılmış. 5 adet ölçümün ortalaması kaydedilmiştir.

Genellikle, karbon miktarıyla sertlik orantılı bir şekilde artış göstermiştir. KNT, GNP ve C60 takviyeli saf magnezyum matrisli kompozitler incelendiğinde, en yüksek sertlik artışı C60 takviyeli kompozite aittir. Sertlik artışının sebebinin dayanağı olarak aşağıdaki faktörler gösterilebilir.

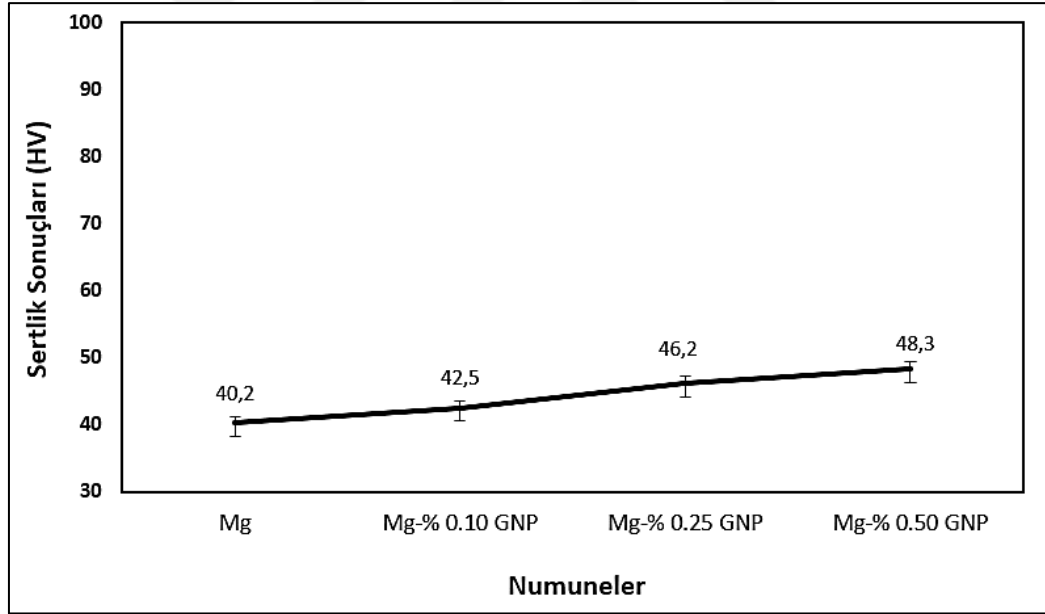
- Yapıya daha sert partiküllerin ilavesi edilmesi
- Partikül takviyesiyle dislokasyon hareketlerinin engellenmesi
- Takviye ile birlikte tane incilmesi [66]

Karbon nanopartiküllerin artışıyla sertlikte artış görülmüştür. Fakat bazı numunelerde ağırlıkça %0.1 takviyeden %0.25 takviye çıkarken gösterilen artışın, %0.25'ten %0.5'e çıkarılmasında gösterilen performanstan daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle KNT takviyeli kompozitlerde daha yaygın görülmektedir. Bunun sebebi olarak KNT'nin matris içerisindeki dağılım durumunun diğer takviyelere göre daha az uniform oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

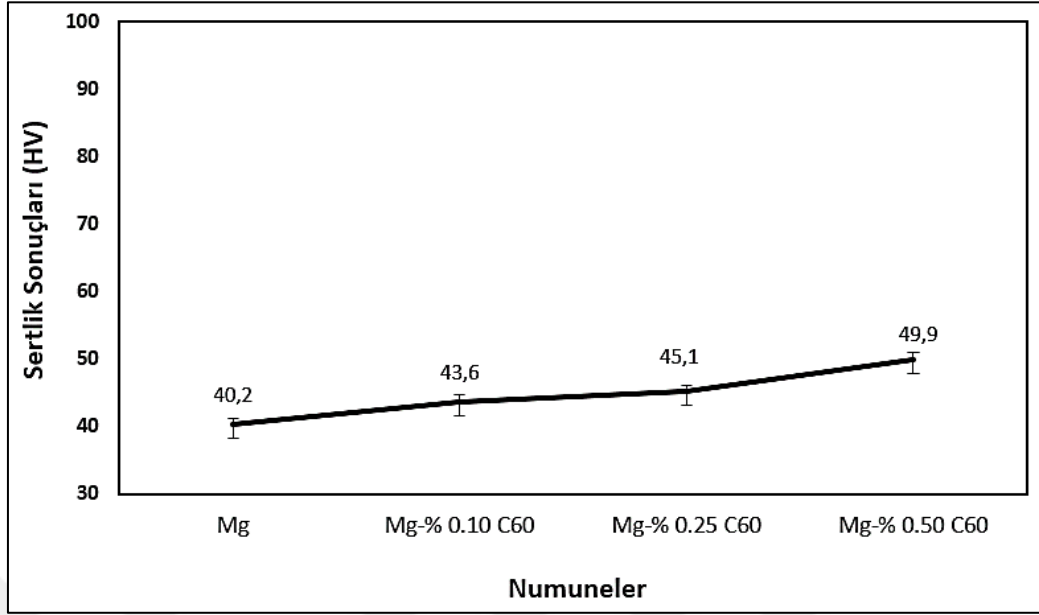
Saf magnezyum 40.2 HV sertlik değerine sahipken ağırlıkça %0.5 oranında KNT dahil edilmesiyle bu sertlik değeri 47.1'e, aynı oranda GNP ilavesiyle 48 HV'ye çıkmış ve C60 takviye edildiğinde 49.9'a ulaşmıştır. Böylelikle magnezyum matriste çok düşük oranlarda karbon nanopartikül kullanımı yaklaşık %25'lik bir artış sağlamıştır. Bu artışların sebebi, sert karbon nanopartiküllerin sisteme girmesiyle homojenliğin bozulup yeni metalurjik bağ oluşumuna olanak sağlayarak malzemede dislokasyon yoğunluğunu arttırmalarıdır. Bu dislokasyon yoğunluğundaki artıştan dolayı dislokasyonların hareket mekanizması zorlaşmakta ve mekanik özelliklerde artış gerçekleşmektedir.



Şekil 6.22. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 6.23. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.

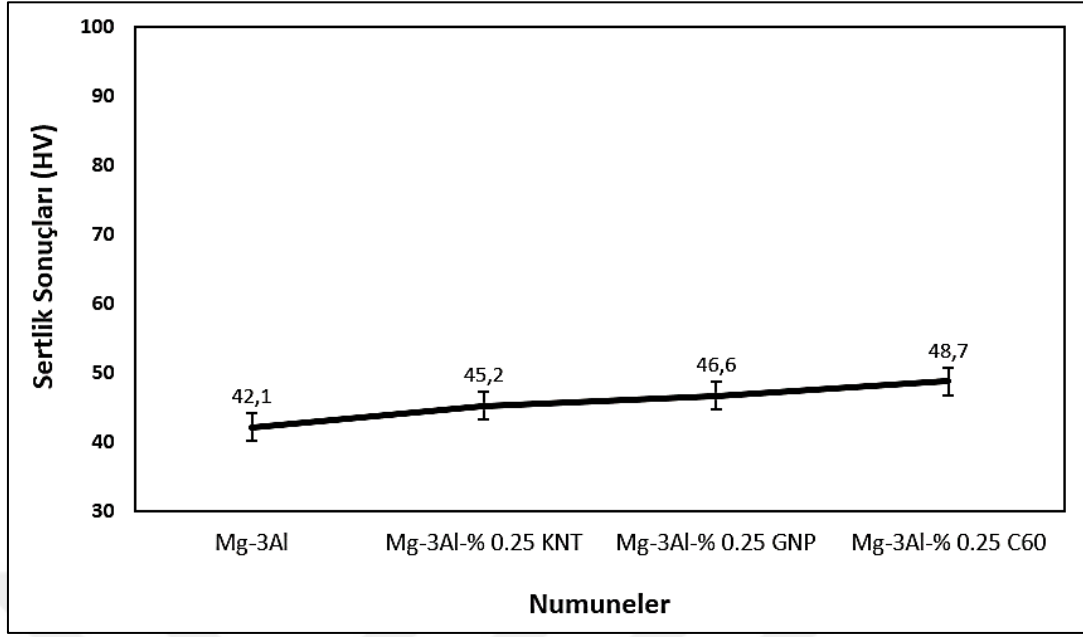


Şekil 6.24. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.

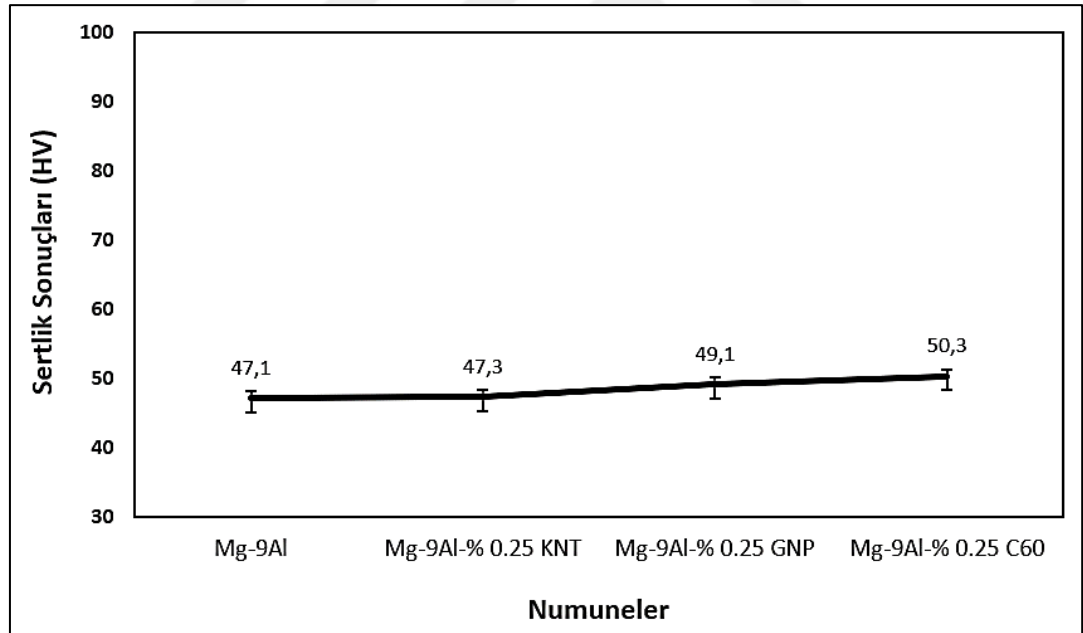
6.4.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Sertlik Davranışına Etkisi

Alüminyumun saf magnezyuma ilavesi matris ile karbon nanopartikül arasındaki bağı kuvvetlendirmiş ve ıslanabilirlik sağlanmıştır. Bunun neticesinde sertlik artışı görülmüştür. Fakat alüminyum miktarı %9 'a çıkarıldığında sertlik artışında ılımlı bir şekilde artış devam etmiştir. Tane sınırlarında alüminyumun topraklanmaya başlaması matris ile takviye arasında güçlü metalurjik bağı zayıflatmış ve bu durum daha yavaş bir artışa sebebiyet sunmuştur. Diğer yandan, matrise çinkonun ilavesi numunelerin sertlik performansına ekstra bir avantaj sunmamıştır. Bunun sebebi olarak alüminyuma kıyasla çok daha az oranda sisteme ilave edilmesi gösterilebilir.

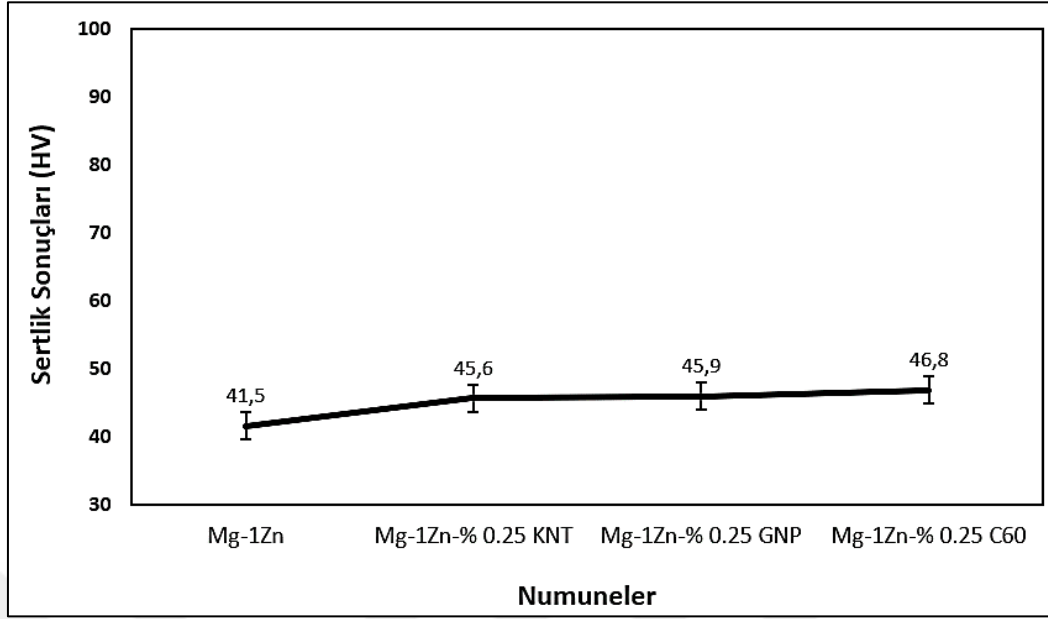
Mg-Al ve Mg-Zn serilerinde de saf magnezyumda olduğu gibi karbon nanopartiküllerin farklı oranlarda takviye edilmesiyle sertlikte kayda değer artışlar görülmüştür. Rashad ve arkadaşları [65,68], karbon nanopartiküllerin sertliği arttırmasındaki sebebi olarak yapıda matristen daha sert takviyelerin bulunmasıyla açıklamıştır. Bu sert yapılar, sertlik ucunun batması süresince bölgesel matris deformasyonu oluşumunda yüksek engellemeler sağlamaktadır.



Şekil 6.25. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 6.26. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



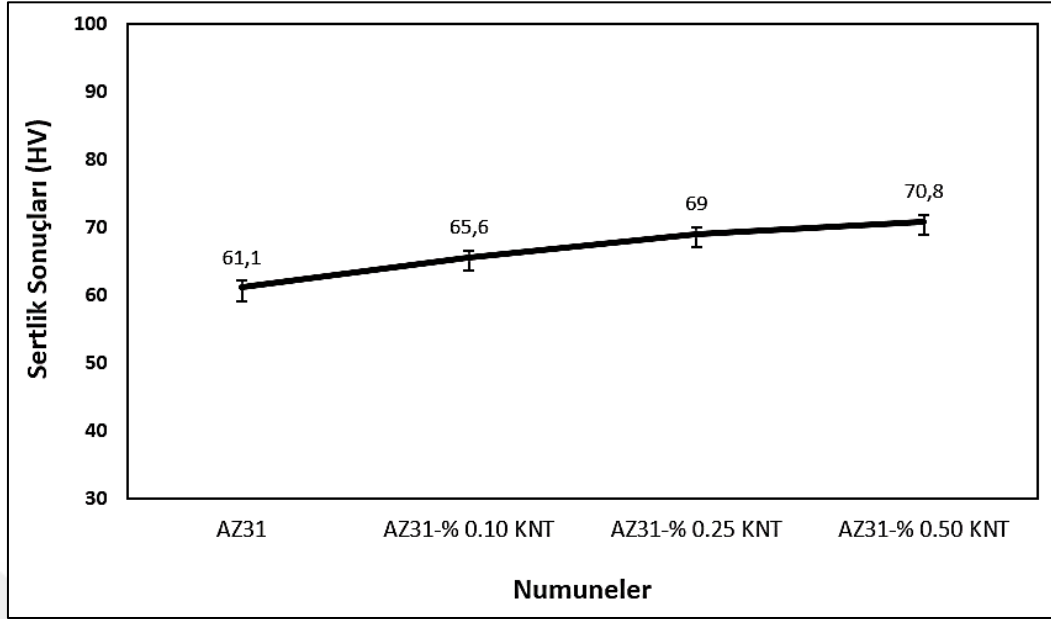
Şekil 6.27. Karbon Nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.

6.4.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Sertlik Davranışlarına Etkisi

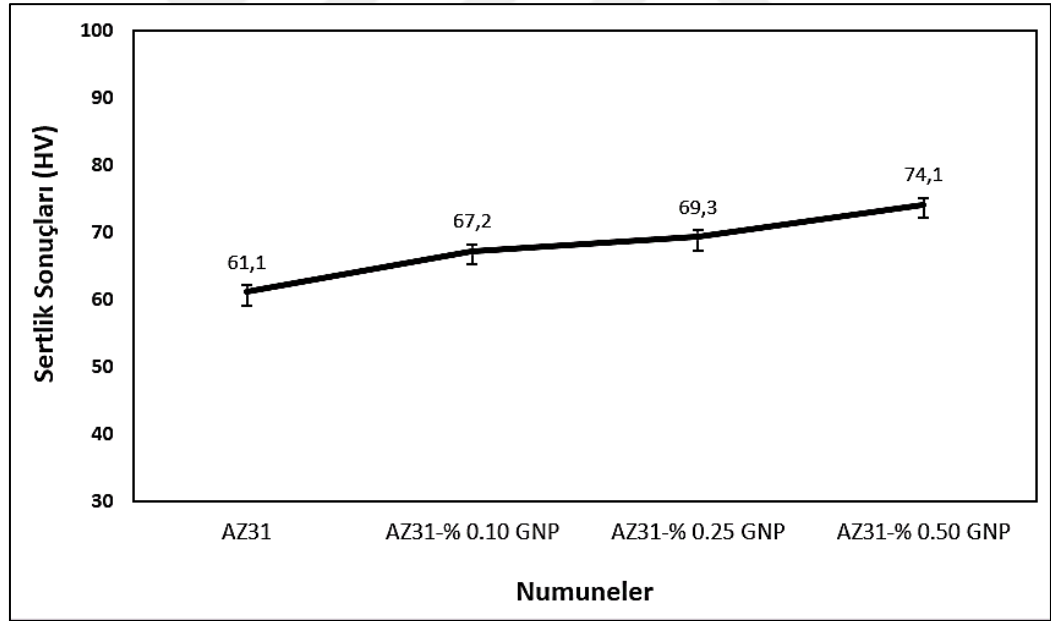
Saf magnezyum ve Mg-Al ile Mg-Zn alaşımlarında olduğu gibi AZ31 ve AZ91 magnezyum matrisli kompozitlerde de takviyelerle birlikte sertlikte önemli artışlar elde edilmiştir.

Belirli oranlarda karbon nanopartiküllerinin ilavesinin daha da artması özellikle AZ91 serilerinde sertlik artışında kayda değer bir etki sunmamıştır. Hatta KNT takviyesinde, %0.5 oranında AZ91 magnezyum alaşımına ilave edildiğinde sertlik değerinde düşüş görülmüştür. Bunun sebebi olarak, aglomerasyonun artması ve dolayısıyla matris ve takviye elemanı arasındaki bağ kuvvetinin zayıflaması olasılığı gösterilebilmektedir (Şekil 6.20).

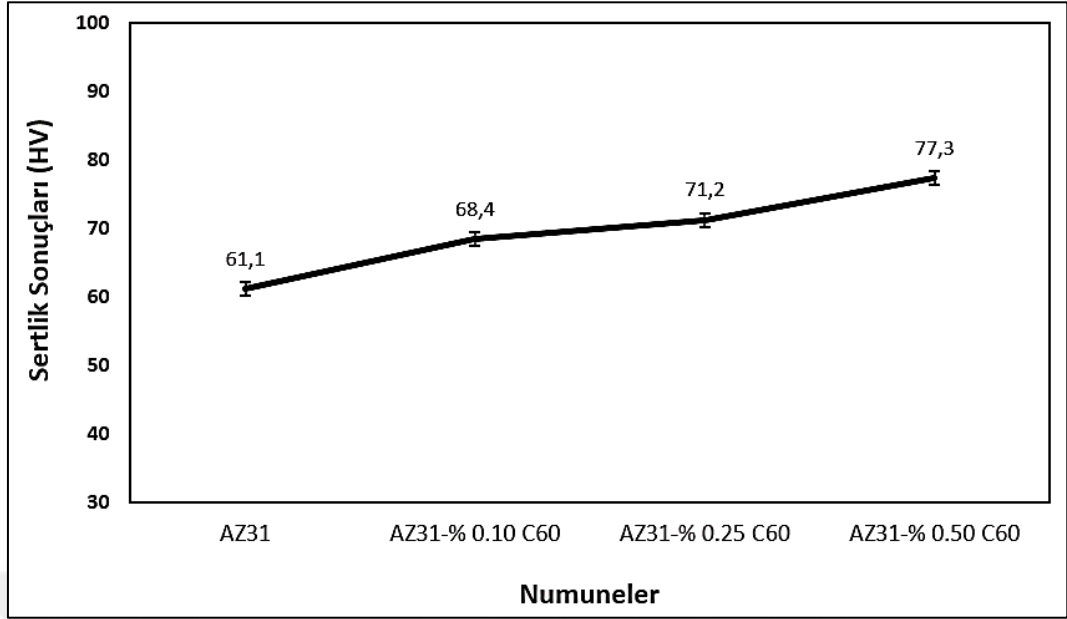
Genel olarak bakıldığında karbon nanotüpler daha güçlü van der waals bağlarına sahip oldukları için bu bağları kırmak daha zor olmakta ve özellikle tane sınırlarında malzemelerde topaklanma eğiliminde olmaktadır.



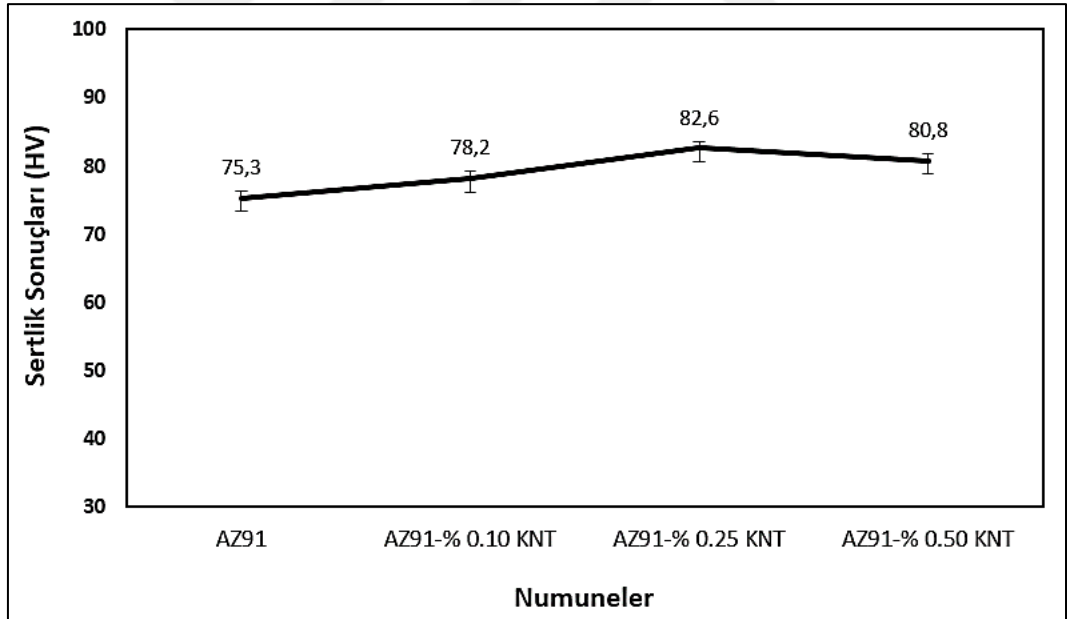
Şekil 6.28. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



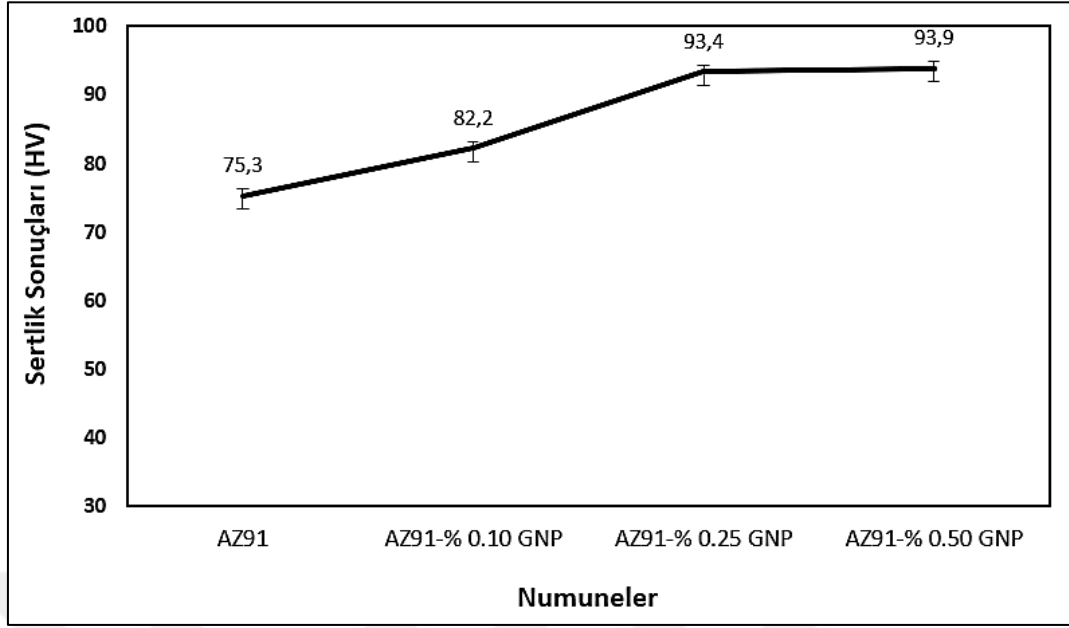
Şekil 6.29. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



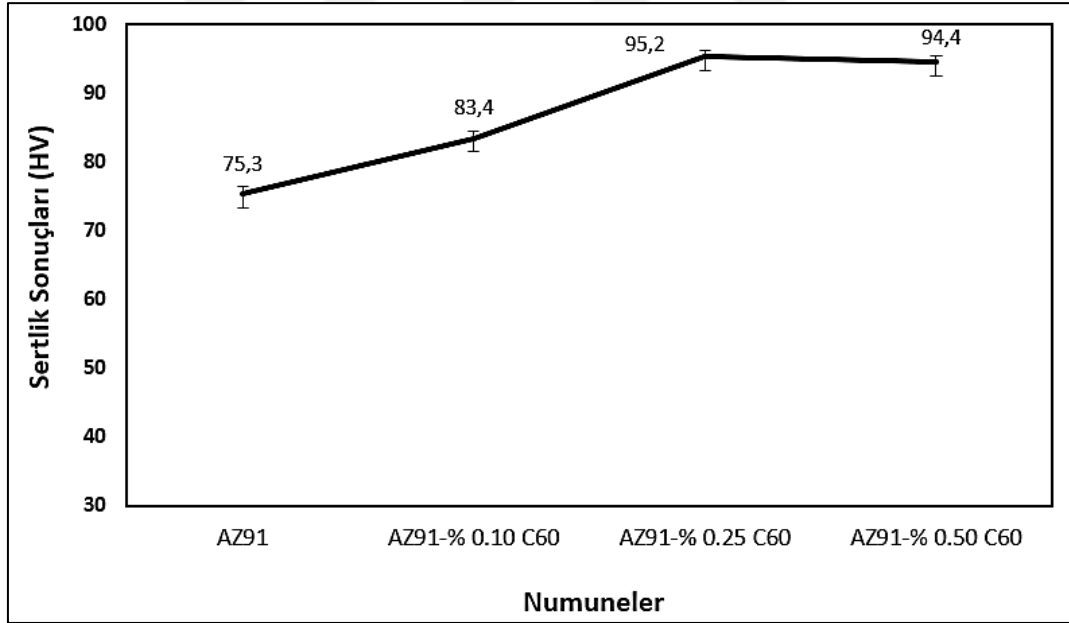
Şekil 6.30. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 6.31. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.

