KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SICAK PRES İLE METAL PARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KAPLANMASI

OSMAN SİNAN GÖKÇE

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SICAK PRES İLE METAL PARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KAPLANMASI

OSMAN SİNAN GÖKÇE

Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Taner YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üy. Zeynep TAŞLIÇUKUR ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Gedik Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerji, iletişim, ulaşım, havacılık, uzay gibi sivil ve askeri amaçlı sektörlerde çalışılan veya planlanan sistemlerdeki teknolojik gelişmeler ile birlikte elde edilebilen malzemelerin sınırlarının ötesinde yeni özelliklere sahip malzeme gereksinimi artmaktadır. Geleneksel metaller ve metal alaşımlarının doğal özellikleri nedeniyle devam eden araştırma ve gelişmelerle, gelecek sistemlerin gereksinimlerini karşılamakta zorlanacaktır.

Günümüzde metalik malzemelerin birçok özellikleri gelişen endüstrinin ihtiyacına cevap veremeyince, daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, bu malzemelerin mekanik, kimyasal ve elektrik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olacağı anlaşılmıştır. Kompozit malzemeler yaygın şekilde havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, inşaat, savunma ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaktadır. Bu endüstrilerin ortak özelliği ise hafifliğe dayalı malzeme gereksinimine ihtiyaç duymasıdır. Bu özellik doğrultusunda magnezyum ve magnezyum esaslı malzemeler göze çarpmaktadır.

Magnezyum alaşımları ve magnezyum matrisli kompozitler mükemmel spesifik dayanım ve ses sönümleme kapasitesi, gibi özelliklerinin yanında elektromanyetik etkenlere karşı kalkan vazifesi görme ve geri dönüştürülebilir olma gibi özellikleri ile 21. yüzyılın umut verici metalik malzemeleri olarak kabul edilmektedir. Bu doğrultuda magnezyum alaşımları ve magnezyum matrisli kompozitlere talebin fazla olduğu otomotiv, havacılık, iletişim ve bilgisayar sektöründeki uygulamaları giderek artış göstermektedir. Bu nedenle metal matrisli kompozit malzemelerde magnezyum matris tercihi giderek artış göstermektedir. Özellikle ülkemizde savunma sanayisinde gelişmelere bağlı olarak bu tez kapsamında ortaya konulan sonuçlar doğrultusunda araştırmacı ve ilgili kuruşlara katkı sunacağı düşünülmektedir.

Çalışmalarımda desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Rıdvan Yamanoğlu'na teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında günün her saatinde yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Erdinç Efendi, Cezayirli arkadaşım Ismail Daoud, Onur Muratal ve Sümeyye Erkan'a teşekkürü borç bilirim.

Hayatları boyunca okumanın önemli olduğunu her seferinde vurgulayan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeden, beni büyütüp bu günlere getiren annem Emine Gökçe, babam Nadir Gökçe ve biricik ablam Gönül Gökçe'ye en içten teşekkürlerimi, sevgilerimi sunarım.

Haziran – 2018 Osman Sinan GÖKÇE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ 2
1.1. Metalik Malzemeler 5
1.2. Seramik Malzemeler 7
1.3. Polimerik Malzemeler 8
1.4. Kompozit Malzemeler 9
1.5. Yarıiletken Malzemeler 17
1.6. Biyomalzemeler 18
2. MAGNEZYUM VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANIMI 20
2.1. Magnezyumun Tarihçesi ve Geleceği 20
2.2. Magnezyumun Temel Özellikleri 23
2.2.1. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri 23
2.2.2. Magnezyumun kimyasal özellikleri ve magnezyum elde edilmesi 24
2.3. Magnezyumun Alaşımları 26
2.3.1. Mg-Al alaşımları 27
2.3.2. Mg-Zn alaşımları 29
2.3.3. Mg-Ti alaşımları 30
3. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER 31
3.1. Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması 32
3.1.1. Takviye malzemesine göre sınıflandırma 33
3.1.1.1. Partikül takviyesi 34
3.1.1.2. Sürekli fiber takviyesi 34
3.1.1.3. Kısa fiber ve whisker takviyesi 35
3.1.1.4. Nano boyutta takviye malzemesi 36
3.1.2. Üretim yöntemine göre sınıflandırma 36
3.1.2.1. Döküm 37
3.1.2.2. Püskürtme yöntemi 39
3.1.2.3. Toz metalurjisi 39
4. TOZ METALURJİSİ 41
4.1. Toz Metalurjik Yöntemin Avantajları 42
4.2. Toz Metalurjik Üretim Yönteminin Akış Şeması 44
4.3. Toz Özellikleri ve Nihai Ürüne Etkisi 45
4.4. Sinterleme 47
4.4.1. Geleneksel sinterleme 48