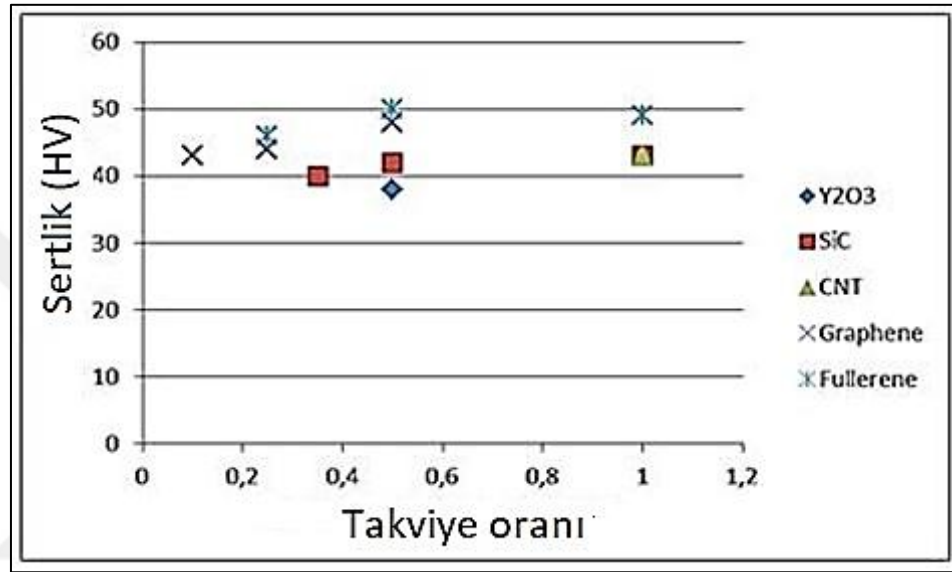


Şekil 6.32. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 6.33. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.

Karbon dışı ve karbon nanopartiküllerin magnezyum ve alaşımları üzerindeki sertlik performansı ile alakalı kıyaslama Şekil 6.34'te verilmiştir. Bu karşılaştırma yapılırken literatür araştırmalarında aynı yöntem ve aynı oranlarda kullanılan karbon dışı nano boyutta partiküller veri olarak kullanılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde fullerenin çok daha yüksek yüzey alanına sahip olmasından dolayı en iyi davranışı sergilediği görülmüştür.



Şekil 6.34. Nanopartiküllerin sertlik performansına etkisinin karşılaştırılması [72–76].

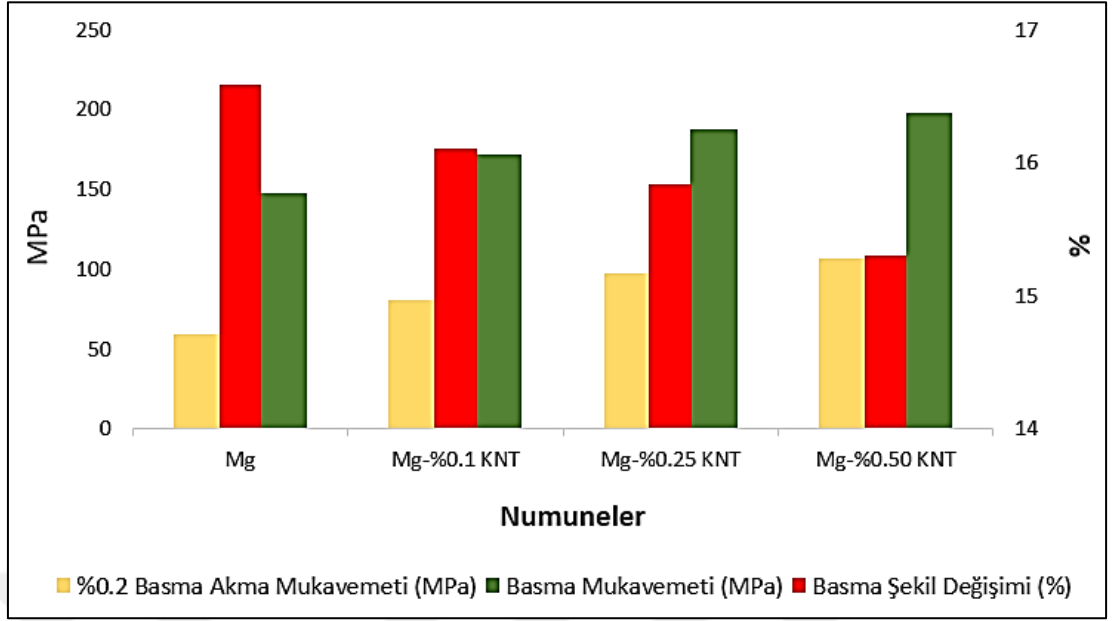
6.5. BASMA TEST SONUÇLARI

6.5.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Basma Mukavemetine Etkisi

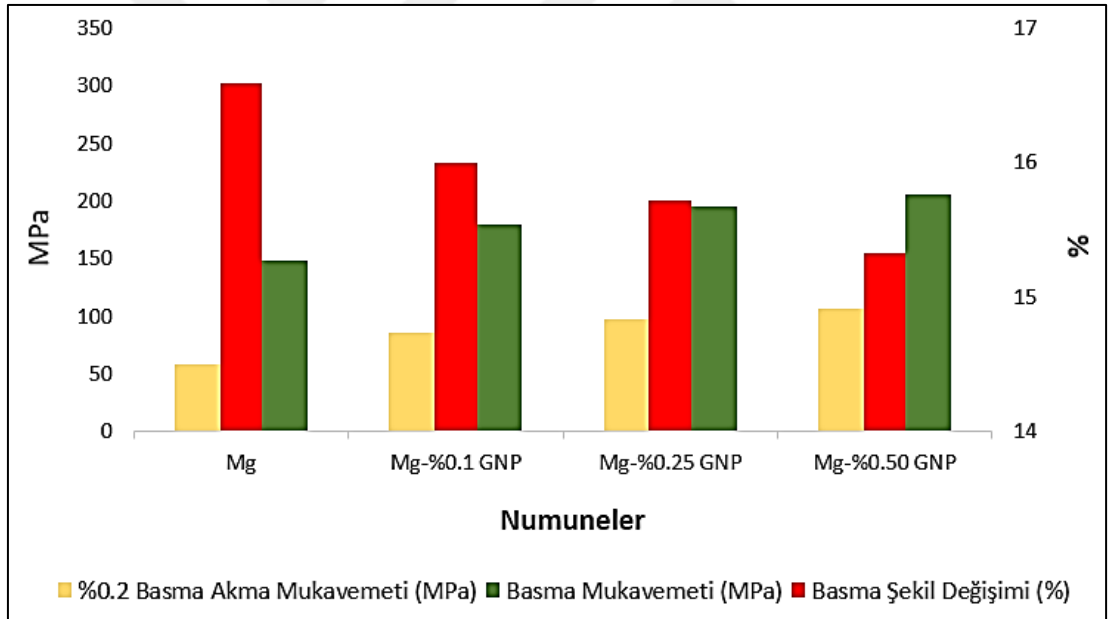
Karbon nanopartiküller farklı oranlarda magnezyum ve magnezyum alaşımlarına ilave edilmiş ve mekanik özelliklerini test etmek amacıyla basma testlerine tabii tutulmuştur. %0.2 lik basma akma gerilmesi, basma şekil değişim değerleri ve nihai basma mukavemet sonuçları elde edilmiştir. Şekil 6.35 ile 6.37 arasında saf magnezyum ve karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait basma test sonuçları verilmiştir. Basma sonuçları kıyaslandığında, karbon nanopartiküllerin ilavesi akma mukavemetini ve nihai basma mukavemetini ciddi oranda geliştirmiş ve basma şekil değişiminde de düşüşe neden olmuştur. Saf magnezyum ve magnezyum alaşımlarında

bu sert partiküllerin ilavesiyle mukavemet artışının gerçekleşmesinin sebebi aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

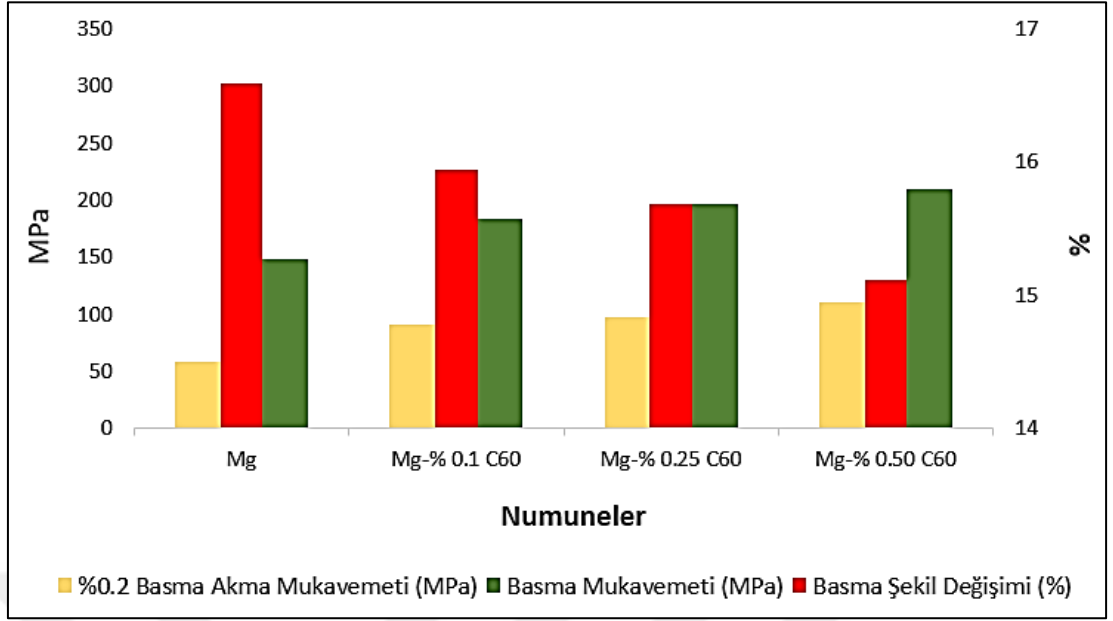
- Uniform dağılmış ve daha sert takviyeler dislokasyonların yoğunluğunu arttırmak için önemli bir role sahiptirler. Takviye parçacığının yüzey alanı dislokasyon yoğunluğunu etkilemektedir [77] . Nano boyutlu karbon nanotüp, grafen ve fulleren nanopartikülleri yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahiptir ve yapıda yer edinmeleriyle dislokasyon hareketini engellemektedirler. Bu durum, daha fazla dislokasyon göçünü engelleyecek olan back stress (arka gerilim) oluşumuna yol açmaktadır. Böylece mekanik özellikler geliştirilmektedir. Bu temel mekanizma orowan döngüsü olarak adlandırılmaktadır [78] .
- Yumuşak magnezyum ve alaşımlarından oluşan matriksten sert karbon nanopartikül takviyelerine doğru gerçekleşen yük transfer mekanizması, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde etkili olabilmektedir [79,80].
- Karbon nanopartiküller ve magnezyumun Elastik modül ve termal genleşme katsayıları arasındaki farklar artık gerilme oluşumuna yol açar ve matriks takviye arayüzeyinde, geometrik olarak gerekli dislokasyonlar üretmektedirler. Böylece dislokasyon hareketinin kısıtlanması gözlemlenebilmekte ve malzemenin mekanik performansı gelişmektedir [81] .



Şekil 6.35. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



Şekil 6.36. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



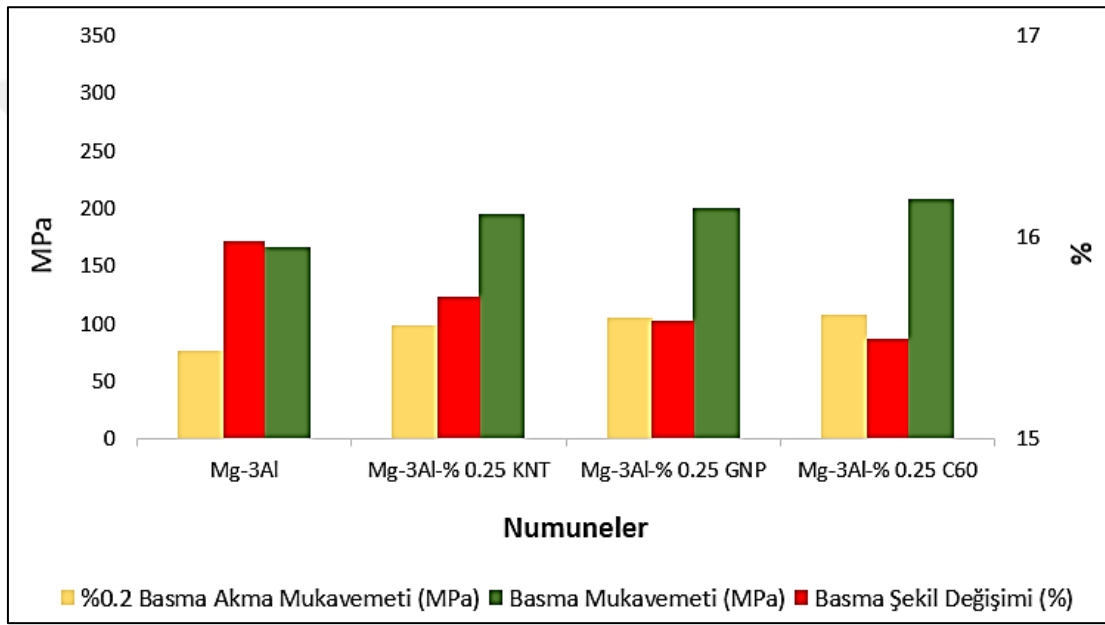
Şekil 6.37. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.

6.5.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn alaşım serisinin Basma Mukavemetine Etkisi

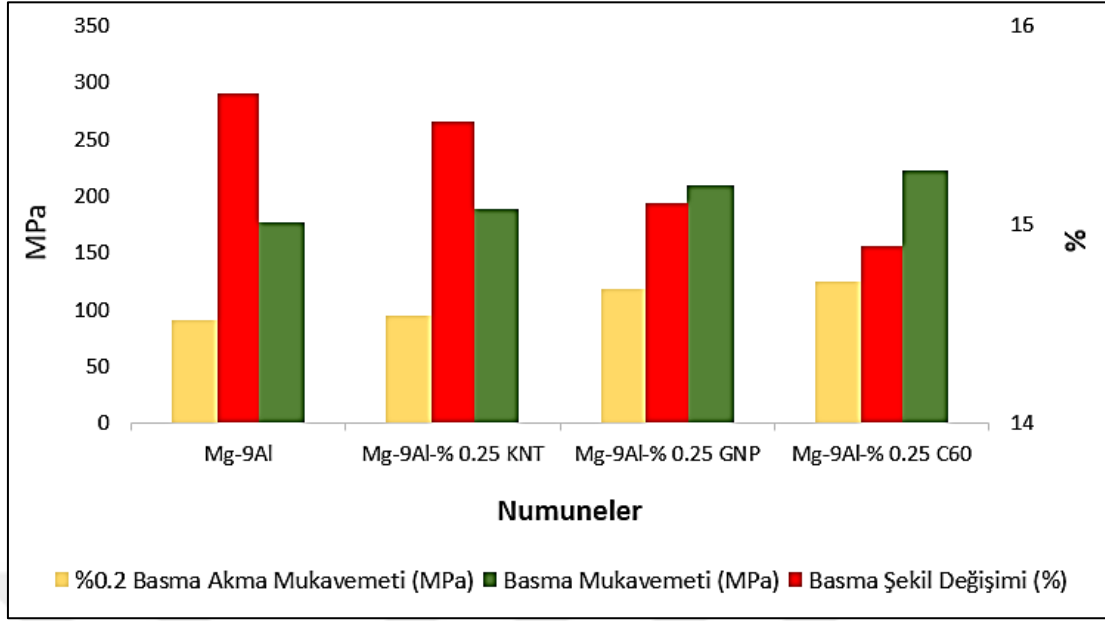
Şekil 6.38 ile 6.40 arasında Mg-Al ve Mg-Zn serisi kompozitlere ait basma test sonuçları verilmiştir. KNT, GNP ve C60'ın magnezyum alaşımlarına ilavesi malzemedeki mekanik dayanımı önemli ölçüde geliştirmiştir. Karbon nanopartiküller arasında, magnezyum alaşımlarında akma ve basma dayanımı hususunda en fazla iyileştirme sağlayan C60 nanopartikülleri olmuştur. Bunun sebebi ise fullerenin nanopartiküller arasında en fazla yüzey alanına sahip olması ve dislokasyon yoğunluğunu daha çok arttırması olduğu düşünülmektedir.

Yük aktarımı, matriks ve takviye arasındaki ara yüzeye bağlanma ile ilgilidir [82]. Magnezyum ve karbon nanopartiküller arasındaki ıslatma kabiliyetini arttırmak için farklı oranlarda alüminyum ve tek oranda çinko kullanılmıştır. Sonuçlarda da görüldüğü üzere alüminyum miktarının artışı akma ve basma mukavemetini arttırmıştır. Çinko miktarının ilavesi ise magnezyum-karbon nanopartikül kompozitlerinde herhangi bir avantaj sağlamamıştır.

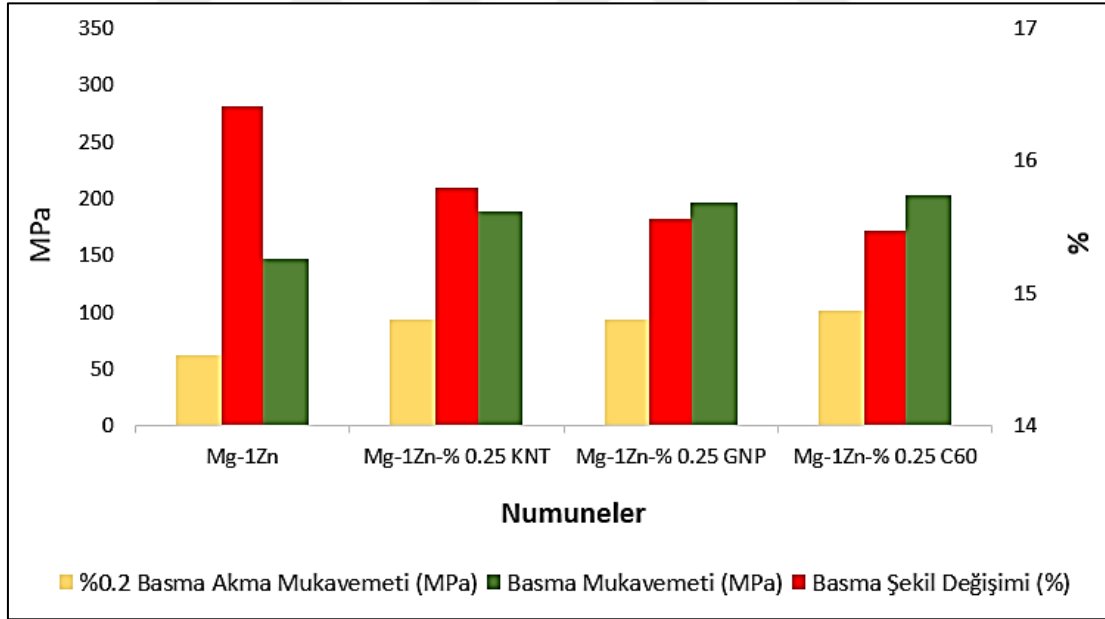
Bilindiği üzere karbon nanopartiküller 10^{-6} K^{-1} , alüminyum $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ve magnezyum ise $25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ termal genleşme katsayısı değerine sahiptir. Matris malzemesi ile takviye arasında ciddi bir fark söz konusudur. Elastik modülü olarak ise karbon nanotüp, grafen ve fullerenin 2-2.5 TPa aralığında hesaplanırken bu değer magnezyum ve alüminyum için sırasıyla 45 GPa ve 69.6 GPa olarak bulunmuştur. Termal genleşme katsayısı ve elastik modullerindeki bu ciddi farklılıklar ekstra gerilmeler üretmekte ve yine dislokasyon hareketinin engellenmesine imkan sunarak basma ve akma mukavemetlerinde artışlara sebep olmuştur [79,83,84] .



Şekil 6.38. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



Şekil 6.39. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.

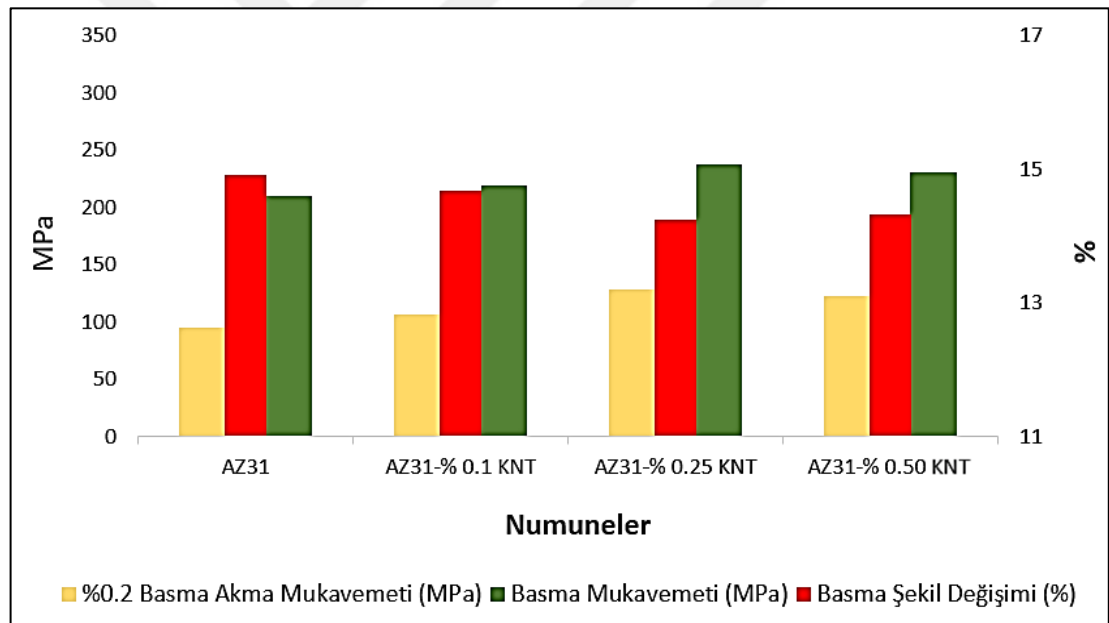


Şekil 6.40. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.

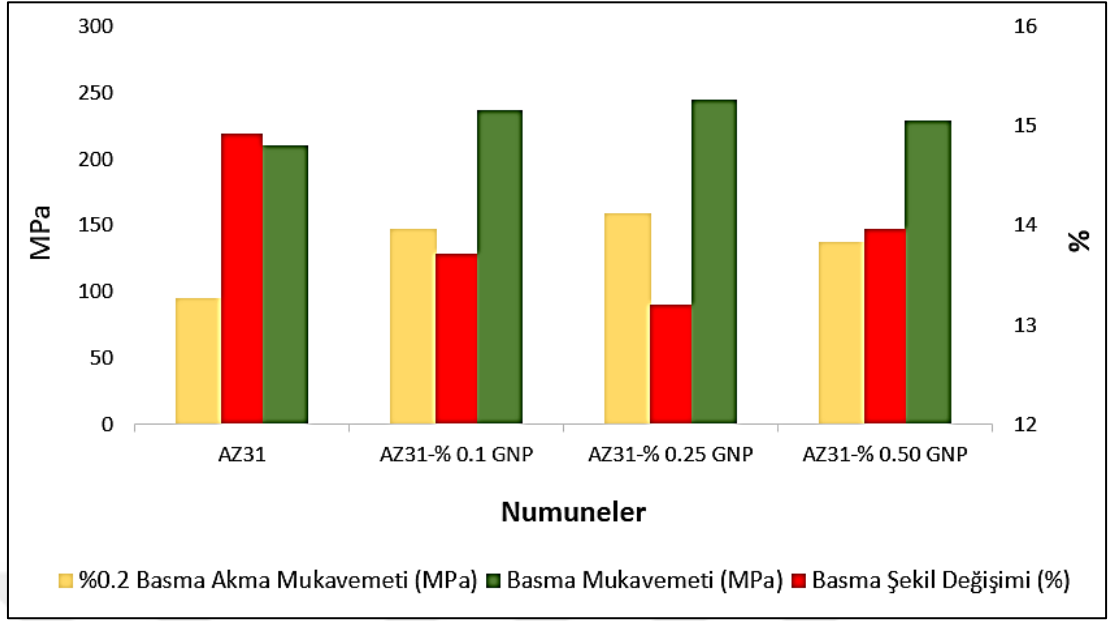
6.5.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Basma Mukavemetine Etkisi

AZ31 ve AZ91 serisi kompozitlerin basma test sonuçları Şekil 6.41 ile 6.46 arasında gösterilmiştir. Farklı oranlarda karbon esaslı nanopartiküllerin ilavesiyle alaşımların akma ve basma mukavemetlerinde artış görülmüş, diğer yandan mukavemet artışı elde edildiği için numunelerin sünekliliğinde azalma gözlemlenmiştir.

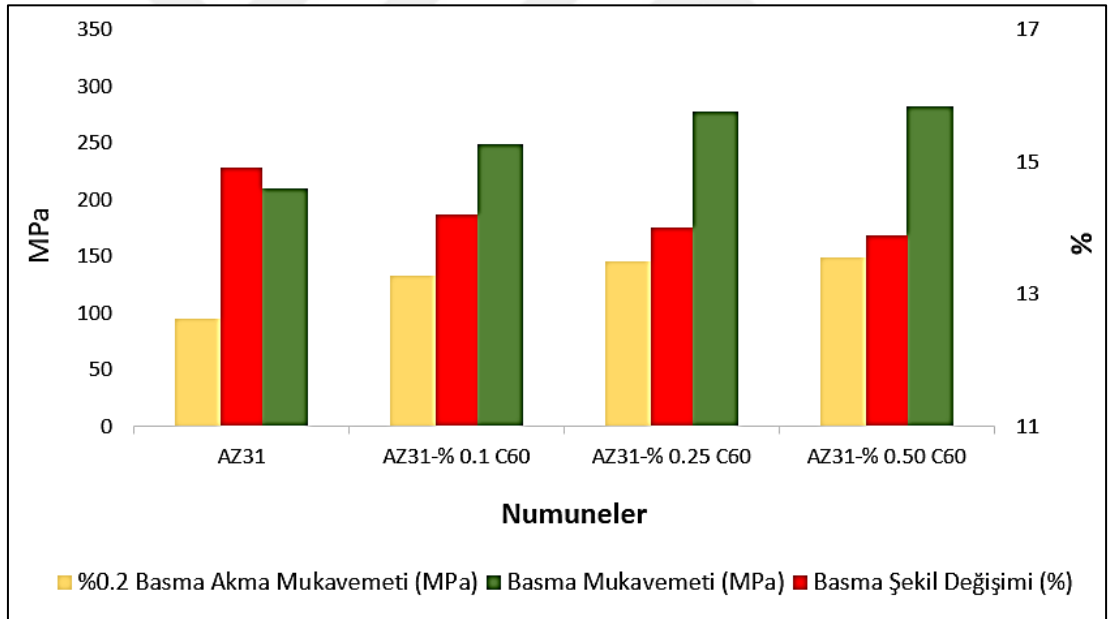
Yüksek sıcaklıklarda sinterleme sürecinde difüzyon hızının yüksek olması da mukavemeti etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Matris içerisine sert karbon nanopartiküllerin nüfuz edilmesiyle termal difüzyondan dolayı partiküller arasındaki mesafe kısalmaktadır. Sonuç olarak dislokasyonlar hareketi esnasında daha fazla engelle karşılaşırlar ve böylelikle malzeme içerisinde dislokasyonlar ciddi bir şekilde yığılırlar. Bu durum mekanik özelliklerin artmasına olanak sağlar [85].



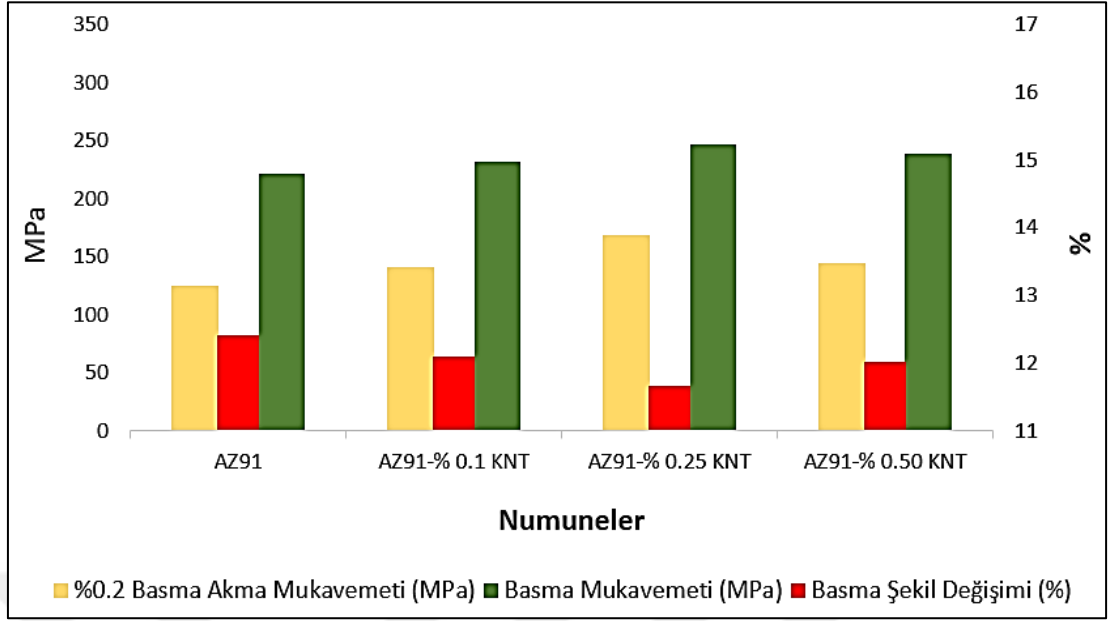
Şekil 6.41. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



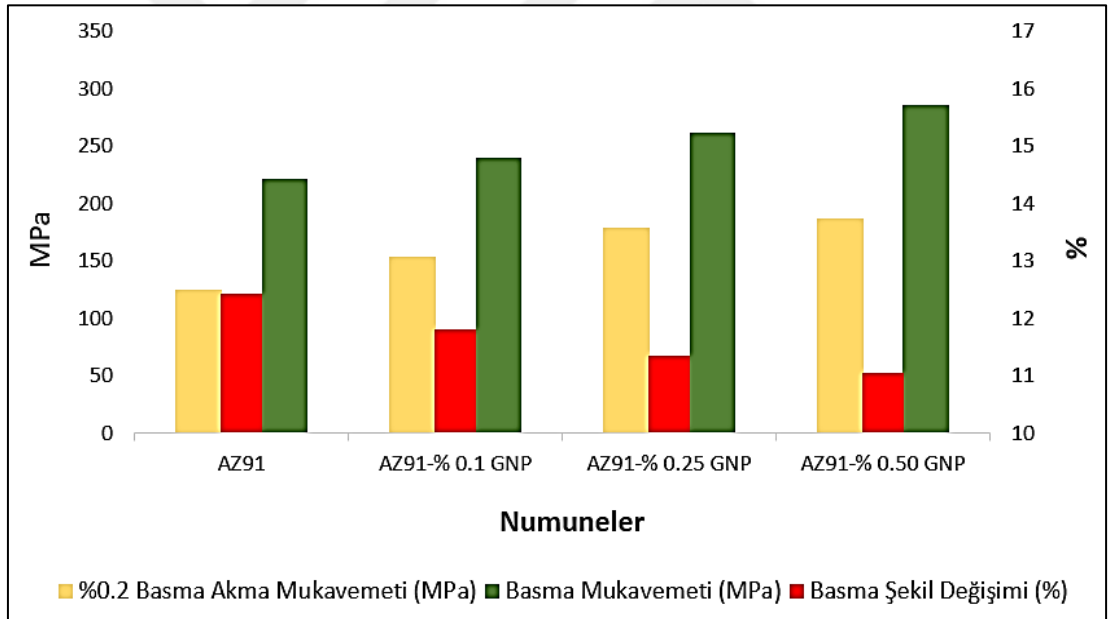
Şekil 6.42. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



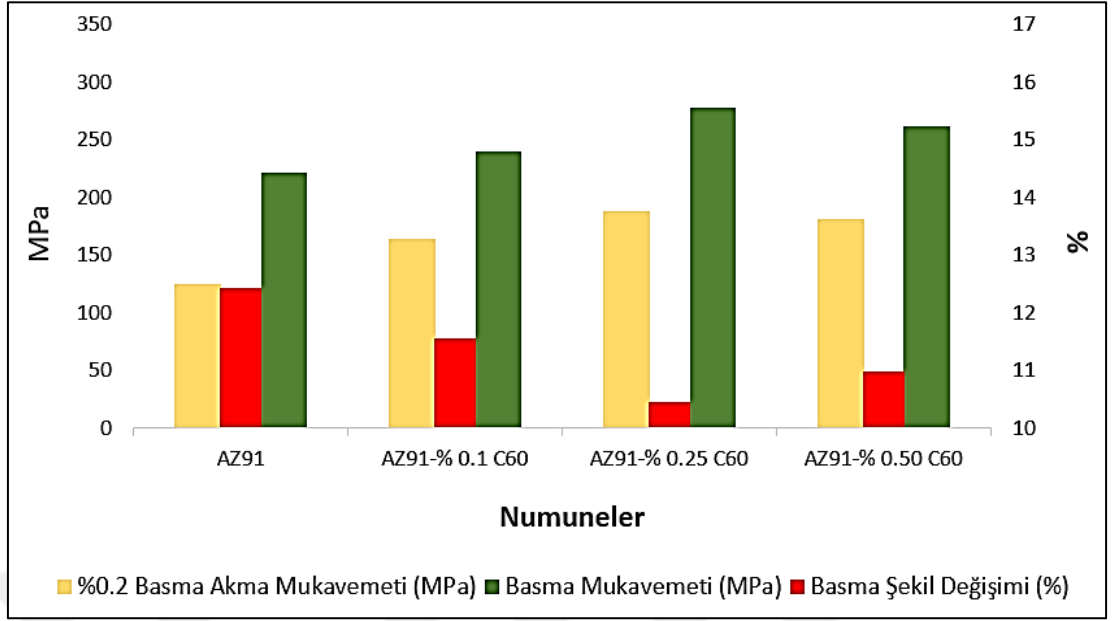
Şekil 6.43. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



Şekil 6.44. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



Şekil 6.45. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.



Şekil 6.46. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerin basma test sonuçları.

6.6. AŞINMA TEST SONUÇLARI

6.6.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Aşınma Performansına Etkisi

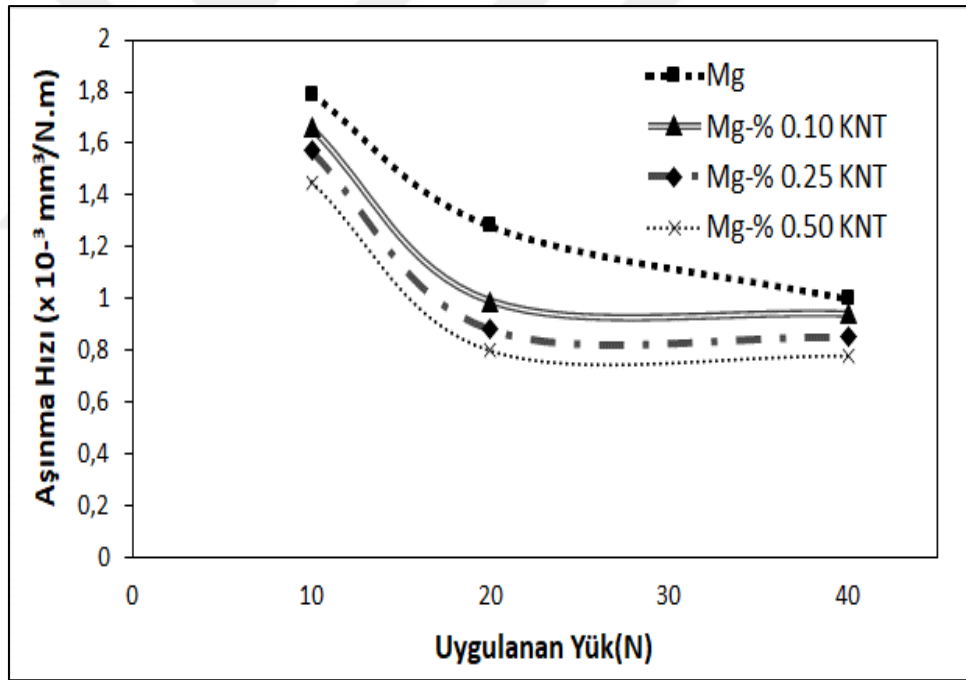
Karbon nanopartikül takviyeli saf magnezyum matrisli kompozitlere ait aşınma performanslarını gösteren grafikler Şekil 6.47 ile 6.52 arasında gösterilmiştir. Aşınma performansları 1000 metre yol neticesinde meydana gelen hacimsel kaybın hesaplanması sonucu elde edilmiştir. Elde edilen aşınma hızı değerleri her bir numune için uygulanan yüke bölünerek spesifik aşınma hızlar hesaplanmıştır.

Genel olarak nanopartiküllerin ilavesi magnezyum matrisli kompozitlerin aşınma performansını ciddi bir şekilde arttırmıştır. Karbon oranlarının %0.25 oranının üzerine çıkmasıyla aşınma performansındaki artış eğilimi, özellikle topaklanmaların görüldüğü numunelerde daha az olmaktadır. Ayrıca artan yükle beraber numunelerdeki aşınma derinliklerindeki artıştan dolayı aşınma kaybı daha da artmaktadır. Aşınma dayanımı en iyi çıkan numune ağırlıkça %0.5 oranında C60 içeren numunenin 10N yük altındaki göstermiş olduğu performansa aittir. Uygulanan yük arttıkça aşınma derinliği artmış ve özellikle 40N yük altında aşınma genişliğinde

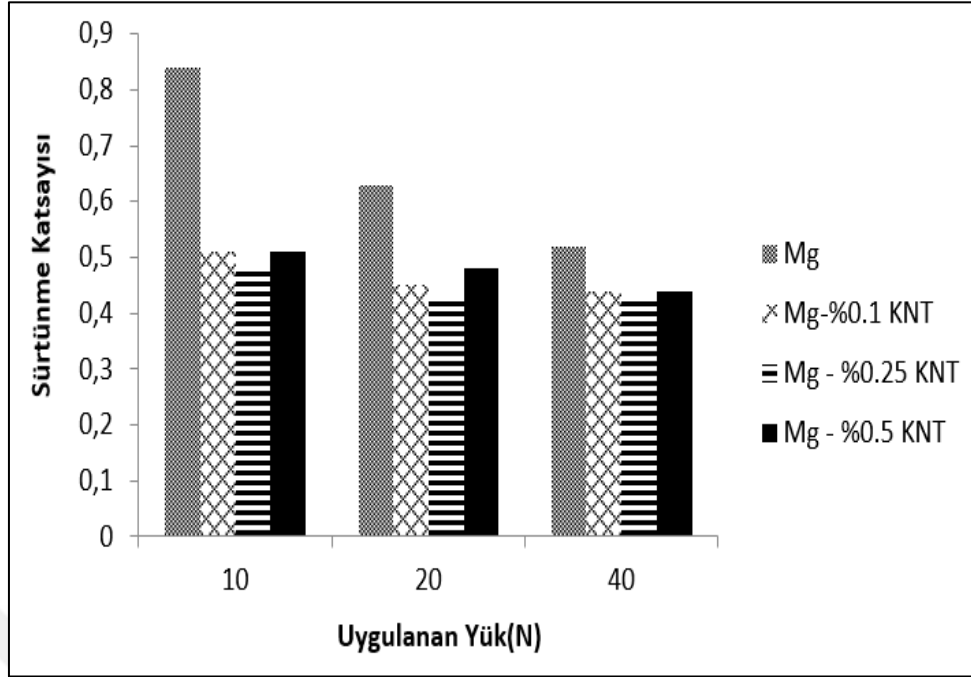
de ciddi bir artış görülmüştür. Dolayısıyla artan yük ile birlikte aşınma dayanımları azalmıştır.

Fulleren başta olmak üzere karbon nanopartiküller yağlayıcı etki göstererek daha fazla aşınmayı engellemiş böylelikle saf magnezyumun aşınma performansını grafiklerden de görüleceği üzere ciddi bir şekilde geliştirmiştir.

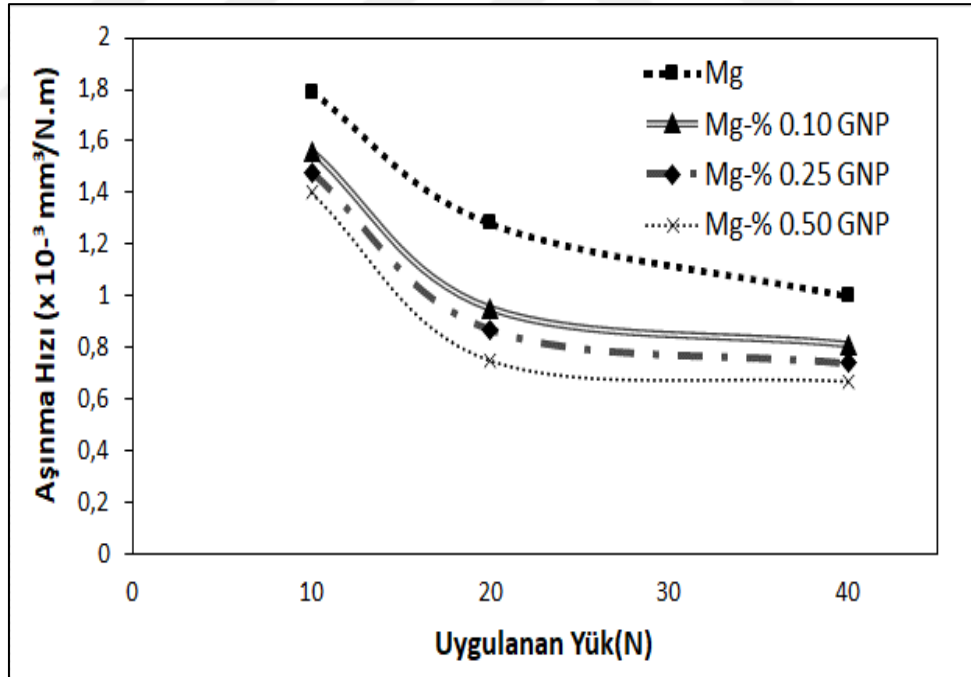
Sürtünme katsayısı, ilave edilen karbon nanopartikülün çeşidine ve oranına bağlı olmakla beraber, artan yük ile birlikte değişiklik göstermiştir. Genel olarak karbon nanopartikül ilavesi magnezyum ve alaşımlarının aşınma performansını geliştirerek, sürtünme katsayısını azaltmıştır. Ayrıca artan aşınma yüküyle beraber, sürtünme katsayısı genel olarak azalma eğilimindedir.



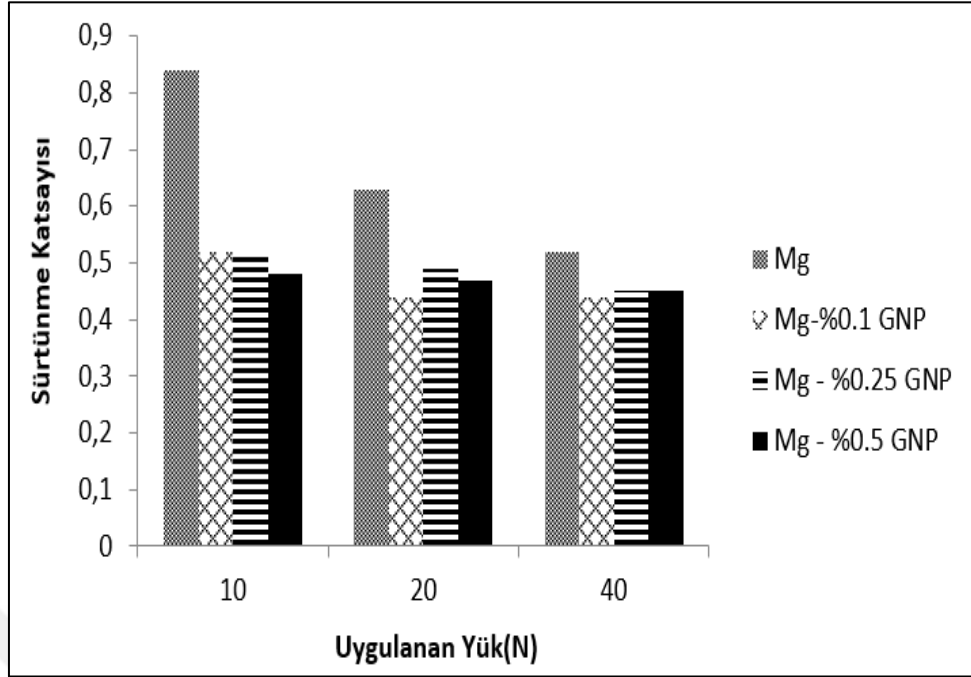
Şekil 6.47. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



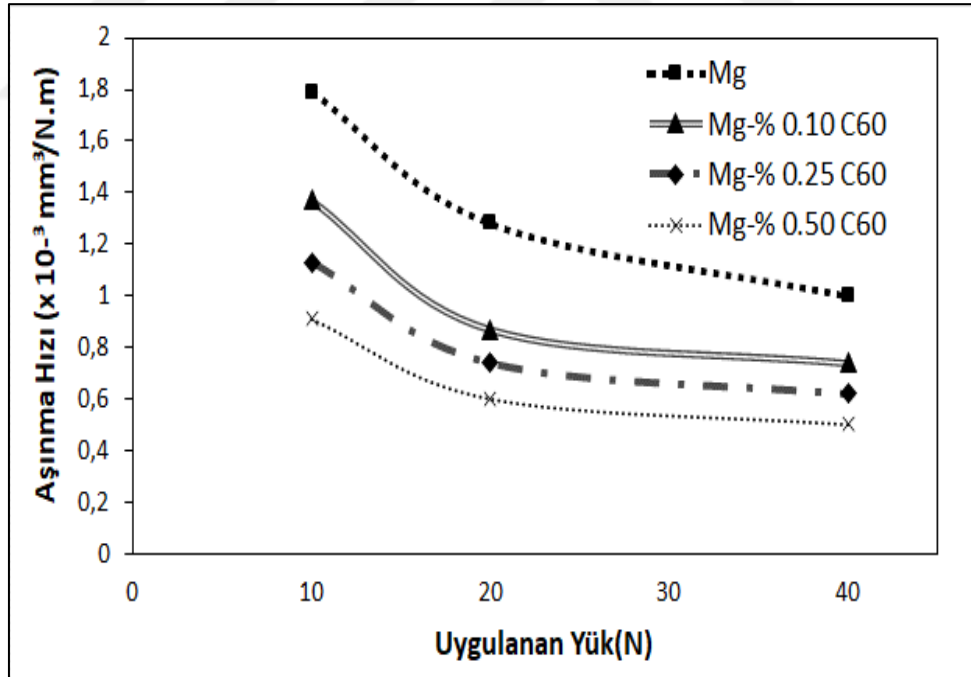
Şekil 6.48. KNT takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



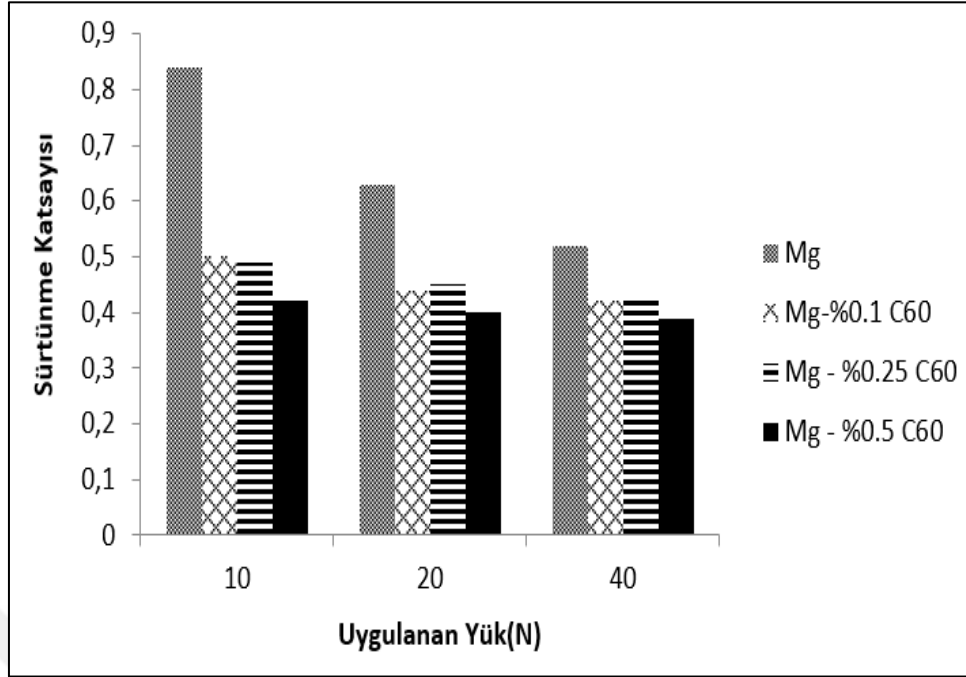
Şekil 6.49. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.50. GNP takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 6.51. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.52. C60 takviyeli magnezyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.