4.4.2. Basınç destekli sinterleme 50
5. MALZEME VE YÖNTEM 51
5.1. Saf Magnezyumun Dayanımının Arttırılması 52
5.1.1. Çalışmada kullanılan malzemeler 52
5.1.2. Tozların karıştırılması işlemi 55
5.1.3. Toz karışımlarının sinterlenmesi 58
5.2. Kaplama Aşaması 61
5.2.1. Çalışmada kullanılan kaplama malzemeleri 61
5.2.2. Sıcak pres kaplama işlemlerinin gerçekleştirilmesi 62
5.3. Üretilen Numunelerin Metalografik İşlemlerle Hazırlanması 64
5.4. Yoğunluk Ölçümü 65
5.5. Mekanik Testler 65
5.5.1. Sertlik testleri 65
5.5.2. Aşınma testi 66
5.6. Mikroyapısal Karakterizasyon 68
5.6.1. SEM ve EDX ile gerçekleştirilen analizler 68
5.6.2. Optik mikroskop ile karakterizasyon 69
5.7. XRD Analizi ile Faz Tayini 70
5.8. Korozyon Testleri 70
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 72
6.1. Sıcak Pres Yöntemi ile Magnezyum Esaslı Malzemelerin Üretimi 73
6.2. Yoğunluk Sonuçları 92
6.3. Sertlik Testi Sonuçları 94
6.4. Sıcak Pres ile Kaplama İşlemleri 95
6.5. Aşınma Test Sonuçları 109
6.6. XRD Sonuçları 118
6.7. Korozyon Sonuçları 120
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 124
KAYNAKLAR 129
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 139
ÖZGEÇMİŞ 140

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tutankamon'un mezar görüntüsü ... 3
Şekil 1.2. Mühendislik malzemeleri tarihsel gelişimi ... 4
Şekil 1.3. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması ... 5
Şekil 1.4. Metalik profil malzemeler ... 7
Şekil 1.5. Seramik refrakter malzemeler ... 8
Şekil 1.6. Polimer endüstrisinde kullanılan polimerik hammadde ... 9
Şekil 1.7. Kompozit malzemeleri tarihsel gelişimi ... 10
Şekil 1.8. Uçak parçaları ... 11
Şekil 1.9. 1957 Stupnik uydusunun görüntüsü ... 12
Şekil 1.10. Karbon fiber kumaş malzeme ... 13
Şekil 1.11. Tenis raketi ve golf sopası başlığı ... 14
Şekil 1.12. NICALON™ seramik fiber ... 15
Şekil 1.13. Kompozit malzeme seçimi ... 16
Şekil 1.14. Yarı iletken bilgisayar parçası ... 18
Şekil 1.15. Diş implantı için kullanılan biyomalzeme ... 19
Şekil 2.1. Amerikan askeri uygulamalarında magnezyum kullanımının yıllara göre değişimi ... 21
Şekil 2.2. Otomotiv endüstrisinde kullanılan magnezyum parçalar ... 22
Şekil 2.3. Magnezyumun ön görülen yıllık tüketim miktarı (bin ton) ... 23
Şekil 2.4. Magnezyumun kristal yapısı (HSP yapısı) ... 24
Şekil 2.5. Al-Mg faz diyagramı ... 28
Şekil 2.6. Mg-Zn faz diyagramı ... 29
Şekil 2.7. Mg-Ti faz diyagramı ... 30
Şekil 3.1. Magnezyum matrisli mompozitlerin sınıflandırılması ... 32
Şekil 3.2. Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanları ... 33
Şekil 3.3. Partikül takviyeli kompozit malzeme ... 34
Şekil 3.4. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme ... 35
Şekil 3.5. Kısa fiber veya whisker takviyeli kompozit malzeme ... 36
Şekil 3.6. Karıştırma döküm prosesi ... 37
Şekil 3.7. Sıkıştırma döküm prosesi ... 38
Şekil 4.1. Toz metalurjisi akış şeması ... 42
Şekil 4.2. Toz metalurjik ürünleri: (a) WC-Co sert metal mikro yapısı (b) eksantrik mili kayış kasnağı ... 43
Şekil 4.3. Toz metalurjik üretim yöntemi akış şeması ... 45
Şekil 4.4. Tane, toz partikülleri ve aglomeranın terminolojisi ... 46
Şekil 4.5. Toz partikül örnekleri ... 47
Şekil 4.6. Sinterleme sırasında porozitede meydana gelen değişimler ... 48
Şekil 4.7. Sinterleme süresi boyunca yoğunlukta meydana gelen değişim ... 49
Şekil 5.1. Tez kapsamında takip edilen akış şeması ... 51
Şekil 5.2. Tez kapsamında malzeme üretimleri için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri, (a) Mg tozu (~175 μm), (b) Ti tozu (~ 60 μm, ince), (c) Ti tozu