6.6.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Aşınma Performanslarına Etkisi

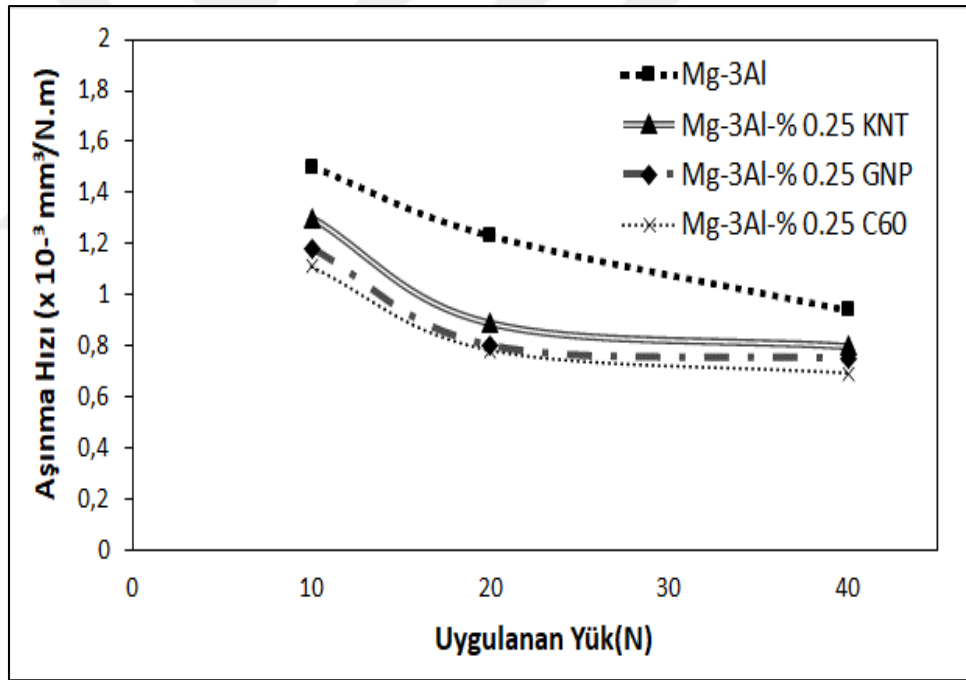
Mg-3Al, Mg-9Al ve Mg-1Zn matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri Şekil 6.53 ile 6.58 arasında verilmiştir. Aşınma hızları değerlendirildiğinde nanopartikül ilavesi takviyesiz malzemelerin aşınma dayanımlarını artırmıştır. Bunun sebebi KNT, GNP ve C60 takviyelerinin kayma yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltması böylelikle daha az aşınmanın gerçekleşmesine olanak sağlamasıdır.

Aluminyum miktarının artmasıyla karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerde aşınma oranı azalmış böylelikle Mg-Al matrisinin aşınma performansına doğrudan etkide bulunmuştur. Aşınma performansı en iyi çıkan malzemenin Mg-9Al-%0.25 C60 kompozitine ait olduğu grafiklerde açıkça görülmektedir. Fakat magnezyum matrise çinko ilavesi sertlik performansında olduğu gibi aşınma direnci hususunda ekstra bir katkı sunamamıştır.

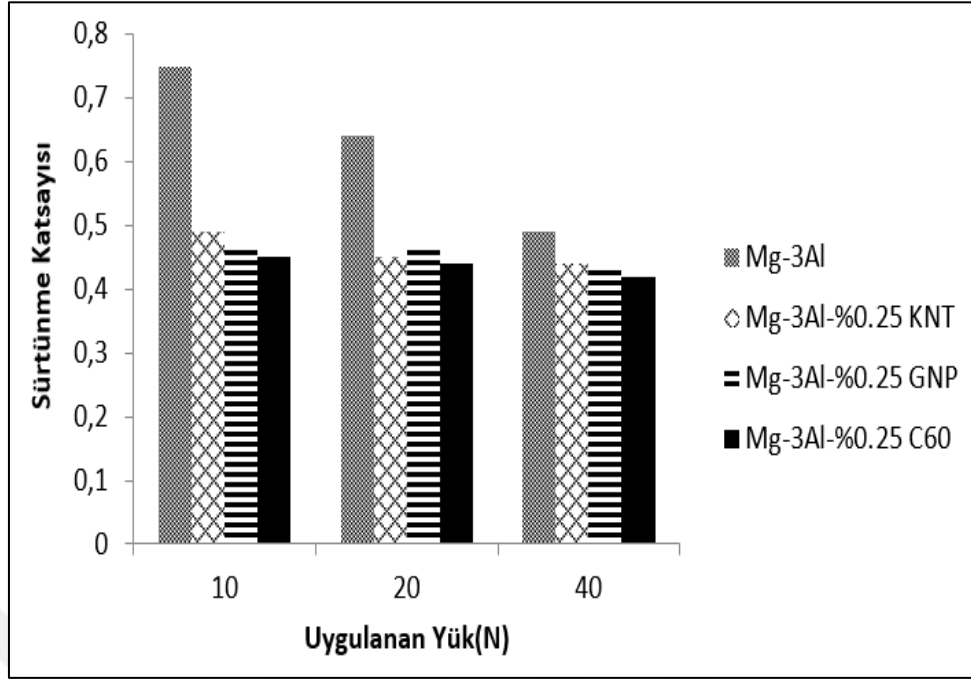
Malzemelerin aşınma direnci aynı zamanda sertlik davranışıyla da alakalıdır. Archard yasasına göre daha sert malzemeler yumuşak malzemelere göre daha fazla aşınma

direnci gösterir [86]. Üretmiş olduğumuz numunelerin sertlik ve aşınma performansları kendi aralarında değerlendirildiğinde, sertliği yüksek çıkan kompozitler aynı zamanda daha yüksek aşınma dayanımına sahiptir. Dolayısıyla Archard yasasıyla tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

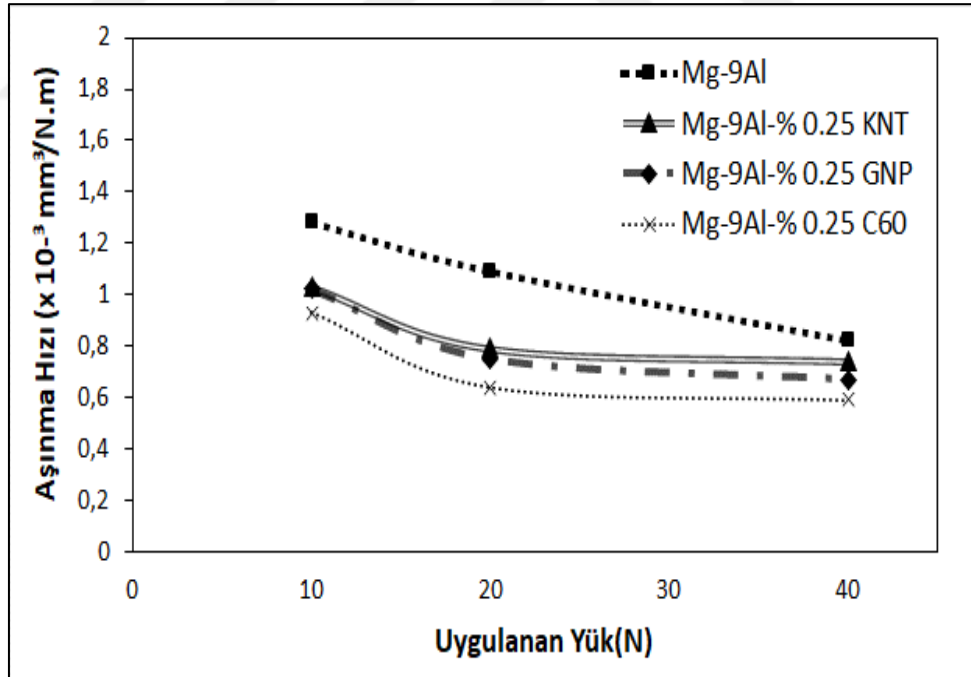
Mg-Al ve Mg-Zn matrislerine ait sürtünme katsayısıyla alakalı grafikler incelendiğinde, genel eğilim artan yükte beraber sürtünme katsayısının azalmasıdır. Ayrıca kompozit malzemelerde nano boyuttaki bu karbon bazlı takviyelerle sürtünme katsayısı genellikle azalmıştır. Bunun nedeni karbon nanopartiküllerin bilya ile numune yüzeyi arasındaki temas bölgesinde sağlamış olduğu yağlayıcı etkidir. Bazı durumlarda sürtünme katsayısının değişiklik göstermemesinin sebebi ise yüzeydeki katı yağlayıcı etkisinin yetersizliğidir.



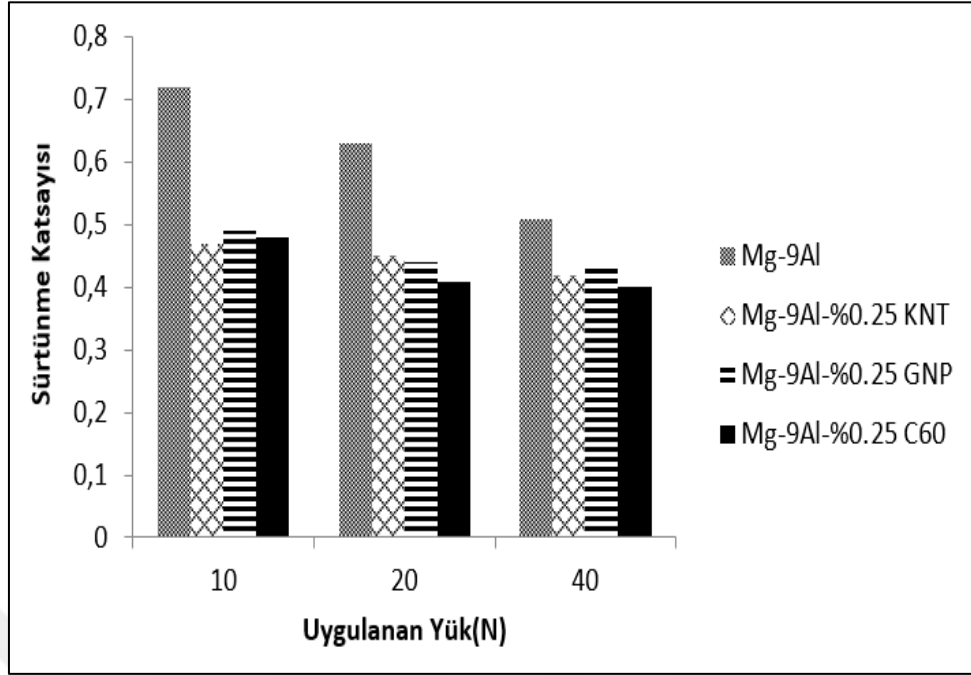
Şekil 6.53. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



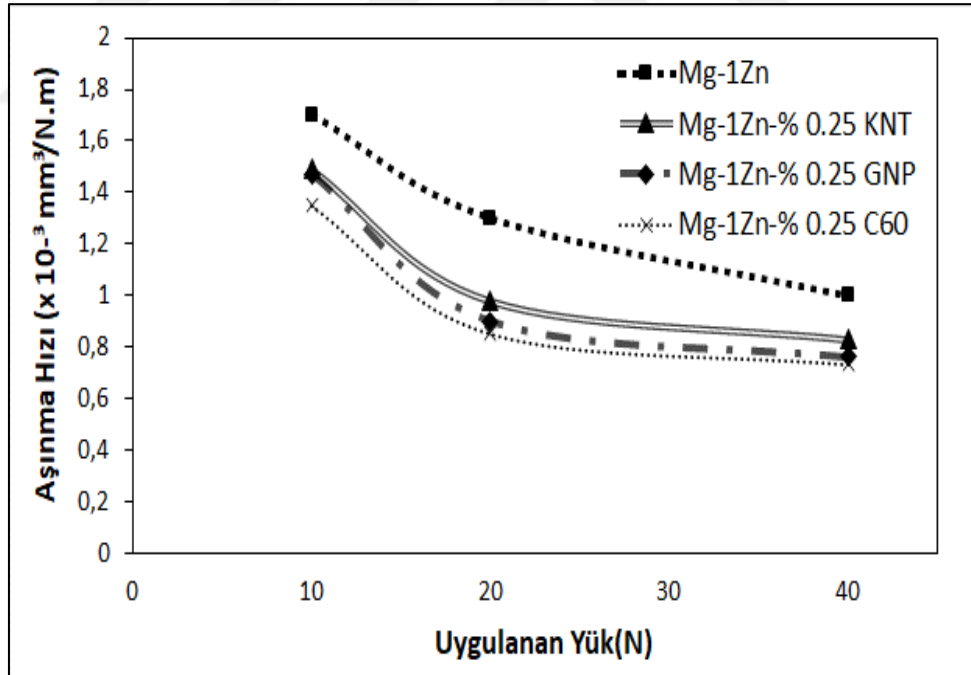
Şekil 6.54. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-3Al matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



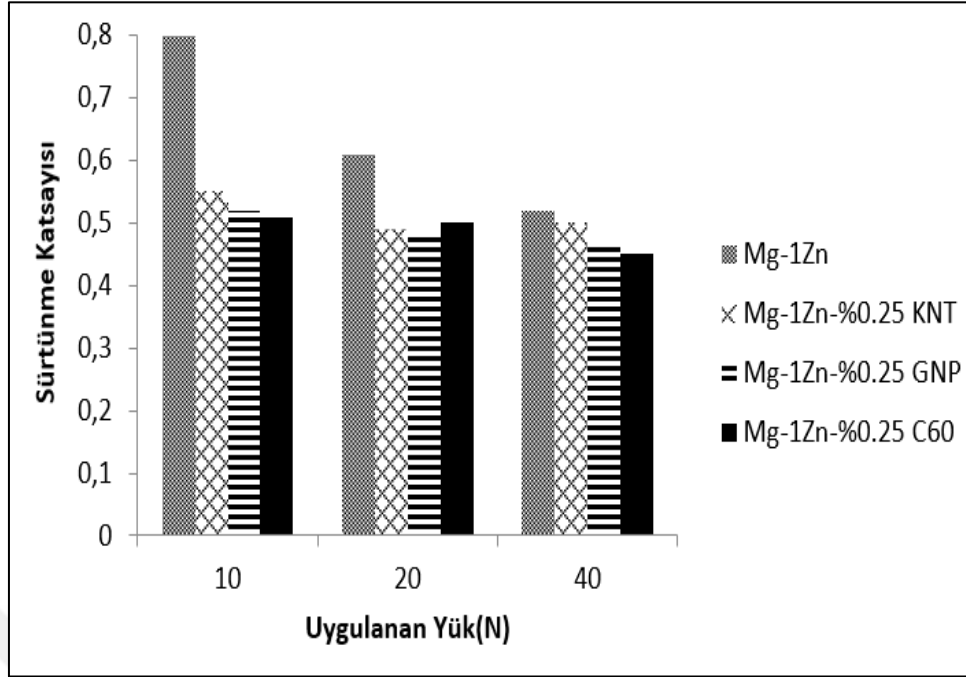
Şekil 6.55. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.56. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-9Al matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 6.57. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.58. Karbon nanopartikül takviyeli Mg-1Zn matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.

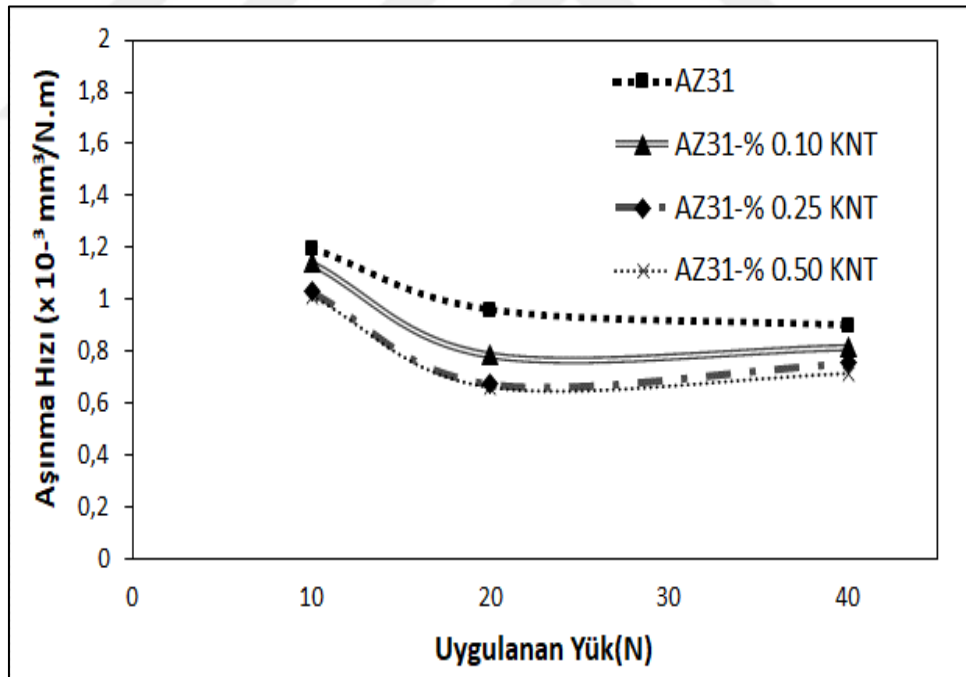
6.6.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Aşınma Performanslarına Etkisi

AZ31 ve AZ91 matrisli kompozitlere ait aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerleri Şekil 6.59 ile Şekil 6.70 arasında verilmiştir. Uygulanan tüm yüklerde takviyelerle birlikte matris malzemelerinin aşınma performanslarında gelişmeler sağlanmıştır. Çok düşük yüklerde takviye elemanlarının etkisi özellikle karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde çok büyük bir fayda göstermese de 40 N gibi yüksek yükler uygulandığında, yük taşıma mekanizmasının etkili olmasından dolayı aşınma direncinde kayda değer iyileşmeler görülmüştür [87]. Benzer sonuç Labib ve arkadaşları [88] tarafından da elde edilmiştir. Bu çalışmada takviye elemanlarının saf magnezyumun aşınma performanslarına, 40N ve 60N gibi yüklerde ciddi bir katkı sunduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak ise temel mukavemetlendirme mekanizmalarından biri olan yük taşıma mekanizmasının etkisi öne sürülmüştür [88].

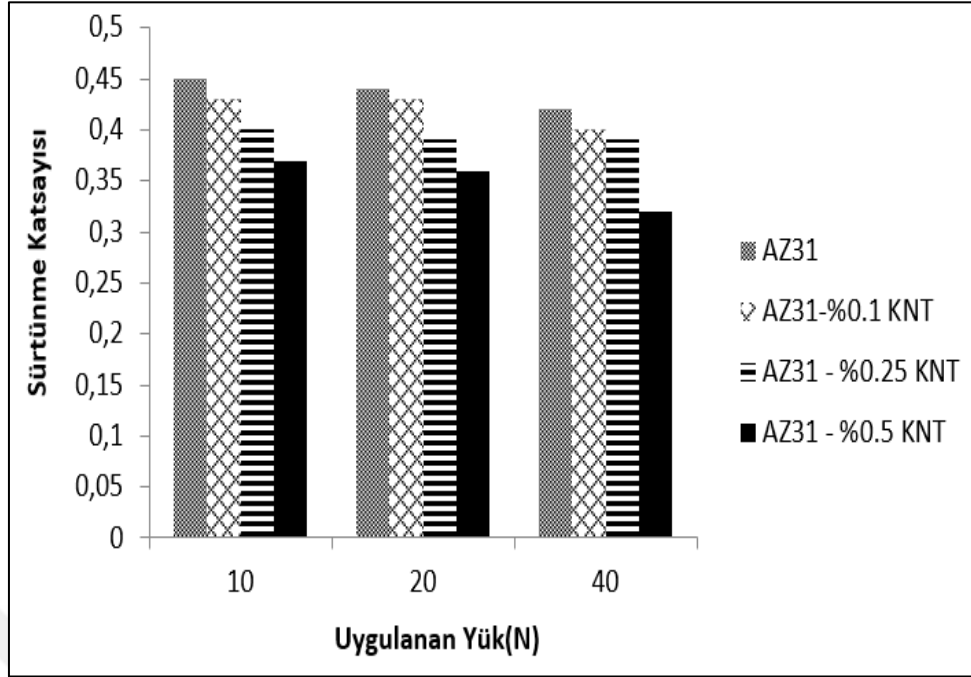
AZ31 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının aşınma dirençleri göz önünde bulundurulduğunda, eğrilerden de görüleceği üzere, karbon nanotüp, grafen ve

fulleren ilavesi ağırlıkça %0.25'e kadar bir artış göstermiş fakat %0.25'ten sonra bu artışta kayda değer bir değişim görülmemiştir. Karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerin daha yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olması, daha kısıtlı matris akışına neden olmakta ve bu da matrisin plastik deformasyona karşı daha fazla direnc göstermesine olanak sağlamaktadır.

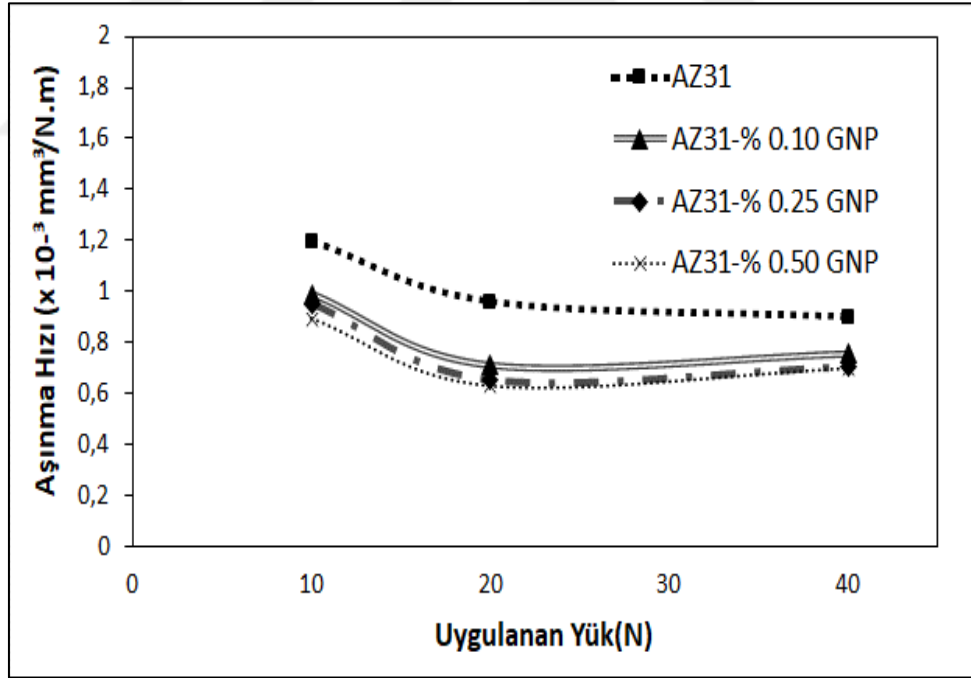
Sürtünme katsayısı bilindiği üzere bir malzemenin aşınma ve sürtünme performansını gösteren önemli bir kanıttır [89]. Sürtünme katsayısının AZ31 ve AZ91 matrisli kompozitlerde genel olarak eğilimi, uygulanan yük arttıkça azalması ve takviye elemanlarıyla matris malzemesinin sürtünme katsayısı değerindeki düşüşlerdir. Bazı durumlarda sürtünme katsayısında takviyenin artmasıyla ya da değişiklik göstermesiyle önemli bir değişiklik görülmemiştir. Bunun sebebi aşınmaya uğrayan malzemenin temas yüzeyindeki yetersiz yağlayıcı etkinin görülmesi veya deney şartlarının (ortamın nemi, sıcaklığı) etkisi gibi parametreler olduğu düşünülmektedir.



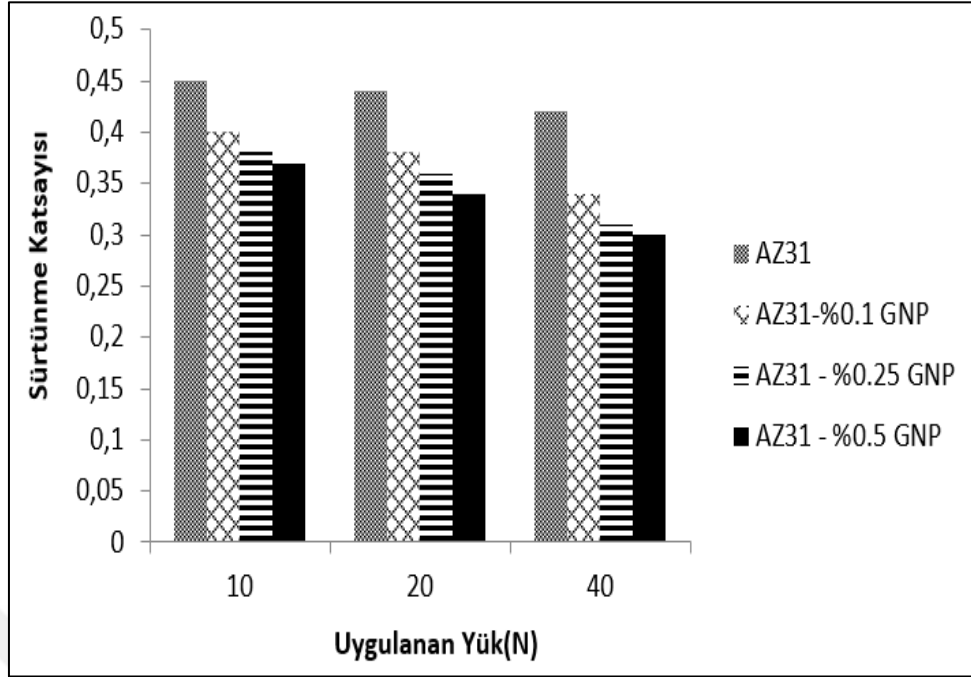
Şekil 6.59. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



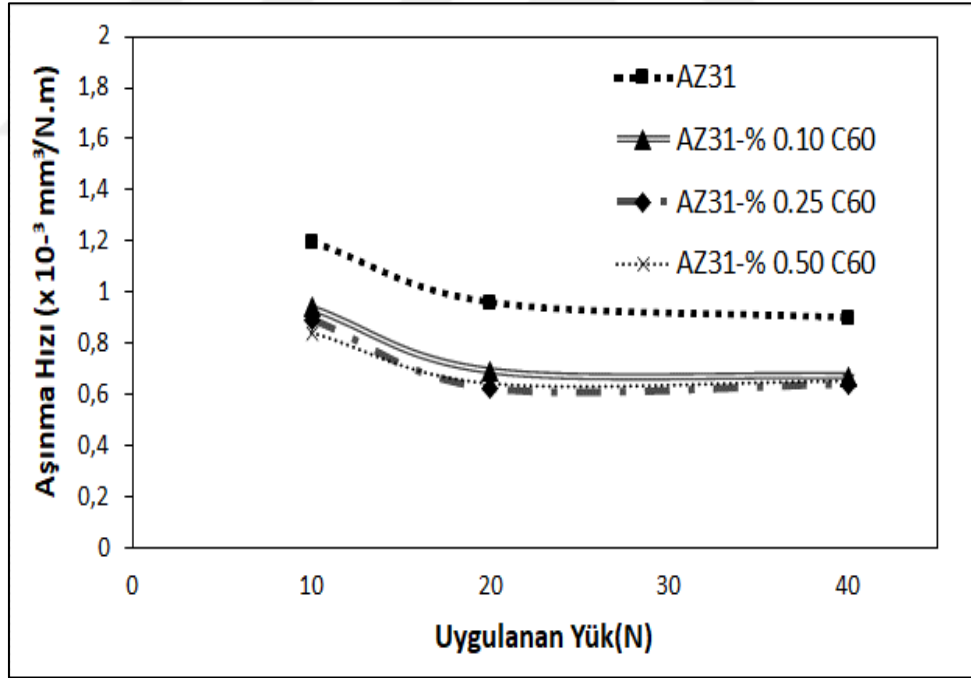
Şekil 6.60. KNT takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



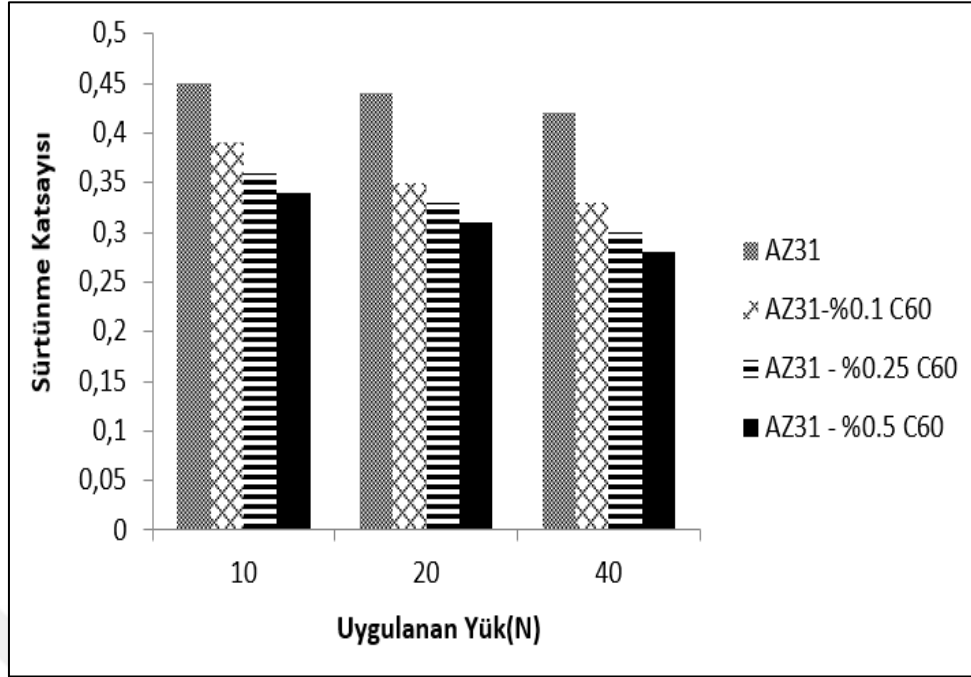
Şekil 6.61. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



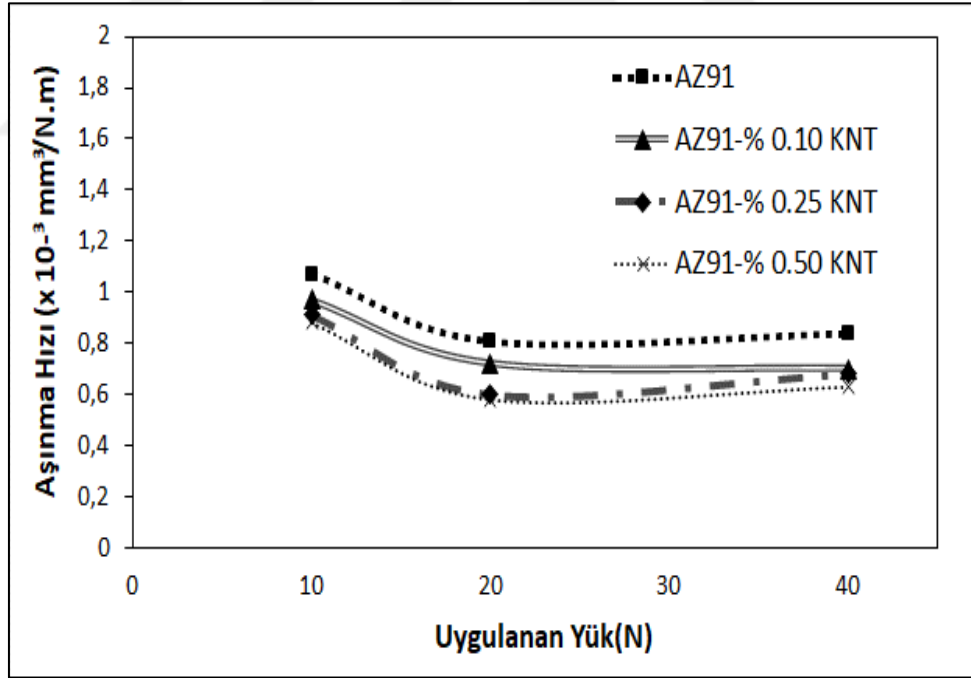
Şekil 6.62. GNP takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



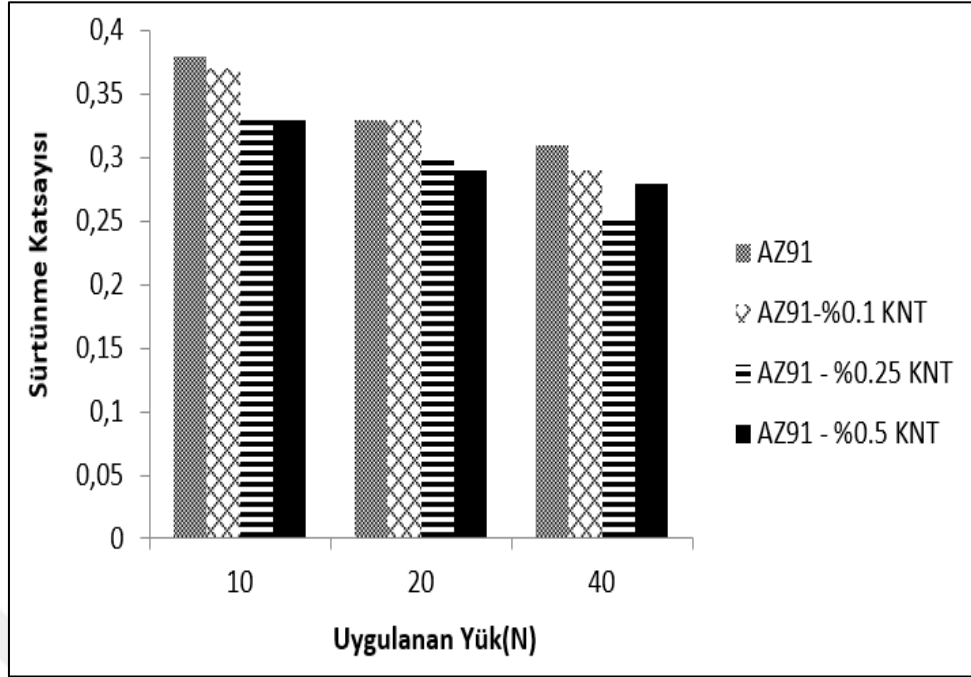
Şekil 6.63. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



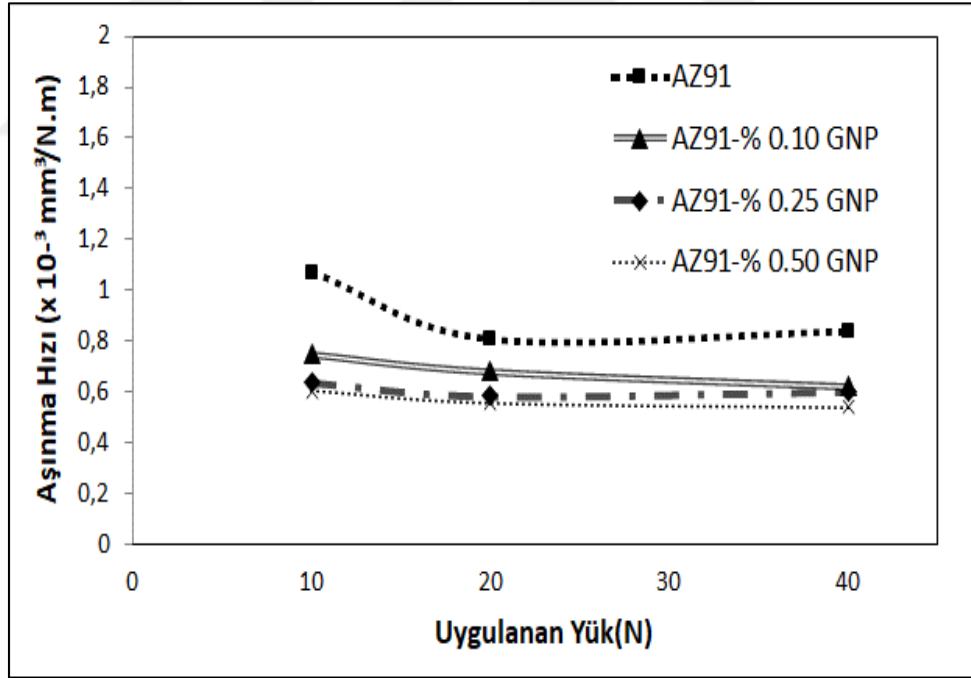
Şekil 6.64. C60 takviyeli AZ31 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



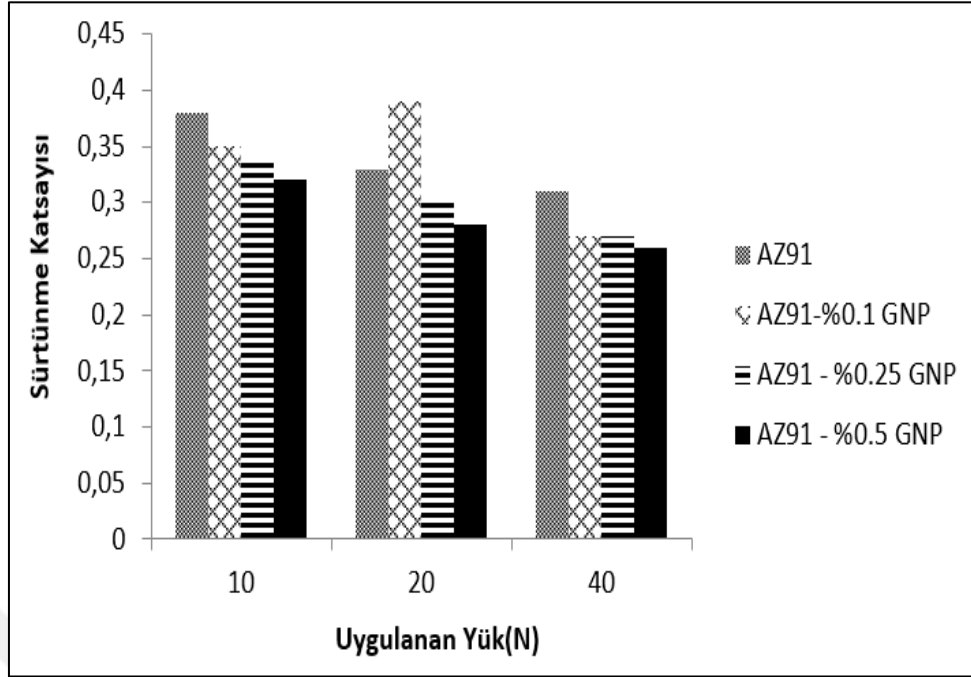
Şekil 6.65. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



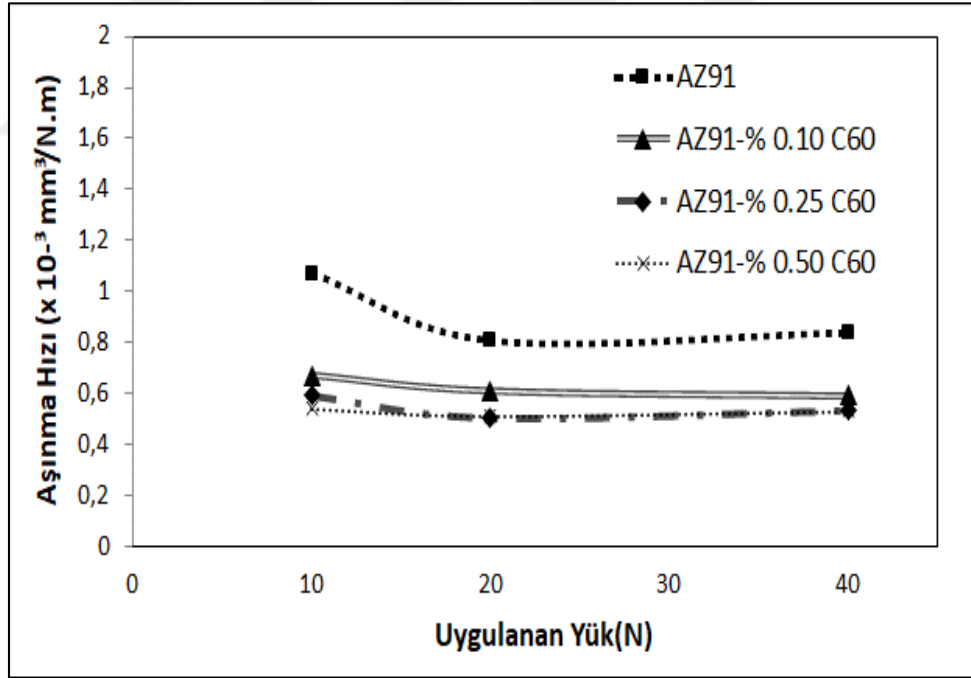
Şekil 6.66. KNT takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



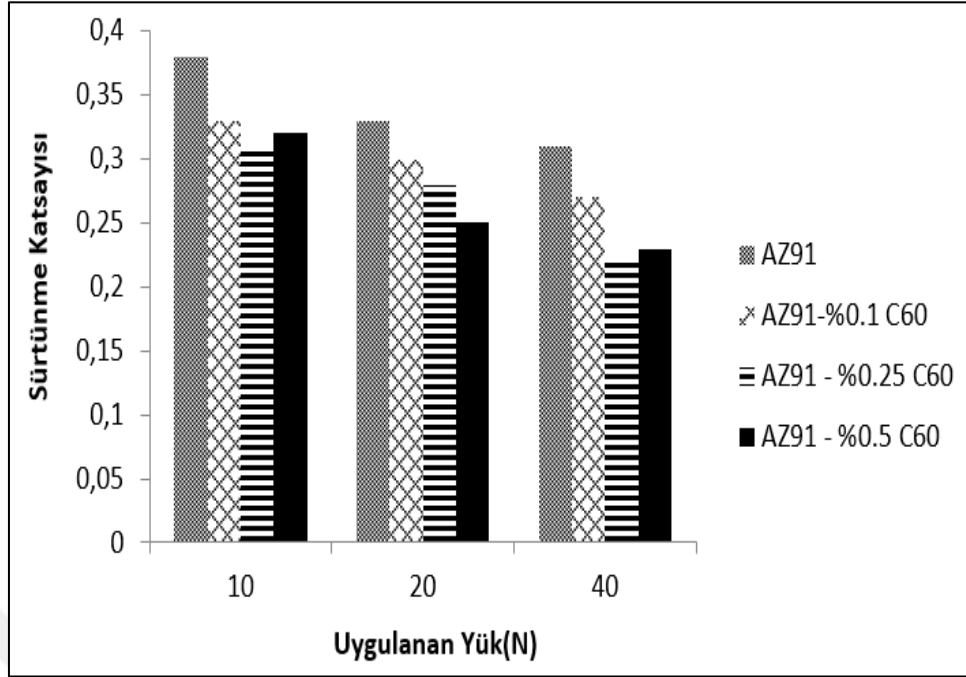
Şekil 6.67. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.68. GNP takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.



Şekil 6.69. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitin aşınma hız değerleri.



Şekil 6.70. C60 takviyeli AZ91 matrisli kompozitin sürtünme katsayısı değerleri.

6.6.4. Aşınma Morfolojilerinin İncelenmesi

Aşınma testleriyle numunelerde uygulanan yük neticesinde ne kadar aşınma meydana geldiği ve sürtünme katsayılarındaki ortalama değişimleri hakkında bilgiler edinilmiş oldu. Aşınma testlerindeki bir diğer önemli faktör ise hangi aşınma mekanizmalarının takviyesiz ve takviyeli metal matrisli kompozit üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Bu yüzden fulleren takviyeli saf magnezyum matrisli kompozit ve karbon nanopartikül takviyeli AZ91 matrisli kompozit numunelerine en düşük ve en yüksek yükler göz önünde bulundurularak aşınma sonrası SEM görüntüleme işlemi yapılmıştır. Genel olarak kompozit sistemlerde görülebilecek aşınma mekanizmaları, abrasif, adezif, oksidasyon, delaminasyon ve termal aşınma mekanizmalarıdır.

Bu çalışmada saf magnezyum ve AZ91 magnezyum alaşımı matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere yapılmış SEM incelemeleri neticesinde aşağıdaki aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir.

Abrasif aşınma mekanizması

Abrasif ya da aşındırıcı aşınma olarak geçen bu mekanizmada tipik morfolojik özellik yüzeyde çiziklerin ya da oyukların kayma yönünde görülüyor olabilmesidir. Bu çizikler genellikle kompozit malzemenin yüzeyiyle temas halinde olan aşındırıcı sert bilye tarafından oluşturulmaktadır. Bu mekanizma üretilen bütün kompozitlerde temel aşınma türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 6.71 ve Şekil 6.73’de verilen fulleren takviyeli saf magnezyum matrisli ve karbon nanopartikül takviyeli AZ91 matrisli kompozitlerde de net bir şekilde aşınma yönüne paralel bulunan çizikler ve oyuklar mevcuttur. Uygulanan yük 40 N’a çıktığında bu oluşumlar daha ciddi bir hal almaktadır. Bu aşınma mekanizması aynı zamanda yüzeyden bir çeşit yol bularak, malzeme yüzeyinde parça koparmaya da neden olur. Karbon nanopartiküllerin etkisiyle genel olarak matris malzemelerinde net bir şekilde görülen bu aşınma daha da azaltılarak kayma işlemi daha zor hale gelir. Bunun sebebi ise karbon nanotüp, grafen ve fullerenin katı yağlayıcı özellik göstermesidir.

Oksidasyon aşınma mekanizması

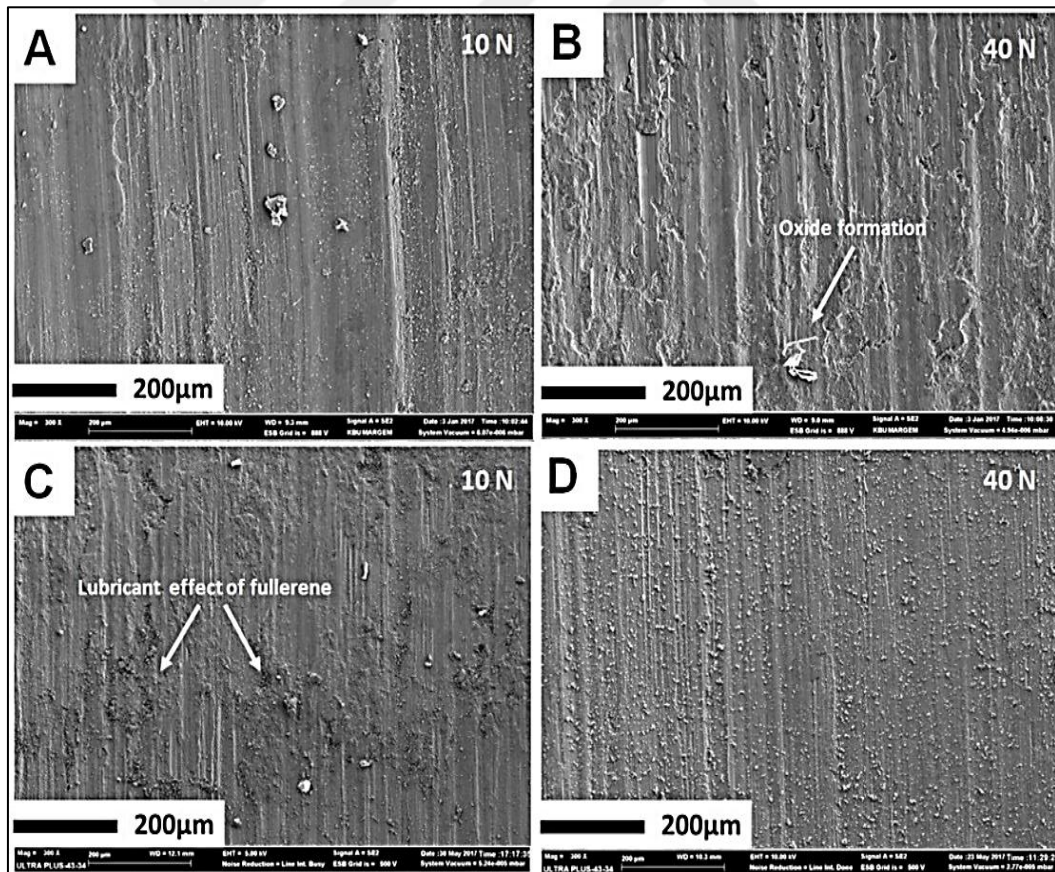
Bu aşınma mekanizması da magnezyum esaslı kompozitlerde yaygın olarak görülmektedir. Özellikle yüksek yüklerde etkili olan bu mekanizmanın oluşum sebebi uygulanan tekrarlı yüklerde meydana gelen temas yüzeyleri arasındaki sürtünme ısıdır. Şekil 6.72 ve 6.74’te numunelere ait EDX görüntüleri verilmiştir. Aşınma sonrası mikroskopta görülebilen beyaz bölgelerin analizi sonucunda oksijen pikinde ciddi bir artış gözlemlenmiş ve yapıda oksidasyon aşınma mekanizması olduğu net bir şekilde açıklanmıştır. Özellikle partikül takviyeli kompozitlerde bu mekanizmanın varlığı daha aşikardır. Öte yandan aşınma testleri süresince oluşan oksit tabakanın varlığı karşıt malzeme ve numune yüzeyi arasındaki teması engellemeye çalışmaktadır ve böylelikle aşınma hızı daha düşük olmaktadır.

Adhesif aşınma mekanizması

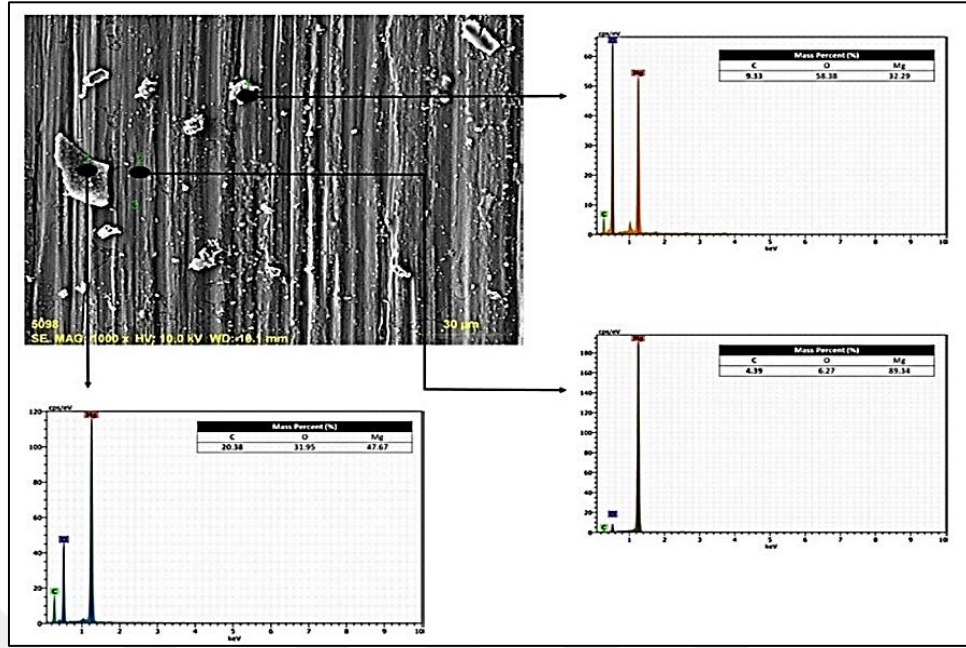
Yapışmalı aşınma olarakta adlandırılan bu tür aşınmalar genellikle yüksek oranlarda karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerde görülmüştür. Temel prensip temas yüzeyi

ile karşıt malzeme arasındaki sşrtşnme esnasında kullanılan bilyeden partikşllerin numune yşzeylerine yapışmasıdır. SEM gşrşntşleriyle şok net bir şekilde ortaya koyulamasa da yşksek aşınma yşklerinde bu mekanizma aktif olarak malzemelerde mevcuttur.