(~145 µm, kaba) d) Ti6Al4V tozu (~140 µm), (e) Al tozu (~75 µm), (f) MgAl tozu (~60 µm) 52
Şekil 5.3. Çalışmada kullanılan tozların boyut dağılımları a) saf magnezyum, (b) saf titanyum (ince partikül boyutlu), (c) saf titanyum (kaba partikül boyutlu), (d) Ti6Al4V, (e) saf alüminyum tozu, (f) Mg50Al50 tozu 54
Şekil 5.4. Mg-Al faz diyagramında $Mg_{17}Al_{12}$ bileşiminin gösterimi [97] 56
Şekil 5.5. (a) Zirkonya bilye, cam kavanoz ve (b) MSE-TEC marka bilyeli değirmen 57
Şekil 5.6. Kullanılan grafit kalıp (a) ve grafit kağıtlar (b) 59
Şekil 5.7. (a) DIEX sıcak pres cihazı ve (b) sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği 60
Şekil 5.8. Mg50Al50 alaşımı içeren magnezyumun sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği 60
Şekil 5.9. Kaplama amacıyla hazırlanan titanyum alaşımları 61
Şekil 5.10. (a) Water-Jet TK-TRUMP50-G3015DY marka su jeti cihazı (b) Kesim esnasındaki görüntüsü 62
Şekil 5.11. (a) Ti-Al katmanlı üretim için sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği (b) basınç altında kalıp dışına taşan ergimiş metal 63
Şekil 5.12. Basınç etkisini kaldıran kalıp düzeneğinin sıcak pres içerisindeki görüntüsü 64
Şekil 5.13. (a) Hassas kesme cihazı ve (b) zımparalama ve parlatma cihazı 64
Şekil 5.14. AND GR-200 marka hassas terazi 65
Şekil 5.15. (a) Zwick marka Vickers mikrosertlik cihazı (b) Wolpert marka Brinell sertlik cihazı 66
Şekil 5.16. Ball on disk aşınma deneyinin şematik gösterimi 67
Şekil 5.17. (a) NANOVEA marka aşınma cihazı, (c) Test sonrası aşınan yüzeyin makro görüntüsü. 68
Şekil 5.18. JEOL JSM-6060 marka taramaları elektron mikroskobu 69
Şekil 5.19. Olympus marka optik mikroskop 69
Şekil 5.20. RigakuSA-HF3 marka XRD cihazı 70
Şekil 5.21. (a) ASTM G5 − 14 standardındaki korozyon hücresi (b) GAMRY INTERFACE 1000 marka cihaz 71
Şekil 6.1. Sıcak pres ile üretilen saf magnezyumun SEM görüntüsü, (a) 100X, (b) 250X 74
Şekil 6.2. Sıcak pres ile sinterlenmiş magnezyumun mikroyapı görüntüleri, (a) SEM, (b) optik mikroskop görüntüsü 75
Şekil 6.3. Mg partikülleri arasında oksitlenmenin gösterildiği (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX haritalama analizi 76
Şekil 6.4. SPS yöntem ile üretilmiş SiC takviyeli Mg kompozitin iç yapısında görünen oksitli partikül sınırlarının optik mikroskop görüntüleri 77
Şekil 6.5. 600 °C de farklı sürelerde sinterlenen Mg, (a) 40 dak, (b) 360 dak. 78
Şekil 6.6. Farklı oranlarda ince saf Ti partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti 79
Şekil 6.7. Farklı oranlarda kaba Ti partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti 79