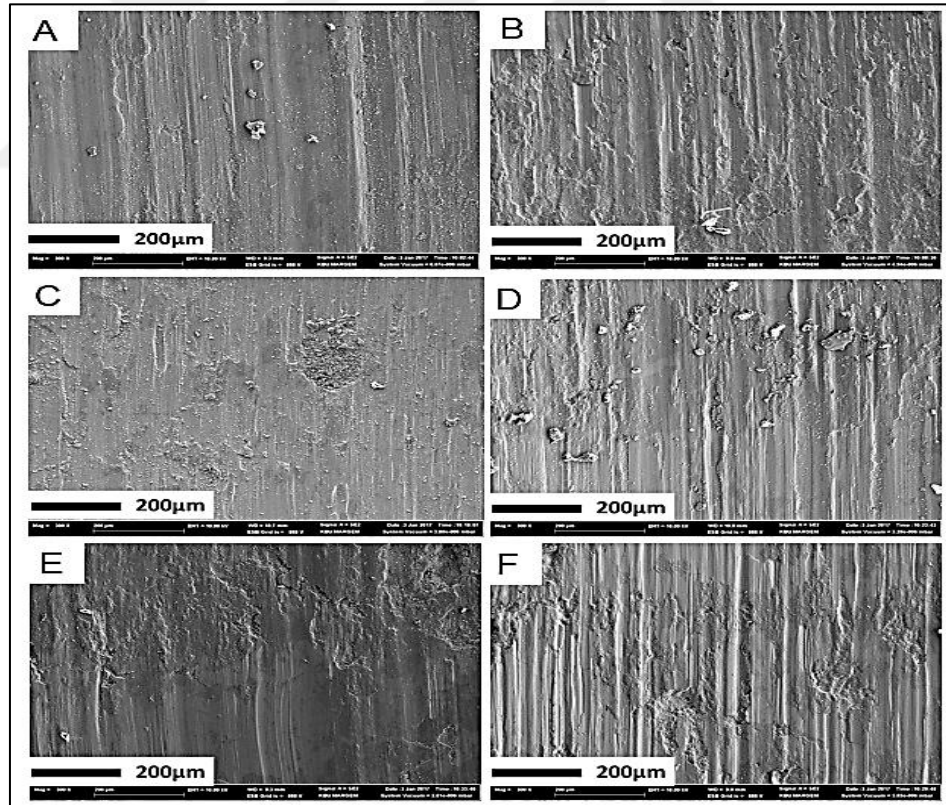
Delaminasyon ve termal aşınma mekanizmaları yapılan testler neticesinde gşrşlememiştir. Genellikle delaminasyon aşınma mekanizması şok yşksek aşınma hızlarında oluşmakta bu da malzemelerde ciddi bir tahribata yol açmaktadır. Termal aşınma mekanizması da genellikle farklı sıcaklıklarda aşınma analizleri yapıldığında gşrşlmekte olup, yşksek yşklerde yapılan aşınma testleri neticesinde de meydana gelebilecek sşrtşnme ısısında ortaya ıkılabilecektir. Numunelerde genel olarak gşzlemlenen aşınma mekanizmaları kısaca abrasif, adhesif ve oksidasyon mekanizmalarıdır.



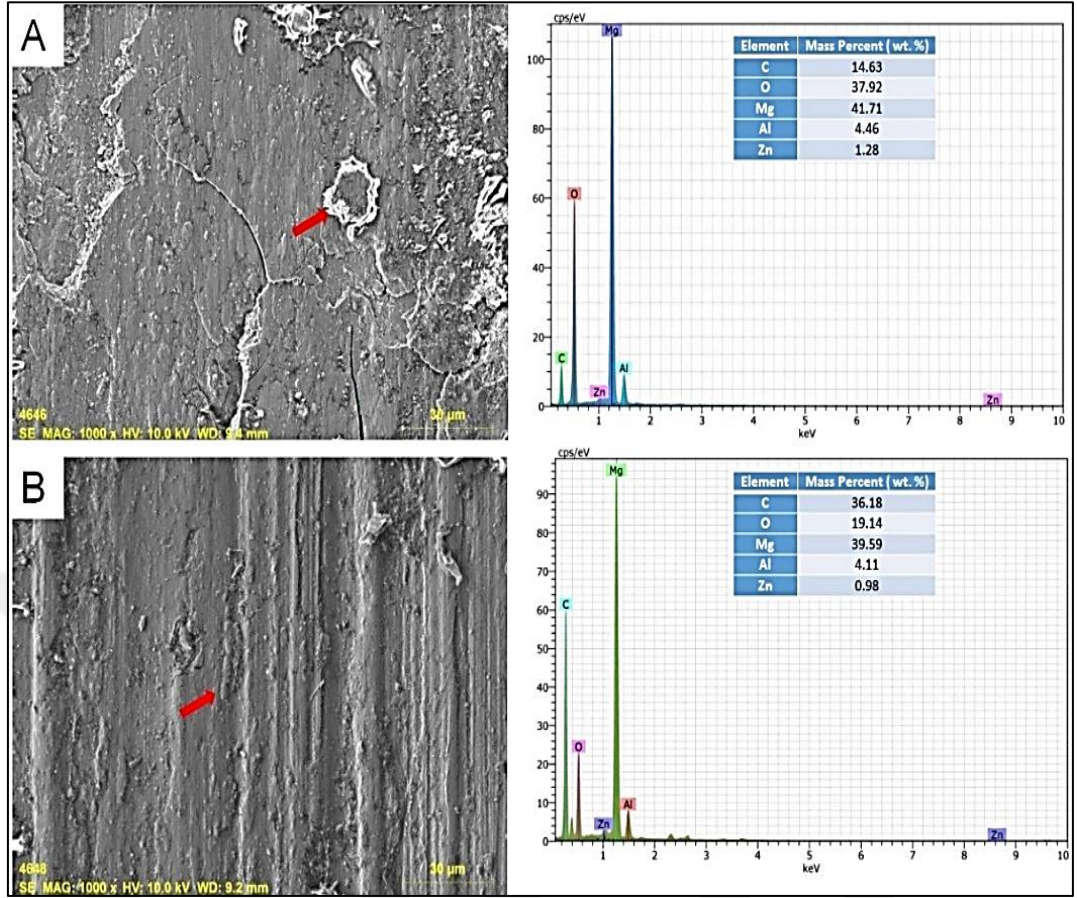
şekil 6.71. 10 N ve 40 N aşınma yşkş altında SEM yşzeylerinin gşrşntşsş (A-B) Mg, (C-D) Mg-% 0.50 C60.



Şekil 6.72. Mg-%0.5 C60 kompozitinin 40 N aşınma yükü altında EDX analizi.



Şekil 6.73. 10 N ve 40 N aşınma yükü altında SEM yüzeylerinin görüntüsü (A-B) AZ91-%0.5 KNT, (C-D) AZ91-% 0.5 GNP, (E-F) AZ91-%0.5 C60.



Şekil 6.74. 40 N aşınma yükü altında EDX analizi (A-B) AZ91-% 0.5 KNT, (C-D) AZ91-%0.5 GNP.

6.7. KOROZYON TEST SONUÇLARI

6.7.1. Karbon Nanopartiküllerinin Saf Magnezyumun Korozyon Performansına Etkisi

%3.5 NaCl çözeltisi içerisinde yapılan korozyon testleri neticesinde takviyesiz magnezyum ve alaşımları ile karbon nanopartikül takviyeli kompozitlere ait potansiyodinamik grafikleri Şekil 6.75 ile Şekil 6.79 arasında verilmiştir. -250 mV ile 250 mV arasında potansiyel uygulanmıştır.

Grafen ve fulleren gibi karbon nanopartiküllerin takviyesi korozyonu hızlandırmış ve galvanik etki oluşturmuştur. Takviyesiz ve karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerde, simetrik olmayan polarizasyon eğrileri sergilenmektedir. Korozyon potansiyeli (E_{corr}) değeri grafen ve fulleren takviyeli kompozitlerde anodik bölgeye

doğru kaymıştır. Tüm numuneler için korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunlukları (i_{corr}) Tafel ekstrapolasyonu ile hesaplanmış ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Magnezyum matrisli kompozitlere ait korozyon sonuçları.

Numune	E_{corr} (V)	i_{corr} (mA/cm ²)	Korozyon hızı (mmy)
Mg	-1,63	0,12	6.35
Mg-%0.1 KNT	-1,58	0,55	29.20
Mg-%0.25 KNT	-1,56	1,21	65.12
Mg-%0.5 KNT	-1,58	1,38	85.70
Mg-%0.1 GNP	-1,59	0,51	26.60
Mg-%0.25 GNP	-1,58	0,89	46.13
Mg-%0.5 GNP	-1,59	1,02	52.77
Mg-%0.1 C60	-1,58	0,47	25.80
Mg-%0.25 C60	-1,56	0,66	39.70
Mg-%0.5 C60	-1,57	0,92	48.66

Hesaplama yapılırken ASTM G102 standardına göre aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Korozyon hızı (mm/year)} = \lambda \cdot i_{corr} \cdot (E.W.) / d \quad [90] \quad (6.1)$$

$$\lambda = 3.27 \times 10^{-3} \text{ (mm. g) / (mA. cm. yıl)}$$

E.W. = Eşdeğer ağırlık

d = Yoğunluk (g/cm³)

Bilindiği üzere, magnezyum tüm mühendislik metallerinin en düşük standart potansiyeline sahiptir. 25 °C'de magnezyum iki değerlikli iyonlarını içeren bir solüsyonla temas halindeyken alaşımsız magnezyum metali ± 2.37 V standart elektrot potansiyel değerindedir. Bu deneysel çalışmalarda, karbon nanotüp, grafen ve fulleren gibi karbon esaslı partiküllerin ilavesi neticesinde, magnezyum ile karbon arasında potansiyel farklılıkları görülmektedir. Bu potansiyel farklılıklar magnezyum alaşımlarında galvanik korozyona neden olmaktadır. Galvanik korozyon genellikle katoda bitişik magnezyumun ağır lokalize korozyonu olarak gözlemlenmektedir. Katotlar, magnezyum ile temas halinde olan diğer malzemeler gibi (C) gibi hem harici

hem de ikinci veya safsızlık fazlarını (MgxAl_y, MgxAl_yC vb.) kapsayacak şekilde içsel de olabilmektedir [83-88].

Literatürde yapılmış deneysel çalışmalar neticesinde, galvanik korozyon oranı aşağıdaki faktörler ile artmaktadır:

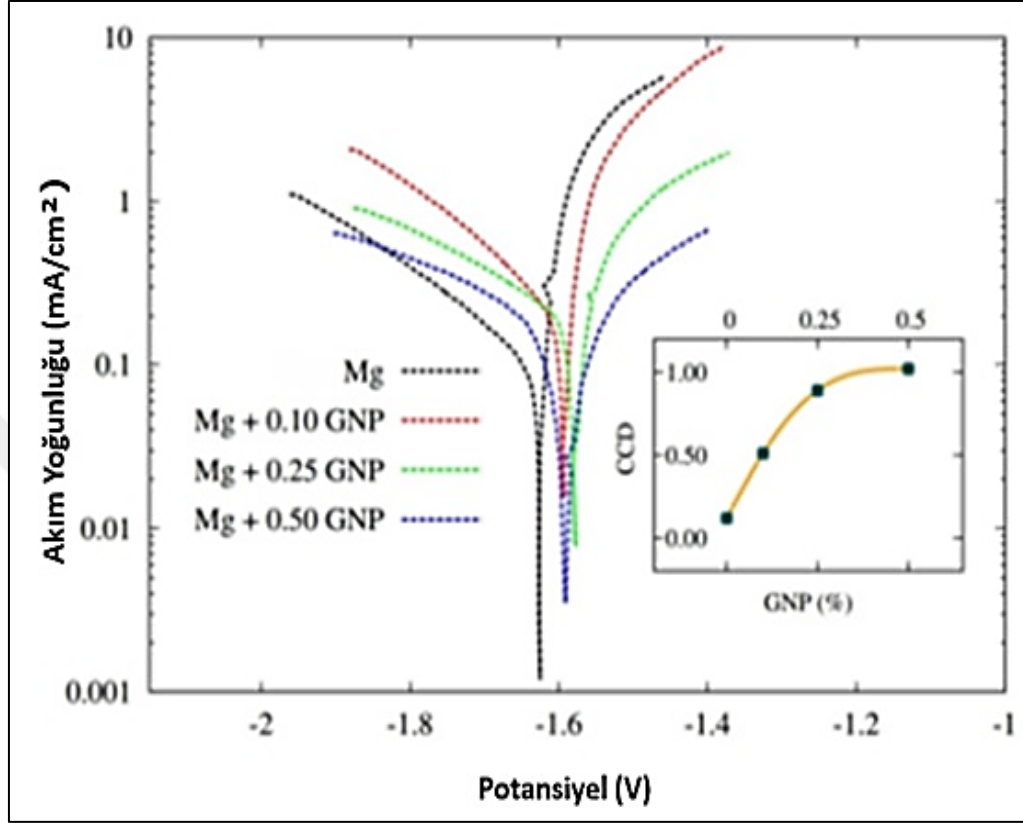
- Ortamın yüksek iletkenliği,
- Anot ve katot arasında büyük potansiyel fark,
- Anot ve katotun düşük polarizasyonu,
- Katotun anoda geniş alan oranı,
- Anottan ve katot arasındaki kısa mesafe [91].

Bu çalışmada ise üretilen kompozit malzemelerde magnezyum ile karbon ürünlerinin bir araya gelmesiyle anot ve katot arasında potansiyel fark oluşmakta ve böylelikle galvanic korozyon da artış görülmektedir.

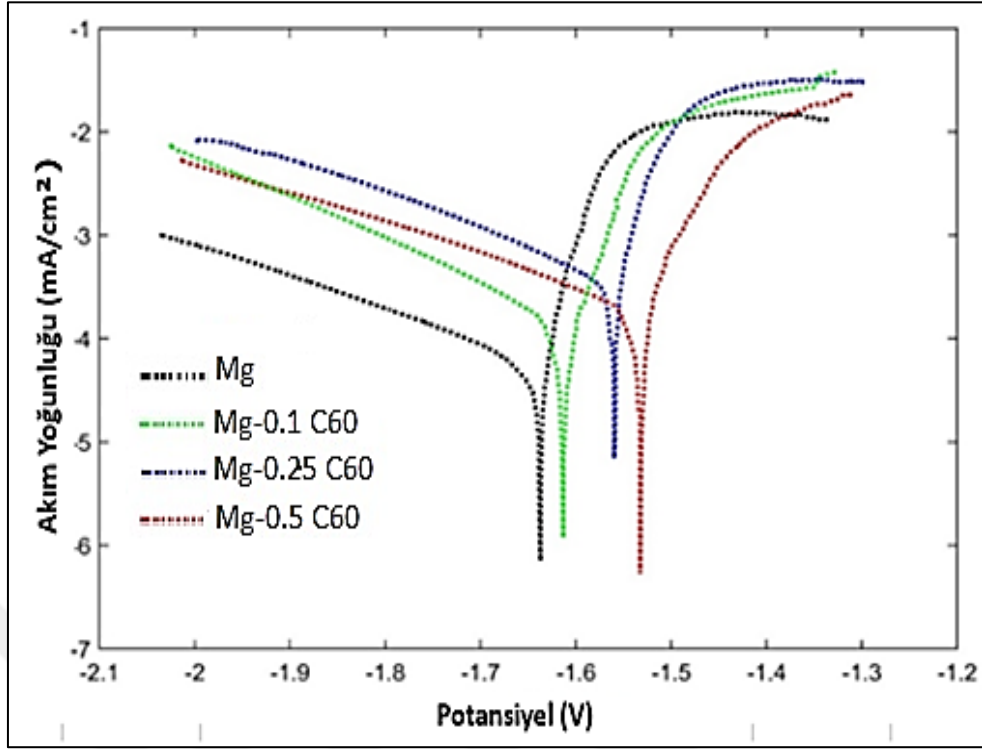
Çizelge 6.2’de verilen değerlere göre, karbon nanotüp, grafen ve fulleren miktarlarının artmasıyla korozyon akımı ve hızında ciddi bir artış görülmüştür. Bunun en önemli sebebi ise saf magnezyum ile karbon atomu arasındaki elektro-potansiyel farktan dolayı oluşan galvanik etkileşimdir. Karbon nanotüp, grafen ve fulleren korozyon esnasında aktif katot görevini üstlenmiş ve korozyon akım yoğunluğunu ciddi bir şekilde etkilemiştir. Çok düşük oranlarda bile (% 0.1) karbon nanopartiküllerin ilavesi magnezyumun performansını önemli ölçüde hasara uğratmıştır.

Karbon nanopartikül ilavesinin artması korozyon hızını arttırsa da bu artışın monotonik olduğu söylenemez. Yani ağırlıkça karbon miktarının %0.1’den %0.25’e kadar çıkmasında meydana gelen korozyon akımındaki artış oranı, karbon miktarının %0.25’ten %0.5’e çıkmasıyla meydana gelen artış oranından daha azdır. Nanopartiküller kendi arasında kıyaslandığında en kötü etkinin karbon nanotüplere ait olduğu gözlemlenmiştir. Bunun muhtemel sebebi, nanotüpler arasındaki güçlü van der waals bağlarının zayıflatılamaması, mikroyapıda diğerleri gibi homojen bir dağılımın söz konusu olmaması ve bunun neticesinde de matris ile takviye arasındaki bağın

zayıflaması olarak öngörülmektedir ve böylelikle korozyon hızında daha yüksek bir artışa neden olmuş olabilir.



Şekil 6.75. Mg-GNP kompozitlerine ait Tafel eğrisi.

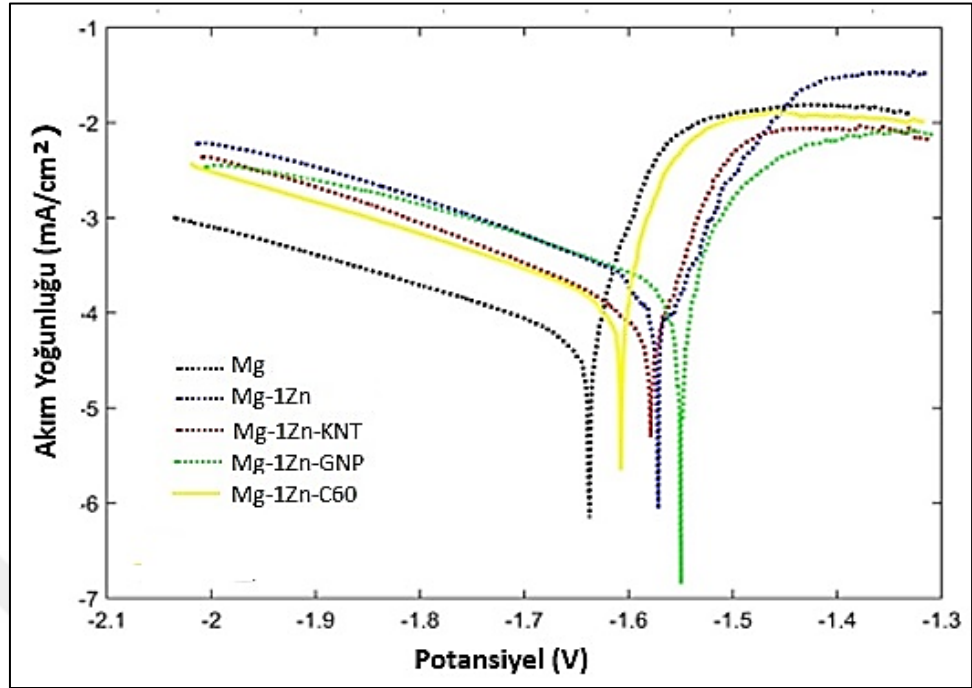


Şekil 6.76. Mg-C60 kompozitlerine ait Tafel eğrisi

6.7.2. Karbon Nanopartiküllerinin Mg-Al ve Mg-Zn Alaşım Serisinin Korozyon Performanslarına Etkisi

Hem alüminyumun hem de çinkonun magnezyum matrisli karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerin korozyon davranışlarına etkisi incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Alüminyumun yüzde 3 oranına kadar artmasıyla saf magnezyumun ve magnezyum matrisli kompozitlerin korozyon direncinde olumlu bir etki sağlanmıştır. Fakat Alüminyumun %9’a ulaşması neticesinde korozyon hızında tekrardan bir artış görülmüştür. Bunun sebebi, alüminyumun belirli bir oranlara kadar saf magnezyum ile karbon atomları arasındaki metalurjik bağı güçlendirmesi ve bunun neticesinde aradaki galvanic etkiyi zayıflatması olarak öngörülmektedir. Çinkonun magnezyum ve magnezyum esaslı kompozitlere ilavesi neticesinde olumlu ya da olumsuz kayda değer bir etki yapmadığı gözlemlenmiştir. %1 oranında çinkonun ağırlıkça ilavesinin az olması mekanik performansta olduğu gibi korozyon davranışında da ekstra bir katkı sağlayamamıştır.



Şekil 6.77. Mg-Zn serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi.

Çizelge 6.3. Mg-Al ve Mg-Zn serisine ait korozyon sonuçları.

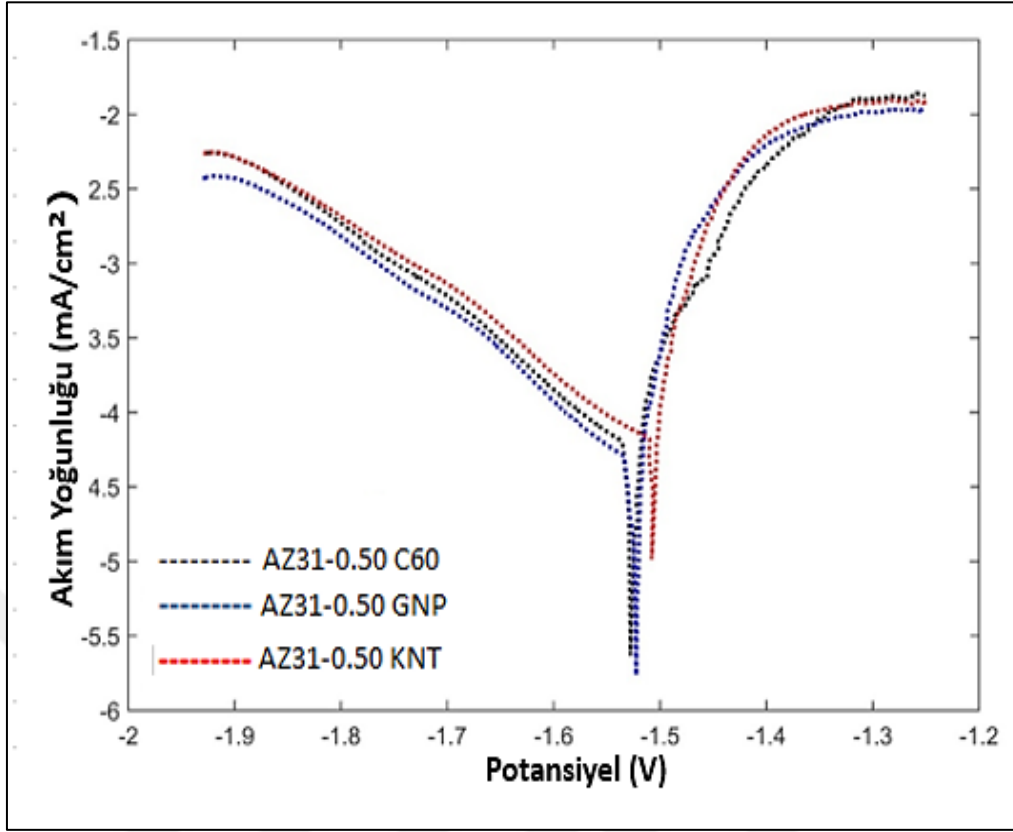
Numune	E_{corr} (V)	i_{corr} (mA/cm ²)	Korozyon hızı (mpy)
Mg-3Al	-1,64	0,10	5.88
Mg-3Al-%0.25 KNT	-1,59	1,04	49.42
Mg-3Al-%0.25 GNP	-1,56	0,79	38.17
Mg-3Al-%0.25 C60	-1,57	0,60	35.21
Mg-9Al	-1,63	0,19	6.71
Mg-9Al-%0.25 KNT	-1,56	1,40	69.92
Mg-9Al-%0.25 GNP	-1,58	0,99	50.17
Mg-9Al-%0.25 C60	-1,56	0,85	45.83
Mg-1Zn	-1,61	0,24	8.46
Mg-1Zn-%0.25 KNT	-1,55	1,25	70.23
Mg-1Zn-%0.25 GNP	-1,58	0,97	51.67
Mg-1Zn-%0.25 C60	-1,59	0,72	42.85

6.7.3. Karbon Nanopartiküllerinin AZ31 ve AZ91 Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Performanslarına Etkisi

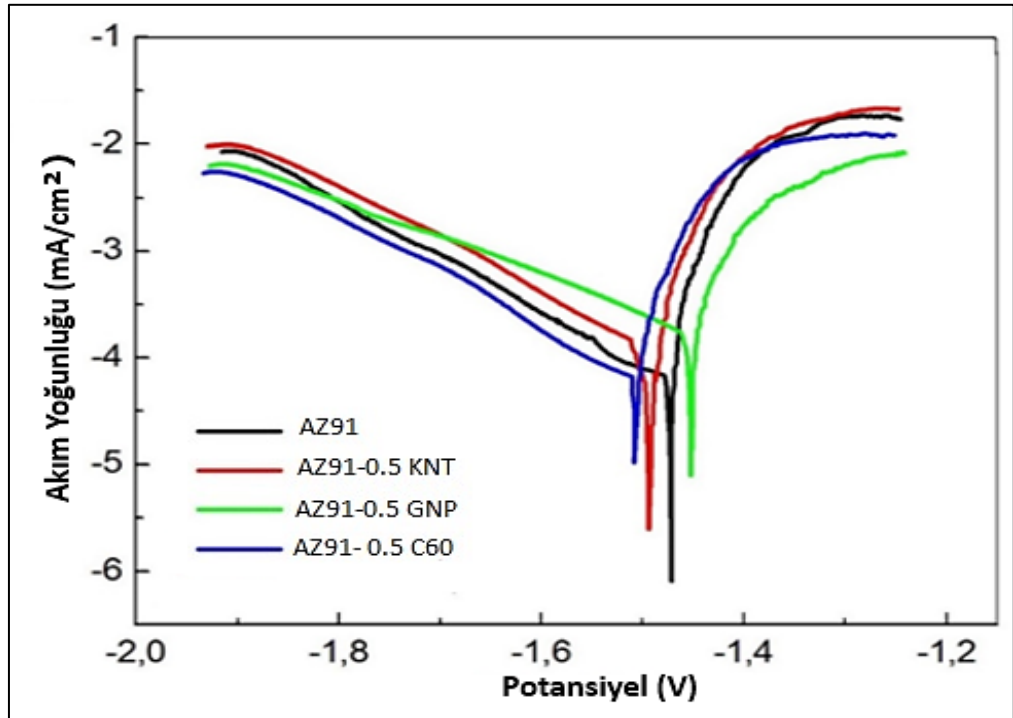
Şekil 6.78 ve 6.79’da AZ31 ve AZ91 esaslı kompozitlere ve Çizelge 6.4’te AZ serisi üretilen tüm numunelere ait korozyon sonuçları verilmiştir. Karbon esaslı kompozitlerin ve takviyesiz AZ91 magnezyum alaşımının korozyon performansı arasında önemli farklar gözlemlenmiştir.

Kompozitlerin anodik ve katodik reaksiyon kinetikleri benzer eğilimlere sahip olsa da, GNP takviyeli kompozit, katodik kısımdaki diğer kompozitlere göre korozyon akımında daha yavaş bir artış gösterirken, anodik parça sırasında daha yüksek korozyon akım yoğunluğu gözlenir.

Genel olarak AZ serisi alaşımlarda da karbon nanotüp, grafen ve fulleren korozyon akım yoğunluğunu arttırıp korozyon direncinde düşüş sağlamıştır. Katodik ve anodik polarizasyonlar, korozyonun başlangıç aşaması sırasında sırasıyla katodik hidrojen gelişimini ve magnezyumun çözünmesini temsil ettiğinden, grafen partiküllerinin önce hidrojen gelişim oranını azalttığı, daha sonra magnezyumun çözünmesini hızlandırdığı sonucuna varılabilir [92,93]. KNT, Çizelge 6.4’e göre en yüksek korozyon oranına sahiptir. Bu durum, KNT parçacıklarının tane sınırları üzerinde toplanma eğilimine atfedilebilmektedir. Bu tür bir eğilim, moleküler korozyonun uyarıldığı KNT bakımından zengin taneler ve KNT içermeyen taneler arasında güçlü bir galvanik çift oluşturabilmektedir. KNT takviyeli kompozitin yüksek katodik ve anodik reaksiyon kinetiklerini ortaya çıkarması ve bunun sonucunda artan galvanik kuplaj nedeniyle magnezyum atomlarının daha hızlı çözünmesine neden olmaktadır. Böylelikle KNT takviyeli kompozit en yüksek korozyon akımına sahip olmaktadır.



Şekil 6.78. AZ31 serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi.

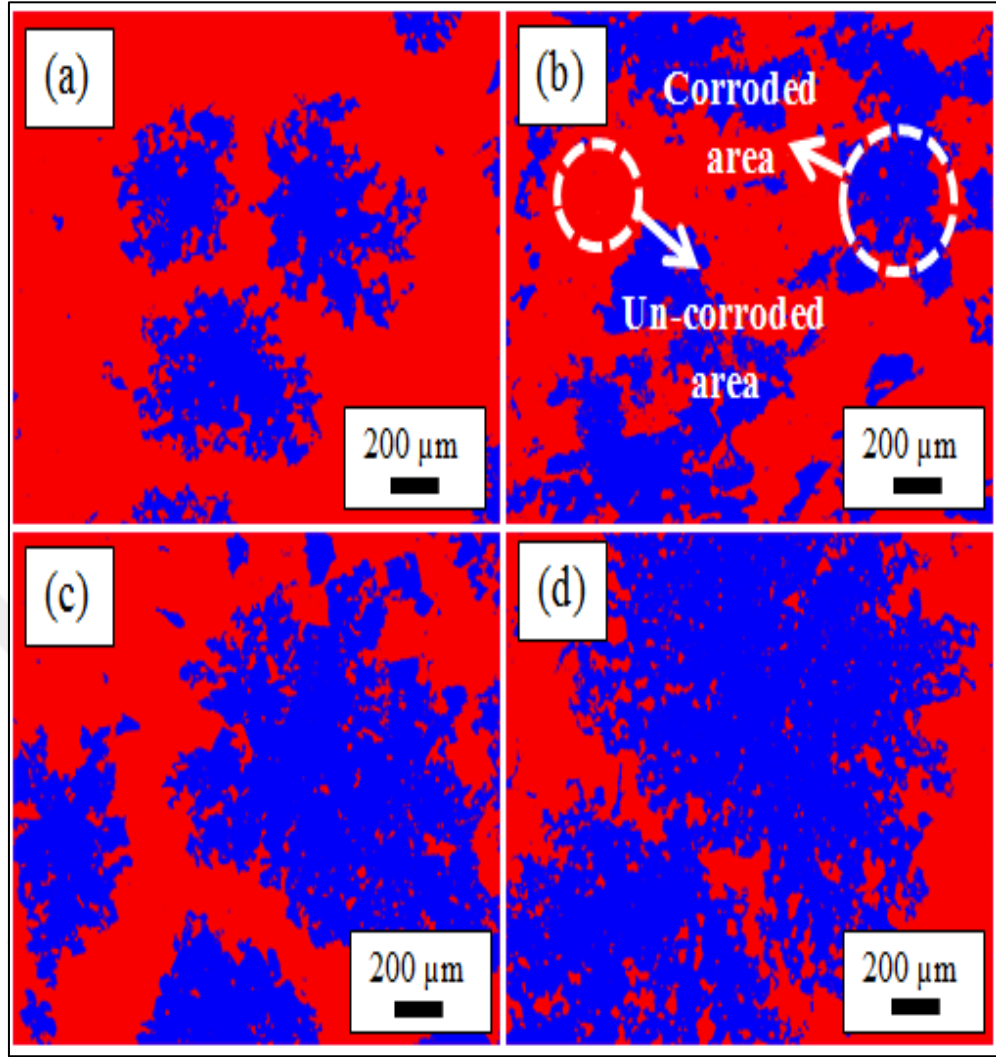


Şekil 6.79. AZ91 serisi kompozitlerine ait Tafel eğrisi.

Çizelge 6.4. AZ serisi numunelere ait korozyon sonuçları.

Numune	E_{corr} (V)	i_{corr} (mA/cm ²)	Korozyon hızı (mpy)
AZ31	-1.483	160.128	1.86
AZ31-%0.1 KNT	-1.488	301.700	4.15
AZ31-%0.25 KNT	1.490	377.615	4.89
AZ31-%0.5 KNT	-1.493	440.562	6.03
AZ31-%0.1 GNP	-1.484	279.127	3.77
AZ31-%0.25 GNP	1.487	350.616	4.68
AZ31-%0.5 GNP	-1.492	420.569	5.45
AZ31-%0.1 C60	-1.489	280.544	3.54
AZ31-%0.25 C60	1.489	369.165	4.42
AZ31-%0.5 C60	-1.492	416.388	5.89
AZ91	-1.472	104.655	1.31
AZ91-%0.1 KNT	-1.485	273.127	3.72
AZ91-%0.25 KNT	1.490	322.455	4.28
AZ91-%0.5 KNT	-1.491	388.431	4.92
AZ91-%0.1 GNP	-1.480	211.135	2.58
AZ91-%0.25 GNP	1.488	299.623	3.87
AZ91-%0.5 GNP	-1.449	326.902	4.13
AZ91-%0.1 C60	-1.477	167.411	1.98
AZ91-%0.25 C60	1.484	191.224	2.44
AZ91-%0.5 C60	-1.506	212.137	2.68

Tafel incelemelerinin ardından aynı oranda karbon nanopartikül içeren AZ91 serisi kompozitlerin yüzeyleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 6.80’de kırmızı ile gösterilen bölümler korozyona uğramamış bölgeleri ve mavi ile gösterilen kısımlar ise korozyona uğramış bölgeleri temsil etmektedir. Bu genel yüzey görüntüleri neticesinde KNT takviyeli kompozitin yüzeyinde diğer numunelere göre daha fazla korozyon hasarı gözlemlenmiştir. Ayrıca Clemex yazılımı vasıtasıyla bu renkli bölgelerin alanları hesaplanmış ve Çizelge 6.5’te verilmiştir. Takviyesiz AZ91 magnezyum alaşımının potansiyodinamik testi neticesinde %22 civarında korozif bölge gözlemlenirken, karbon nanopartikül takviyeli kompozitlerde bu oranda artmış ve KNT takviyeli kompozitte %60’lara kadar ulaşmıştır.



Şekil 6.80. Korozyona uğramış yüzeylerin optic görüntüsü (a) AZ91, (b) AZ91- 0.5 C60, (c) AZ91- 0.5 GNP, (d) AZ91- 0.5 KNT.

Çizelge 6.5. Korozyona uğramış ve uğramamış bölgelerin analizi.

Numuneler	Korozif alan (%)	Korozif olmayan alan (%)
AZ91	22.2 ± 2.1	77.8 ± 5.6
AZ91- % 0.5 C60	36.8 ± 3.5	63.2 ± 5.0
AZ91-% 0.5 GNP	46.6 ± 3.9	53.4 ± 4.7
AZ91-% 0.5 KNT	59.7 ± 4.8	40.3 ± 3.9

Aynı oranda karbon nanopartikül takviyeli AZ91 magnezyum alaşımı matrisli kompozitlere potansiyodinamiğe ek olarak daldırma testleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.81’de verilmiştir. Numuneler aynı derişimdeki çözelti içerisinde (%3.5 NaCl) 24 saat boyunca tutulmuştur ve belirli periyotlar aralığında ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Çözelti içerisinde çıkartıldıktan hemen sonra yüzeyleri kromik asitle temizlenip kurumaya bırakılmıştır. Ağırlık ölçümleri akabinde yapılarak, ilk ağırlık ve son ağırlık

arasındaki fark malzemenin sıvı içerisinde bulunan yüzey alanına bölünerek korozyon hızları hesaplanmıştır.

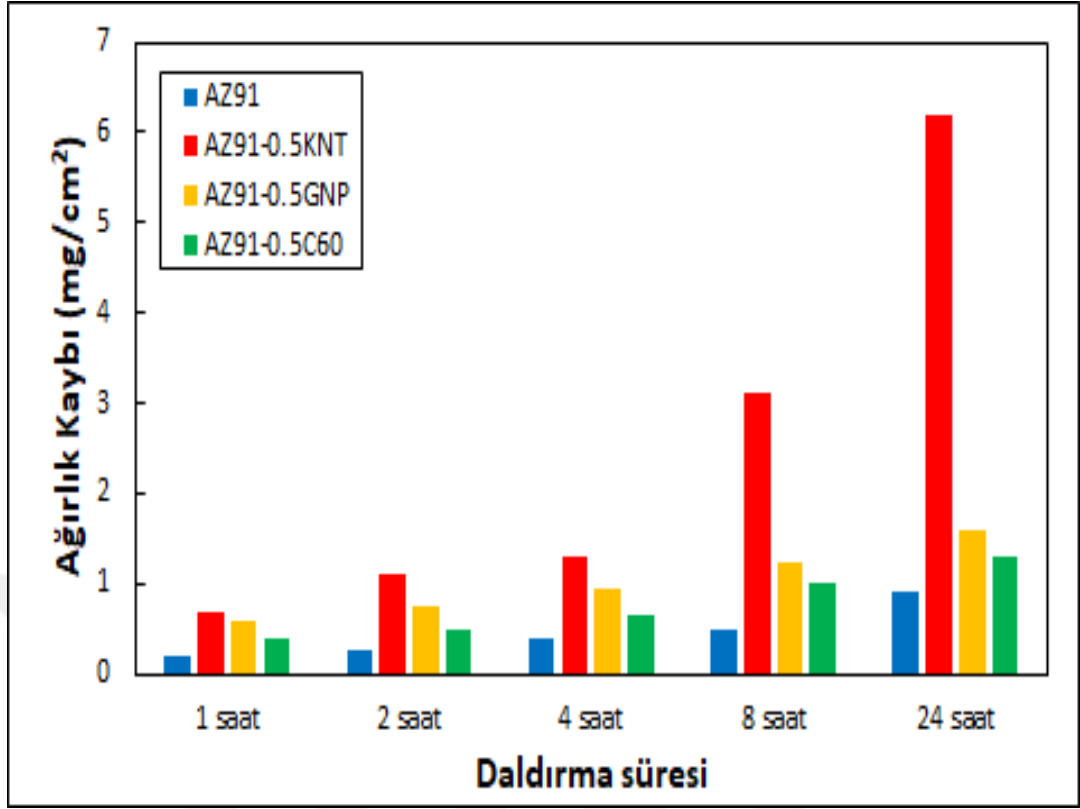
C60 ve GNP takviyeli numunelerin performansının, takviyesiz AZ91 alaşımıyla benzer bir eğilimde olduğu görülmektedir. Öte yandan, KNT takviyeli numunenin korozyon direnci, daldırma periyotlarının artmasıyla önemli ölçüde azalmaktadır. Karbon nanopartikül takviyeli malzemelerde hızlı olarak başlayan korozyon, KNT takviyeli kompozitte 4 saatten sonra çok ciddi bir şekilde ilerlemiştir.

Yukarıda belirtilen elektrokimyasal testler bilindiği üzere sadece kısa bir zaman ölçeği için uygulandığından korozyon nasıl başlayıp nasıl ilerlediği ve belirlenen periyodun sonunda nasıl bittiği daldırma testleriyle gözlemlenmiştir. Genel olarak, elektrokimyasal testlerin sonuçları, en azından kısa zaman ölçekleri için ağırlık kaybı değerleri ile niteliksel olarak uyumludur.

Belirlenen periyotlarda gerçekleştirilen daldırma testleri sonrası numunelerin SEM görüntüleri çekilmiştir. Her bir numuneye ait SEM görüntüsü Şekil 6.82’de verilmiştir. Takviyesiz AZ91 magnezyum alaşımında daha homojen bir korozyon görülmektedir. Artan daldırma süresiyle birlikte tüm numunelerde korozyona uğramış bölgeler hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Nanopartikül takviyeli kompozitlerde genel olarak galvanic korozyon görülmekte olup, lokal korozyona geçiş söz konusudur.

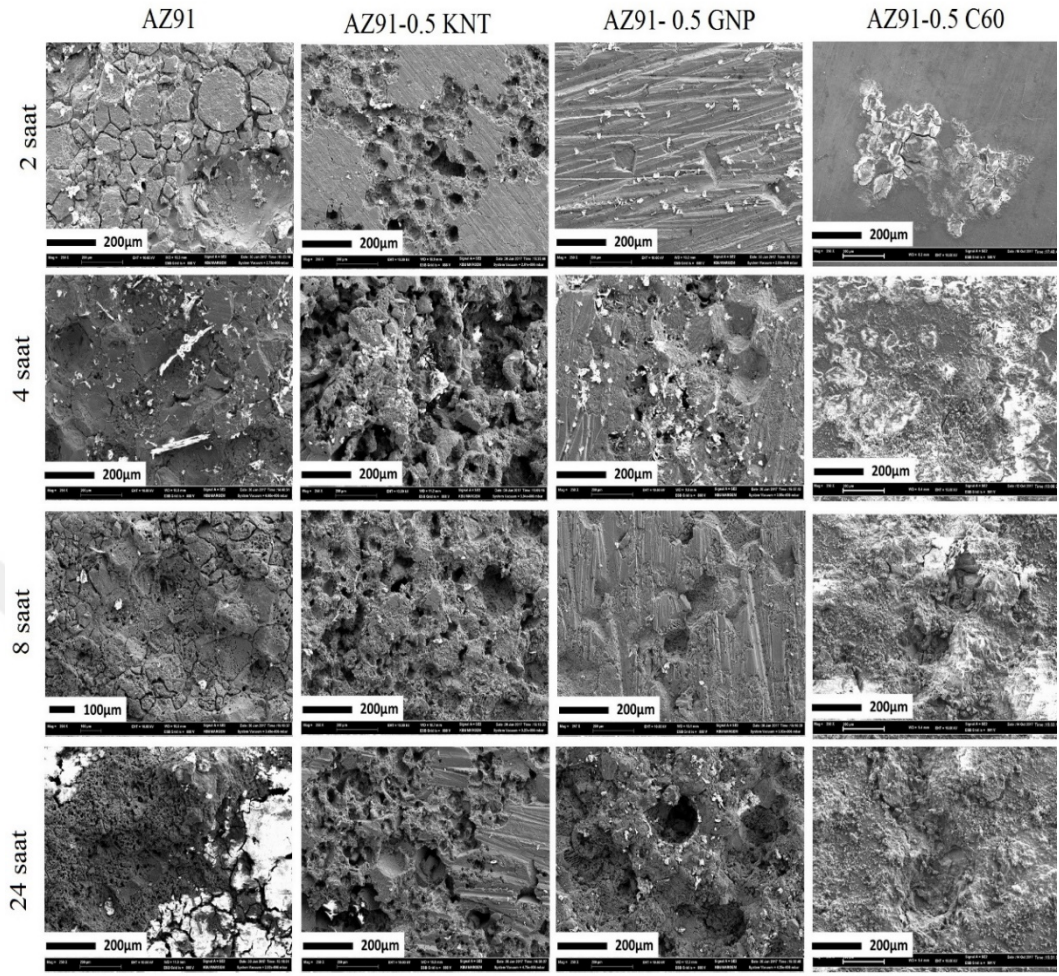
Magnezyum ve alaşımları NaCl çözeltisine maruz kaldıklarında çukur korozyonuna uğrayan pasif malzemelerdir. Çukurlaşma genellikle klorid çözeltilerindeki pasif malzemeler tarafından oluşturulmaktadır. Karbon nanotüp, grafen ve fulleren takviye bölgelerinin yakınındaki matris üzerinde korozyon başlamakta ve dalma zamanının artmasıyla derin çukurlar meydana gelmektedir.

Genellikle kompozitlerde galvanic, lokal ve çukur korozyon türleri görülmüştür. Daldırma süresinin artışı özellikle takviyeli AZ91 alaşımında yüzeyi hasara uğratmıştır. Matris zamanla çözülmemekte ve takviyeler sistemden uzaklaşmaktadır.



Şekil 6.81. AZ91 serisine ait daldırma test sonuçları.

Magnezyum ve diğer magnezyum alaşımlarına (Mg-3Al, Mg-9Al, Mg-1Zn, AZ31) yapılan daldırma test sonuçları Şekil Ek A.1 ile Ek A.5 arasında verilmiştir.



Şekil 6.82. Daldırma sonrası SEM görüntüleri.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Saf magnezyum, Magnezyum-Aluminyum, Magnezyum-Çinko, AZ31 ve AZ91 alaşımları bu çalışmada matris olarak kullanılmıştır. Bu matris malzemelerine karbon nanotüp, grafen ve fulleren gibi karbon esaslı nanopartiküller farklı oranlarda takviye edilmiştir. Yenilikçi bir yöntem olan yarı toz metalurjisi (solüsyon bazlı) kullanılarak kompozit malzemeler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Yapılan sertlik, faz analizi, yoğunluk, mikroyapı, mekanik ve korozyon testleri neticesinde elde edilen genel bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunlukları arşimet prensibine göre ölçülerek teorik yoğunluklarıyla kıyaslanmıştır. % 95'in üzerinde yoğunluk elde edilmiş, özellikle grafen ve fulleren miktarlarının çok düşük ilave edilmesi neticesinde yoğunluk oranı %99'un üzerine çıkmıştır.
- Faz analizleri XRD yöntemine göre yapılmış ve hızlı taramalar neticesinde karbon oranının çok düşük olmasından dolayı herhangi bir nanopartikül tespit edilememiştir. Bunun üzerine cihazın veri tabanında yer alan karbon nanotüp, grafen ve fullerene ait maksimum piklerin olduğu açılarda yavaş taramalar özel olarak yapılmış ve nanopartiküllere ait pikler tespit edilmiştir. Bu durum kompozit malzemenin içerisinde karbon esaslı partiküllerin varlığına işaretir.
- SEM analizleri ve akabinde yapılan EDX haritalama testleriyle kompozitlerin mikroyapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genellikle düşük oranlarda nanopartikül ilave edildiğinde matris içerisinde uniform ve homojen dağılım gözlemlenmiştir. Fulleren ve grafen takviyeleri karbon nanotüp partiküllerine göre daha homojen dağılmış ve daha az topaklanmalar görülmüştür. Diğer yandan karbon nanotüplerde ağırlıklı olarak yüzde 0.25' ten fazla oranlarda karbon atomları arasındaki güçlü van

der waals bağlarından dolayı tane sınırlarında birikmeler gözlemlenmiştir.

- Sertlik testlerinin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, yapıya matristen daha sert nanopartiküllerin ilave edilmesiyle dislokasyon yoğunluğu artmakta ve bu da sertlik artışına sebebiyet vermektedir. Ayrıca sertlik, magnezyum ve alaşımlarında nanopartiküllerin oranlarının artmasıyla orantılı bir şekilde artış göstermiştir. Fakat %0.25'ten fazla oranlarda ilave edilmesi sertlik artış oranını azaltmıştır. Kısaca nanopartiküllerin yapı içerisinde homojen dağılıp dağılmamasına bağlı olarak sertlik performansları değişiklik göstermiştir.
- Yapılan basma testleri neticesinde, karbon nanopartiküllerin magnezyum esaslı matris malzemelerinin akma ve basma mukavemetlerini önemli derecede geliştirdiği görülmüştür. Yine mekanik özellik açısından da en iyi numuneler fulleren takviyeli kompozitlere aittir. Bunun sebebi olarak ta fullerenin daha yüksek yüzey alanına dolayısıyla daha fazla dislokasyon yoğunluğuna neden olduğu düşünülmektedir. Bu yüksek yoğunluk dislokasyon hareketlerini engellemekte ve mukavemette kayda değer etki sağlamaktadır. Ayrıca matris ile takviye arasındaki termal genleşme katsayısı ve elastik modülüs farkı basma mukavemetinin belirlenmesinde önemli etkiye neden olmuştur.
- Aşınma testleri farklı yüklerde denenmiş ve elde edilen bulgular neticesinde nanopartikül olarak en olumlu etki sunan daha yüksek yüzey alanına sahip fulleren olmuştur. Genel itibariyle karbon nanopartiküller yüzeyde yağlayıcı etki sağlayarak aşınmayı zorlaştırmıştır. Aşınma çeşitleri olarak abrasif, adhesif ve oksidatif mekanizmaları görülmüştür.
- Karbon nanopartiküllerin mekanik olarak bahsi geçen olumlu etkilerine rağmen korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. KNT, GNP ve C60, magnezyum ve alaşımlarıyla bir araya geldiğinde potansiyel farklarından dolayı galvanik etkileşime maruz kalmışlardır. Galvanik etki hem nanopartikül türüne hem de oranına bağlı olarak değişiklik göstermiş fakat korozyon akım yoğunluğunu arttırarak korozyonu daha hızlı hale getirmiştir.
- Yapılan daldırma testleri neticesinde de potansiyodinamik testleriyle ilişkili sonuçlar elde edilmiştir. Korozyon karbon nanopartiküllerin

ilavesiyle hızlı bir şekilde başlamış ve 8 saatten sonra özellikle karbon nanotüp için oldukça kötü bir şekilde ilerlemiştir. Galvanik korozyonun yanında, local korozyon, matrisin korozyona uğraması neticesinde görülen tane içi korozyon ve çukur korozyonu numunelerde tespit edilmiştir.

Kısaca, geleceğin malzemeleri olan karbon nanopartiküller bu tez çalışmasında magnezyum ve alaşımlarına başarılı bir şekilde ilave edilmiştir. Çok düşük oranlarda bile takviye edilmesiyle ciddi mukavemet artışına sebep olmuştur. Dolayısıyla kompozit teknolojisinde yakın bir zaman içerisinde popüler konu haline gelecektir. Bu karbon esaslı nanopartiküller kullanılarak magnezyum ve alaşımlarının, otomotiv, havacılık, elektronik eşya gibi sektörlerde kullanımının artırılması mümkün olabilecektir. Bu nanopartiküller daha yüksek oranlarda uniform bir şekilde matrise dağıtılabilmesi ve toz metalurjisi dışında döküm, infiltrasyon gibi yöntemlerle de üretilmesi başarılabılırsa yeni malzemeler geliştirilebilecektir. Diğer yandan korozif uygulamalar gerektiren alanlarda kullanımı sıkıntılı olmaktadır. Bu problemin de oksitli farklı takviyelerinde dahil edilerek hibrit yapıların üretilmesiyle ya da kaplama teknikleriyle giderilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Avedesian, M. M. and Baker, H., "ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", *ASM International*, (1999).
2. Mordike, B. L. and Ebert, T., "Magnesium: properties—applications—potential", *Materials Science And Engineering: A*, 302 (1): 37–45 (2001).
3. Gupta, M. and Wong, W. L. E., "Magnesium-based nanocomposites: Lightweight materials of the future", *Materials Characterization*, 105: 30–46 (2015).
4. Kainer, K. U., "Magnesium—Alloys and Technologies WILEY-VCH GmbH & Co", *KGaA*, (2003).
5. McBride, E. D., "Absorbable metal in bone surgery: a further report on the use of magnesium alloys", *Journal Of The American Medical Association*, 111 (27): 2464–2467 (1938).
6. Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., and Dias, G., "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review", *Biomaterials*, 27 (9): 1728–1734 (2006).
7. Peng, Z., Yi, Y., Cao, Y., Du, K., and Hu, G., "Electrodeposition of Hydroxyapatite Coating on Magnesium Alloy for Biomaterial Application", (2012).
8. Song, Y. W., Shan, D. Y., and Han, E. H., "Electrodeposition of hydroxyapatite coating on AZ91D magnesium alloy for biomaterial application", *Materials Letters*, 62 (17–18): 3276–3279 (2008).
9. "TSMA-Report",
http://www.sports.org.tw/e/report_main.asp?a_table=03lightweight
(2018).
10. Rashad, M., Pan, F., Asif, M., and Chen, X., "Corrosion behavior of magnesium-graphene composites in sodium chloride solutions", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 5 (3): 271–276 (2017).
11. Saravanan, R. A. and Surappa, M. K., "Fabrication and characterisation of pure magnesium-30 vol.% SiCP particle composite", *Materials Science And Engineering: A*, 276 (1–2): 108–116 (2000).

12. Gupta, M., Lai, M. O., and Saravananaranganathan, D., "Synthesis, microstructure and properties characterization of disintegrated melt deposited Mg/SiC composites", *Journal Of Materials Science*, 35 (9): 2155–2165 (2000).
13. Ferkel, H. and Mordike, B. L., "Magnesium strengthened by SiC nanoparticles", *Materials Science And Engineering: A*, 298 (1–2): 193–199 (2001).
14. Trojanova, Z., Lukáč, P., Ferkel, H., Mordike, B. L., and Riehemann, W., "Stability of micro structure in magnesium reinforced by nanoscaled alumina particles", *Materials Science And Engineering: A*, 234: 798–801 (1997).
15. Hassan, S. F. and Gupta, M., "Development of high performance magnesium nano-composites using nano-Al₂O₃ as reinforcement", *Materials Science And Engineering: A*, 392 (1–2): 163–168 (2005).
16. Hassan, S. F. and Gupta, M., "Development of nano-Y₂O₃ containing magnesium nanocomposites using solidification processing", *Journal Of Alloys And Compounds*, 429 (1–2): 176–183 (2007).
17. Esawi, A. M. K., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M., and Lanka, S., "The influence of carbon nanotube (CNT) morphology and diameter on the processing and properties of CNT-reinforced aluminium composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (3): 234–243 (2011).
18. Yuan, X. and Huang, S., "Microstructural characterization of MWCNTs/magnesium alloy composites fabricated by powder compact laser sintering", *Journal of Alloys and Compounds*, 620: 80–86 (2015).
19. Selvam, M., Saminathan, K., Siva, P., Saha, P., and Rajendran, V., "Corrosion behavior of Mg/graphene composite in aqueous electrolyte", *Materials Chemistry and Physics*, 172: 129–136 (2016).
20. "Aran A. (2008), Metal Matrisli Kompozit Malzemeler, Ders Notları, Ğ.T.Ü - (2018).
21. "Eker A. A. (2008), Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Ders Notları. - (2018).
22. Ekici, R., "Alüminyum Esaslı SiC Partikül Takviyeli Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2004).
23. Tekmen, Ç., "Metal Matriksli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi. Dokuz Eylül Üniversitesi", *Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, İzmir, 122s*, (2006).