Şekil 6.8. Farklı oranlarda Ti6Al4V alaşım partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti 80
Şekil 6.9. Yarı toz metalurjik proses ile Ti partikül katkılı Mg üretim yöntemi 81
Şekil 6.10. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen Mg matrisli Ti ve Ti6Al4V takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri, (a) gözenekli saf Ti, (b) gözenekli Ti6Al4V alaşımı, (c) Ti-Mg, (d) Ti6Al4V-Mg 82
Şekil 6.11. Mg ile Ti arasında oluşan arayüzeyin SEM görüntüleri, (a) 500x, (b) 1500x ve (c) 2000x..... 83
Şekil 6.12. Mg matris ile Ti partiküller arasında arayüzey bağlantısı, (a) SEM görüntüsü, (b) Mg ve Ti elementleri için EDX haritalama..... 84
Şekil 6.13. SiC takviyeli Mg matrisli kompozitin arayüzey görüntüsü 85
Şekil 6.14. Mg ile Ti arayüzeyinin SEM ve EDX analizi..... 86
Şekil 6.15. Mg+Ti6Al4V numunesinin SEM görüntüsü, (a) 250X, (b) 1000X..... 87
Şekil 6.16. Mg+Ti6Al4V numunesinin EDX haritalama analizi..... 87
Şekil 6.17. %50 Mg50Al50 içeren numunenin parlatılmış konumda optik mikroskop görüntüsü 88
Şekil 6.18. Mg50Al50 partikülleri içeren Mg numunelerinin dağlanmış konumda optik mikroskop görüntüleri, (a) %12, (b) %50..... 89
Şekil 6.19. Mg50Al50 partikülleri ile Mg matris arasında etkileşimin net bir şekilde ortaya konduğu dağlanmış konumda optik mikroskop görüntüleri, (a) 10X, (b) 20X büyütme..... 90
Şekil 6.20. Mg matris ile Mg50Al50 partikülleri arasında oluşan bölgelerin EDX analizi sonuçları..... 91
Şekil 6.21. Yoğunluk ölçümü sonucu elde edilen değerler (a) ince boyutlu Titanyum ilavesi, (b) kaba boyutlu Titanyum ilavesi, (c) Ti6Al4V alaşımı ilavesi ve (d) Mg50Al50 alaşımı ilavesi. 93
Şekil 6.22. Tez kapsamında uygulanan kaplamaların SEM görüntüleri..... 95
Şekil 6.23. Mg üzerine Ti6Al4V kaplanması, SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDX analizleri..... 97
Şekil 6.24. Ti6Al4V–Mg arayüzeyinde yapılan haritalama ve çizgi EDX analizi..... 98
Şekil 6.25. Ti0.2Pd–Mg arayüzeyinde yapılan haritalama ve çizgi EDX analizi..... 100
Şekil 6.26. Ti6Al4V-Al-Mg katmanlı yapısı üzerinde Ti6Al4V-Al arayüzeyi SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri..... 101
Şekil 6.27. Al-Mg arayüzeyinin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX nokta analizleri..... 103
Şekil 6.28. (a) Saf Mg üzerinde Ti6Al4V kaplamanın SEM görüntüsü (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim 105
Şekil 6.29. (a) Saf Mg üzerinde Ti0.2Pd kaplamanın SEM görüntüsü (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim 106
Şekil 6.30. (a) Ti6Al4V-Al-Mg numunenin SEM görüntüsü ve (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim 106
Şekil 6.31. (a) Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri 107