24. Çalın, R., "Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi", **Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara**, (2006).
25. Toptan, F., "Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi", **Yüksek Lisans Tezi, YTÜ FBE**, (2006).
26. Kılıç, C., "Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş ve soğuk haddelenmiş AlMg3/SiCp kompozitinin aşınma özelliklerinin incelenmesi", Master's Thesis, (2008).
27. Bundy, F. P., "Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus", **The Journal of Chemical Physics**, 38 (3): 631–643 (1963).
28. Harris, P. J., "Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials for the Twenty-First Century", **AAPT**, (2004).
29. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon", **Nature**, 354 (6348): 56 (1991).
30. Harris, P. J., "Carbon nanotube composites", **International Materials Reviews**, 49 (1): 31–43 (2004).
31. Bethune, D. S., Kiang, C. H., De Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., and Beyers, R., "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls", **Nature**, 363 (6430): 605–607 (1993).
32. Iijima, S. and Ichihashi, T., "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", **Nature**, 363 (6430): 603 (1993).
33. Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, Y. H., Kim, S. G., and Rinzler, A. G., "Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes", **Science**, 273 (5274): 483–487 (1996).
34. Treacy, M. J., Ebbesen, T. W., and Gibson, J. M., "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", **Nature**, 381 (6584): 678 (1996).
35. Pan, Z. W., Xie, S. S., Chang, B. H., Wang, C. Y., Lu, L., Liu, W., Zhou, W. Y., Li, W. Z., and Qian, L. X., "Very long carbon nanotubes", **Nature**, 394 (6694): 631 (1998).
36. Wong, E. W., Sheehan, P. E., and Lieber, C. M., "Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes", **Science**, 277 (5334): 1971–1975 (1997).
37. Falvo, M. R., Clary, G. J., Taylor, R. M., Chi, V., Brooks Jr, F. P., Washburn, S., and Superfine, R., "Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain", **Nature**, 389 (6651): 582 (1997).

38. Tepe, A., "Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi", PhD Thesis, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).
39. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., and Aamir, M., "Synergetic effect of graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotube (MW-CNTs) on mechanical properties of pure magnesium", *Journal of Alloys and Compounds*, 603: 111–118 (2014).
40. Shimizu, Y., Miki, S., Soga, T., Itoh, I., Todoroki, H., Hosono, T., Sakaki, K., Hayashi, T., Kim, Y. A., and Endo, M., "Multi-walled carbon nanotube-reinforced magnesium alloy composites", *Scripta Materialia*, 58 (4): 267–270 (2008).
41. Han, G., Wang, Z., Liu, K., Li, S., Du, X., and Du, W., "Synthesis of CNT-reinforced AZ31 magnesium alloy composites with uniformly distributed CNTs", *Materials Science and Engineering: A*, 628: 350–357 (2015).
42. Aung, N. N., Zhou, W., Goh, C. S., Nai, S. M. L., and Wei, J., "Effect of carbon nanotubes on corrosion of Mg–CNT composites", *Corrosion Science*, 52 (5): 1551–1553 (2010).
43. Boehm, H. P., Setton, R., and Stumpp, E., "Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds (IUPAC Recommendations 1994)", *Pure and Applied Chemistry*, 66 (9): 1893–1901 (1994).
44. Terrones, M., Hsu, W. K., Kroto, H. W., and Walton, D. R., "Nanotubes: a revolution in materials science and electronics", *Fullerenes and Related Structures*, *Springer*, 189–234 (1999).
45. Mintmire, J. W., Dunlap, B. I., and White, C. T., "Are fullerene tubules metallic?", *Physical Review Letters*, 68 (5): 631 (1992).
46. Saito, R., Fujita, M., Dresselhaus, G., and Dresselhaus, M. S., "Electronic structure of graphene tubules based on C 60", *Physical Review B*, 46 (3): 1804 (1992).
47. Hamada, N., Sawada, S., and Oshiyama, A., "New one-dimensional conductors: graphitic microtubules", *Physical Review Letters*, 68 (10): 1579 (1992).
48. Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Hiura, H., Bennett, J. W., Ghaemi, H. F., and Thio, T., "Electrical conductivity of individual carbon nanotubes", *Nature*, 382 (6586): 54 (1996).
49. Tsang, S. C., Chen, Y. K., Harris, P. J. F., and Green, M. L. H., "A simple chemical method of opening and filling carbon nanotubes", *Nature*, 372 (6502): 159 (1994).

50. Lago, R. M., Tsang, S. C., Lu, K. L., Chen, Y. K., and Green, M. L. H., "Filling carbon nanotubes with small palladium metal crystallites: the effect of surface acid groups", *Journal Of The Chemical Society, Chemical Communications*, (13): 1355–1356 (1995).
51. Sun, Y.-P., Fu, K., Lin, Y., and Huang, W., "Functionalized carbon nanotubes: properties and applications", *Accounts of Chemical Research*, 35 (12): 1096–1104 (2002).
52. Sinnott, S. B., "Chemical functionalization of carbon nanotubes", *Journal of Nanoscience And Nanotechnology*, 2 (2): 113–123 (2002).
53. Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., and McEuen, P. L., "Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes", *Physical Review Letters*, 87 (21): 215502 (2001).
54. Thostenson, E. T., Li, C., and Chou, T.-W., "Nanocomposites in context", *Composites Science and Technology*, 65 (3–4): 491–516 (2005).
55. Rashad, M., Pan, F., Asif, M., and Tang, A., "Powder metallurgy of Mg–1% Al–1% Sn alloy reinforced with low content of graphene nanoplatelets (GNPs)", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (6): 4250–4255 (2014).
56. Han, G., Wang, Z., Liu, K., Li, S., Du, X., and Du, W., "Synthesis of CNT-reinforced AZ31 magnesium alloy composites with uniformly distributed CNTs", *Materials Science and Engineering: A*, 628: 350–357 (2015).
57. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Lu, Y., Asif, M., Hussain, S., She, J., Gou, J., and Mao, J., "Effect of graphene nanoplatelets (GNPs) addition on strength and ductility of magnesium-titanium alloys", *Journal of Magnesium and Alloys*, 1 (3): 242–248 (2013).
58. Rashad, M., Pan, F., Lin, D., and Asif, M., "High temperature mechanical behavior of AZ61 magnesium alloy reinforced with graphene nanoplatelets", *Materials & Design*, 89: 1242–1250 (2016).
59. Cataldo, F., "Fullerane, the hydrogenated C60 fullerene: Properties and astrochemical considerations", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 11 (4): 295–316 (2003).
60. David, W. I. F., Ibberson, R. M., Dennis, T. J. S., Hare, J. P., and Prassides, K., "Structural phase transitions in the fullerene C60", *EPL (Europhysics Letters)*, 18 (3): 219 (1992).
61. Hirsch, A., "The Chemistry of the Fullerenes", *John Wiley & Sons*, (2008).
62. Prato, M., "Fullerene materials", *Fullerenes and Related Structures*, *Springer*, 173–187 (1999).

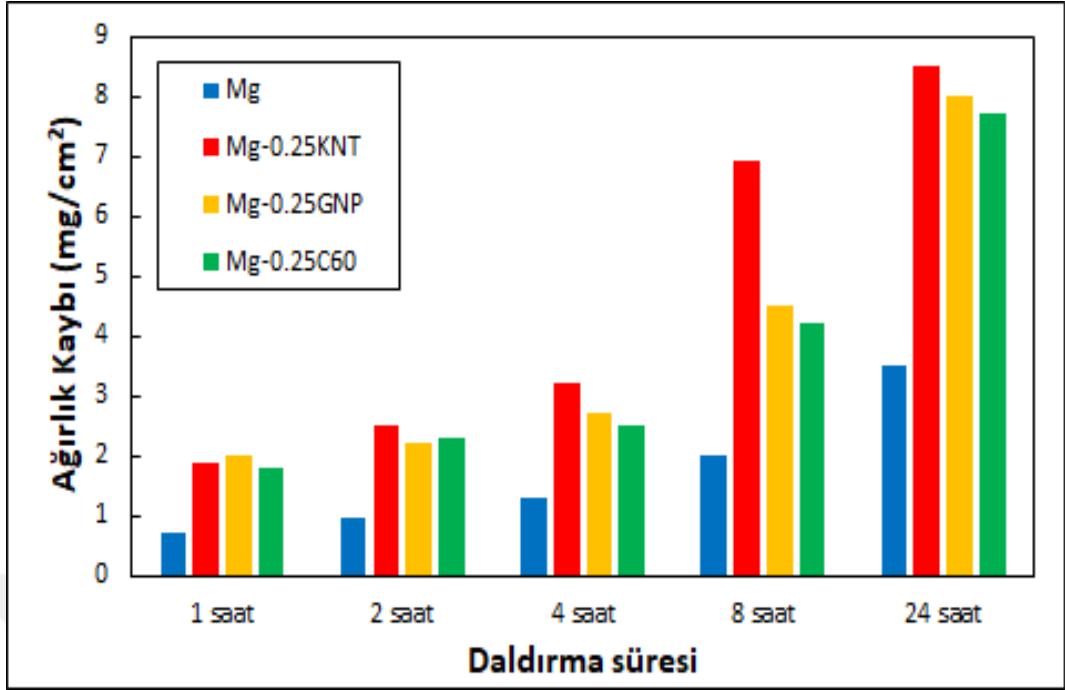
63. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., She, J., Gou, J., Mao, J., and Hu, H., "Development of magnesium-graphene nanoplatelets composite", *Journal Of Composite Materials*, 49 (3): 285–293 (2015).
64. Turan, M. E., Sun, Y., Akgul, Y., Turen, Y., and Ahlatci, H., "The effect of GNPs on wear and corrosion behaviors of pure magnesium", *Journal of Alloys and Compounds*, 724: 14–23 (2017).
65. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., and Aamir, M., "Synergetic effect of graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotube (MW-CNTs) on mechanical properties of pure magnesium", *Journal of Alloys and Compounds*, 603: 111–118 (2014).
66. Rashad, M., Pan, F. S., Asif, M., and Ullah, A., "Improved mechanical properties of magnesium-graphene composites with copper-graphene hybrids", *Materials Science and Technology*, 31 (12): 1452–1461 (2015).
67. Russell-Stevens, M., Todd, R., and Papakyriacou, M., "Microstructural analysis of a carbon fibre reinforced AZ91D magnesium alloy composite", *Surface and Interface Analysis: An International Journal Devoted to The Development and Application of Techniques for The Analysis of Surfaces, Interfaces And Thin Films*, 37 (3): 336–342 (2005).
68. Rashad, M., Pan, F., and Asif, M., "Magnesium matrix composites reinforced with graphene nanoplatelets", *Graphene Materials: Fundamentals and Emerging Applications*, 151–189 (2015).
69. Jublot, M. and Texier, M., "Sample preparation by focused ion beam micromachining for transmission electron microscopy imaging in front-view", *Micron*, 56: 63–67 (2014).
70. Tarutani, M., Takai, Y., and Shimizu, R., "Application of the focused-ion-beam technique for preparing the cross-sectional sample of chemical vapor deposition diamond thin film for high-resolution transmission electron microscope observation", *Japanese Journal of Applied Physics Part 2 Letters*, 31: L1305–L1305 (1992).
71. Rashad, M., Pan, F., and Asif, M., "Exploring mechanical behavior of Mg–6Zn alloy reinforced with graphene nanoplatelets", *Materials Science and Engineering: A*, 649: 263–269 (2016).
72. Tun, K. S. and Gupta, M., "Improving mechanical properties of magnesium using nano-yttria reinforcement and microwave assisted powder metallurgy method", *Composites Science and Technology*, 67 (13): 2657–2664 (2007).
73. E Wong, W. L. and Gupta, M., "Simultaneously improving strength and ductility of magnesium using nano-size SiC particulates and microwaves", *Advanced Engineering Materials*, 8 (8): 735–740 (2006).

74. Thakur, S. K., Kwee, G. T., and Gupta, M., "Development and characterization of magnesium composites containing nano-sized silicon carbide and carbon nanotubes as hybrid reinforcements", *Journal Of Materials Science*, 42 (24): 10040–10046 (2007).
75. Turan, M. E., Sun, Y., and Akgul, Y., "Mechanical, tribological and corrosion properties of fullerene reinforced magnesium matrix composites fabricated by semi powder metallurgy", *Journal of Alloys and Compounds*, (2018).
76. Turan, M. E., Sun, Y., and Akgul, Y., "Improved wear properties of magnesium matrix composite with the addition of fullerene using semi powder metallurgy", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 26 (2): 130–136 (2018).
77. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., and Asif, M., "Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method", *Progress in Natural Science: Materials International*, 24 (2): 101–108 (2014).
78. George, R., Kashyap, K. T., Rahul, R., and Yamdagni, S., "Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites", *Scripta Materialia*, 53 (10): 1159–1163 (2005).
79. Clyne, T. W. and Withers, P. J., "An Introduction to Metal Matrix Composites", *Cambridge University Press*, (1995).
80. Luster, J. W., Thumann, M., and Baumann, R., "Mechanical properties of aluminium alloy 6061–Al₂O₃ composites", *Materials Science and Technology*, 9 (10): 853–862 (1993).
81. Habibi, M. K., Hamouda, A. S., and Gupta, M., "Hybridizing boron carbide (B₄C) particles with aluminum (Al) to enhance the mechanical response of magnesium based nano-composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 550: 83–93 (2013).
82. Aikin Jr, R. M. and Christodoulou, L., "The role of equiaxed particles on the yield stress of composites", (1991).
83. Lee, J.-U., Yoon, D., and Cheong, H., "Estimation of Young's modulus of graphene by Raman spectroscopy", *Nano Letters*, 12 (9): 4444–4448 (2012).
84. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., Hussain, S., Gou, J., and Mao, J., "Improved strength and ductility of magnesium with addition of aluminum and graphene nanoplatelets (Al+ GNPs) using semi powder metallurgy method", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23: 243–250 (2015).

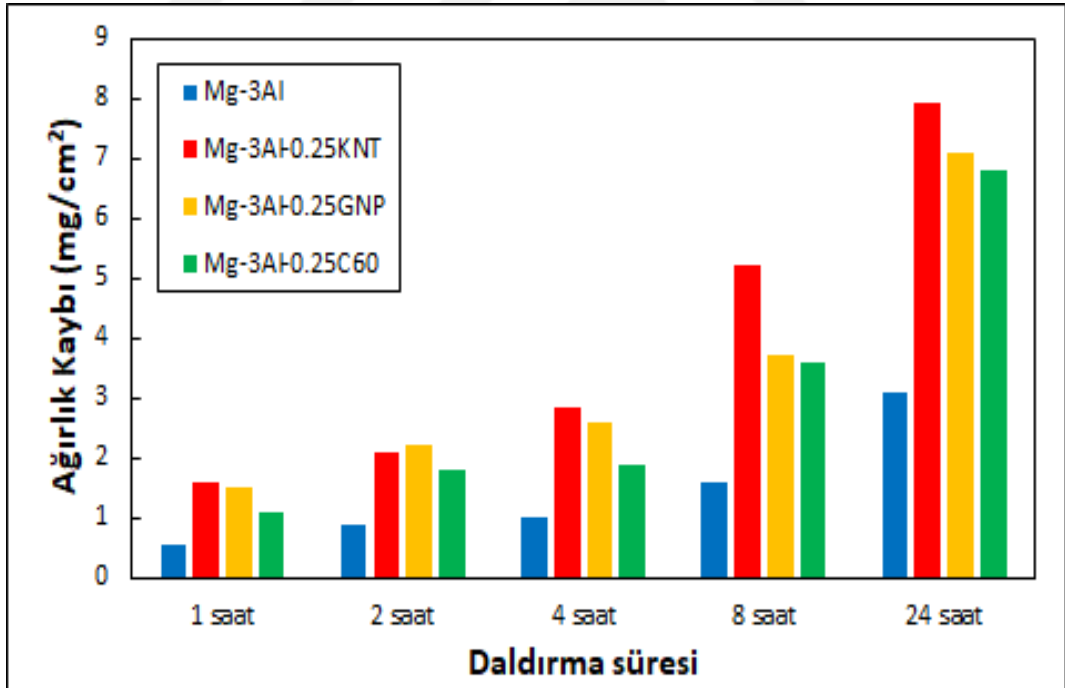
85. Arsenault, R. J. and Shi, N., "Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion", *Materials Science And Engineering*, 81: 175–187 (1986).
86. Dai, L., Sorkin, V., and Zhang, Y.-W., "Effect of surface chemistry on the mechanisms and governing laws of friction and wear", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (13): 8765–8772 (2016).
87. Chawla, N. and Shen, Y.-L., "Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites", *Advanced Engineering Materials*, 3 (6): 357–370 (2001).
88. Labib, F., Ghasemi, H. M., and Mahmudi, R., "Dry tribological behavior of Mg/SiCp composites at room and elevated temperatures", *Wear*, 348: 69–79 (2016).
89. Zhou, J., Xu, J., Huang, S., Hu, Z., Meng, X., and Feng, X., "Effect of laser surface melting with alternating magnetic field on wear and corrosion resistance of magnesium alloy", *Surface and Coatings Technology*, 309: 212–219 (2017).
90. "G102–89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements - (2018).
91. Loose, W. S., Pidgeon, L. M., and Mathes, J. C., "Corrosion and protection of magnesium", *ASM Int, Materials Park, OH*, 173 (1946).
92. Chang, J. W., Peng, L. M., Guo, X. W., Atrens, A., Fu, P. H., Ding, W. J., and Wang, X. S., "Comparison of the corrosion behaviour in 5% NaCl solution of Mg alloys NZ30K and AZ91D", *Journal of Applied Electrochemistry*, 38 (2): 207–214 (2008).
93. Zengin, H., Turen, Y., Ahlatci, H., and Sun, Y., "Mechanical Properties and Corrosion Behavior of As-Cast Mg-Zn-Zr-(La) Magnesium Alloys", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27 (2): 389–397 (2018).

EK AÇIKLAMALAR A.

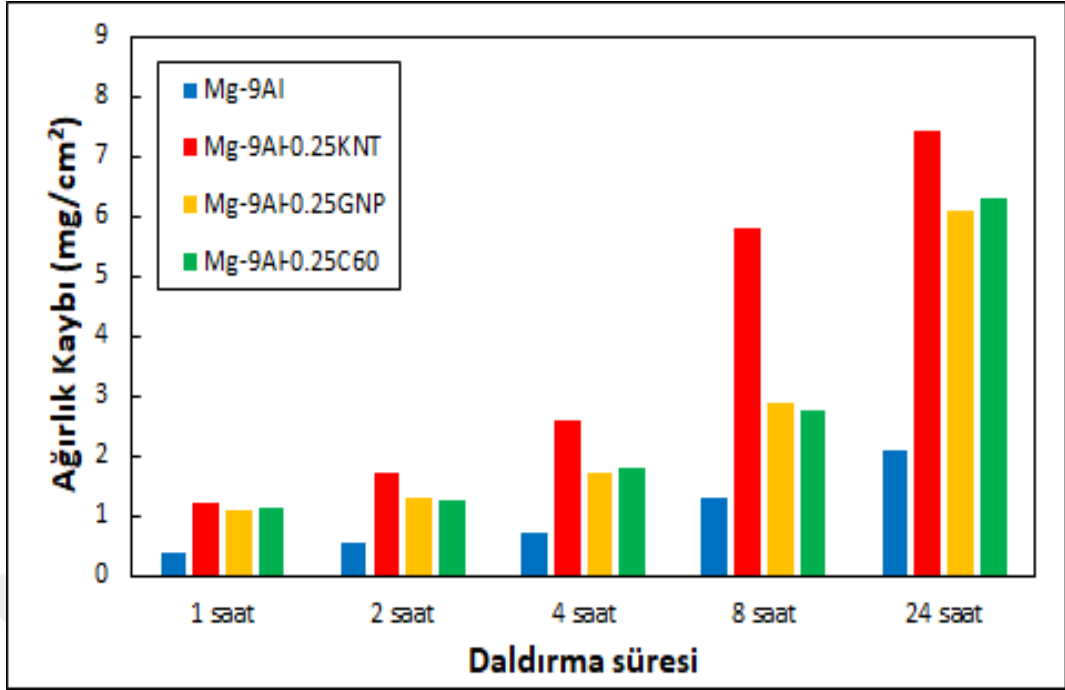
NUMUNE SONUÇLARI



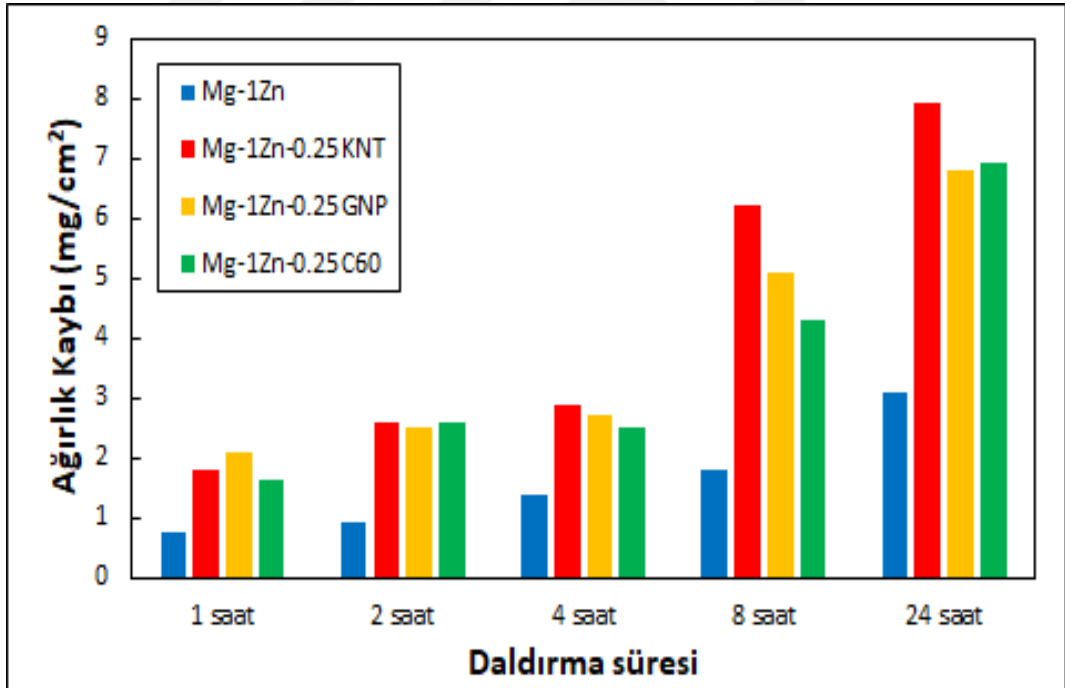
Şekil Ek A.1. Magnezyum serisi daldırma test sonuçları.



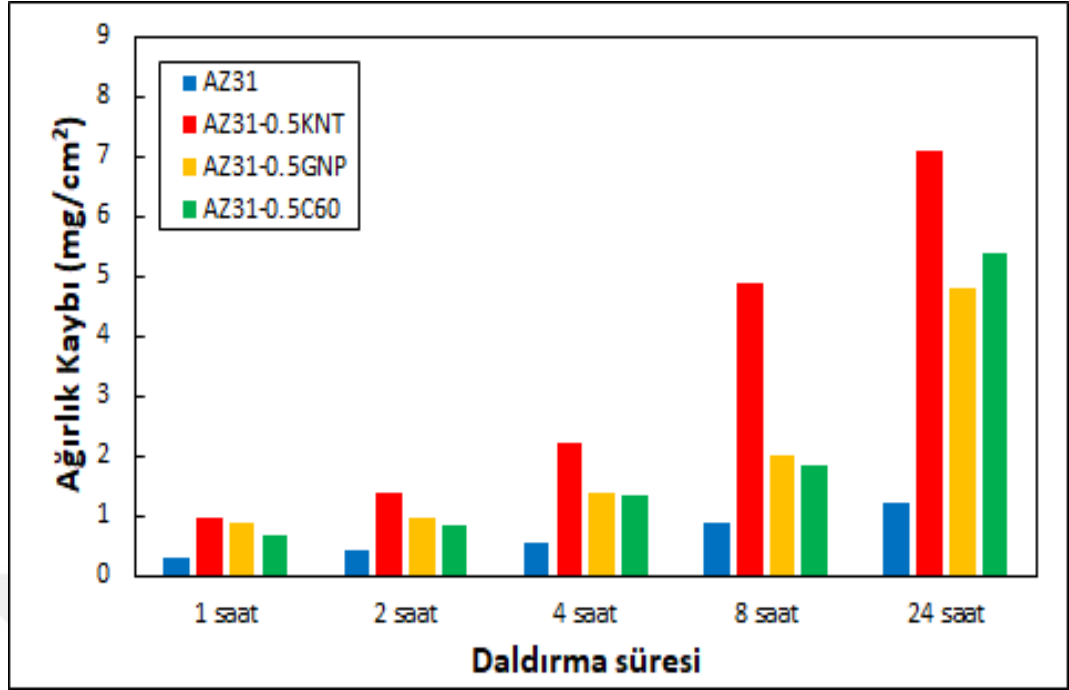
Şekil Ek A.2. Mg-3Al serisi daldırma test sonuçları.



Şekil Ek A.3. Mg-9Al serisi daldırma test sonuçları.



Şekil Ek A.4. Mg-1Zn serisi daldırma test sonuçları.



Şekil Ek A.5. AZ31 serisi daldırma test sonuçları.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Emre TURAN 1989 yılında Erzurum’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2007 yılında Tuzla Behiye Dr. Nevhiz Işıl Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılının ağustos ayında Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezine (MARGEM) görevlendirildi ve halen aynı yerde görev yapmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (507) 116 9234
E-posta : memreturan@karabuk.edu.tr