Şekil 6.32. Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri 108
Şekil 6.33. Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri 108
Şekil 6.34. Numune - Aşınma oranı grafikleri a) kaba Ti partikül takviyeli b) ince Ti partikül takviyeli c) Ti6Al4V partikül takviyeli d) MgAl takviyeli 110
Şekil 6.35. SEM Görüntüleri (a) saf Mg'nin aşınma yüzeyi, (b) MTi 1'in aşınma yüzeyi, (c) MTi 2,5'in aşınma yüzeyi, (d) MTi 5'in aşınma yüzeyi, (e) MTi 10'un aşınma yüzeyi ve (f) MTi 15'in aşınma yüzeyi 112
Şekil 6.36. SEM Görüntüleri (a) MT 5'in aşınma yüzeyi, (b) MT 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MT 15'in aşınma yüzeyi 113
Şekil 6.37. SEM Görüntüleri (a) MTA 5'in aşınma yüzeyi, (b) MTA 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MTA 15'in aşınma yüzeyi 114
Şekil 6.38. SEM Görüntüleri (a) MgAl 5'in aşınma yüzeyi, (b) MgAl 15'in aşınma yüzeyi ve (c) MgAl 25'in aşınma yüzeyi 115
Şekil 6.39. Saf mg ve kaplamaların aşınma SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Ti6Al4V ve (c) Ti0.2Pd 118
Şekil 6.40. Saf Ti partikül taviyeli numunelerin XRD sonuçları 119
Şekil 6.41. Kaplamalı numunelerin Tafel eğrileri 122

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri 23
Tablo 2.2. Minerallerinin kimyasal formülü ve magnezyum konsantrasyonları 26
Tablo 2.3. En çok kullanılan alaşım elementleri ve harfler 27
Tablo 4.1. Sinterleme kademeleri sırasında meydana gelen değişimler 49
Tablo 5.1. Tez kapsamında kullanılan bileşimler 56
Tablo 5.2. Numunelere uygulanan aşınma deneyi parametreleri 67
Tablo 6.1. Üretilen kompozit malzemelerin kompozisyonu ve yoğunlukları 92
Tablo 6.2. Elde edilen kompozit malzemelerin Brinell sertlik sonuçları 94
Tablo 6.3. Literatürdeki sertlik değerleri 95
Tablo 6.4. Titanyum partikül takviyeli magnezyum esaslı malzemelerin aşınma sonuçları 110
Tablo 6.5. Kaplama malzemelerinin aşınma sonuçları 117
Tablo 6.6. Numuneler ve içerikleri 119
Tablo 6.7. Numunelerin korozyon deneyi sonuçları 123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Å	: Angström
β	: Mg-Al intermetalik faz, (Al_3Mg_2)
α	: Hegzagonal sıkı paket yapısındaki magnezyum alaşımı
γ	: Mg-Al intermetalik faz, ($Al_{12}Mg_{17}$)
λ	: Lambda
μm	: Mikrometre
HV	: Vickers Ölçeğinde Sertlik Değeri
HB	: Brinell Ölçeğinde Sertlik Değeri
r	: Yarıçap, (mm)

Kısaltmalar

Ag	: Gümüş
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
Al	: Alüminyum
B	: Bor
Ba	: Baryum
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CFTP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
Cl	: Klor
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
dak	: Dakika
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
Fe	: Demir
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
Mg	: Magnezyum
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
MMNK	: Magnezyum Matrisli Nano Kompozit
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MÖ	: Milattan Önce
mpy	: Mils per Year (mil/yıl)
O	: Oksijen
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
Rpm	: Revolution Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elekton Mikrokobu)

s	: Saniye
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
SiC_w	: Silisyum Karbür whiskers takviye
Pd	: Paladyum
Ti	: Titanyum
TM	: Toz Metalurjisi
V	: Vanadyum
W	: Tungsten
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
yy	: Yüzyıl
Zn	: Çinko

SICAK PRES İLE METAL PARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KAPLANMASI

ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulan en düşük yoğunluklu metalik malzeme magnezyumdur. Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde ağırlıktan kazanç sayesinde elde edilen düşük yakıt tüketiminin çevre ve ekonomik nedenlerden dolayı sağladığı katkılar kullanım nedenlerinin başında gelmektedir. Buna rağmen magezyum esaslı malzemelerin birçok uygulama alanı için kullanımına sınır getiren en önemli unsur sahip oldukları zayıf mekanik özelliklerdir. Magnezyum esaslı malzemelerin dayanımlarını arttırmak için farklı elementler ile alaşımlandırılmaları ve kompozit malzeme şeklinde üretimleri sıklıkla tercih edilen seçeneklerdir. Bu seçeneklerden hangisi seçilirse seçilsin magnezyumun yüksek oksijen afinitesi nedeniyle üretim sürecinde koruyucu atmosferlerin kullanılması bir zorunluluktur. Bu doğrulutda en önemli yaklaşımlar nasıl bir dayanım artırımı ve bunun hangi yöntem ile gerçekleştirileceği soruları tasarım açısından kritik sorulardır. Tez kapsamında saf magnezyumun özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı çözüm süreçleri önerilmiştir. Bu çözüm süreci hem magnezyumun farklı takviyeler ile dayanımını arttırılması hem de yapılacak kaplamalar ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi şeklindedir. Saf magnezyumun dayanımının arttrılması amacıyla saf Ti, Ti6Al4V ve Mg50Al50 partikülleri kullanılmıştır. Yüzey özelliklerinin geliştirimesi için ise Ti6Al4V ve Ti0.2Pd alaşımı ile kaplama işlemleri yapılmıştır. Tüm üretim süreçleri toz metalurjik prosesler üzerinden dizayn edilmiştir. Magnezyumun yüksek reaktivitesi nedeniyle üretimler vakum atmosferi altında yapılarak basınç destekli bir sinterleme yöntemi tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda hem saf magnezyumun dayanımı arttırılmış hem de yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile özellikle aşınma direncinde gelişmeler kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaplama, Kompozit, Magnezyum, Sıcak Pres.

PRODUCTION AND COATING OF METAL PARTICLE REINFORCED MAGNESIUM COMPOSITES BY HOT PRESSING

ABSTRACT

Magnesium is the lowest density metallic material that finds use in industrial applications. Especially in aviation, aerospace and automotive industries, the contribution from low fuel consumption, environmental and economical reasons, which is gained by gain from weight comes first among the reasons of usage. Nevertheless, the most important factor limiting the use of magnesium-based materials for many application areas is their poor mechanical properties. Whichever of these options to choose, it is imperative that the protective atmosphere be used during the production process due to the high oxygen affinity of the magnesium. In this thesis, different resolution processes have been proposed in order to improve properties of pure magnesium. This solution process is both to increase the strength of magnesium with different reinforcements and to improve the surface properties with the coatings to be made. In order to increase the strength of pure magnesium, pure Ti, Ti6Al4V and Mg50Al50 particles have been used. In order to improve the surface properties and plating with Ti0.2Pd and Ti6Al4V alloy it has been conducted. All production processes have been designed through powder metallurgical processes. Because of the high reactivity of magnesium, pressurized sintering has been preferred by making the production under a vacuum atmosphere. As a result of the study, both the strength of pure magnesium has been increased and the development of surface properties, especially the wear resistance, have been recorded.

Keywords: Coating, Composite, Magnesium, Hot Press.

GİRİŞ

Mühendislik malzemelerin gelişimi M.Ö. 1000 yıllara dayanmaktadır. Yıllar içersinde gelişen teknoloji ve insanların ihtiyaçları doğrultusunda insanların malzeme seçimlerinde de farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle metalik malzemeler açısından bakıldığında 100 sene önce sadece mekanik özellikler ön planda iken günümüzde bu durum spesifik mukavemet (mukavemet/yoğunluk) şeklinde açıklanmaktadır. Mekanik özellikler ve yoğunluk açısından en önemli malzemelerden birisi de kuşkusuz magnezyumdur. Bu bağlamda magnezyum yeni bir metal olmasına rağmen birçok kullanım alanına sahiptir. Önümüzdeki süreçte çok geniş bir sektör yelpazesinde kullanılması hedeflenmektedir.

Magnezyum ve magnezyum alaşımları yüksek sönümleme kapasitesi ve spesifik mukavemet özellikleri sayesinde otomotiv ve havacılık endüstrilerinde geniş bir kullanım alanına sahip olacağı ön görülmektedir. Magnezyumun düşük korozyon direnci ve düşük aşınma direnci özelliklerinden dolayı endüstriyel alanda büyük bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Magnezyumun özelliklerinin geliştirme açısından geleneksel yöntem olarak alaşım elementi ilavesi yapılmaktadır. Bunun yanında magnezyum içerisine ilave edilen takviye elemanları ile özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Son dönemde yapılan literatür çalışmalarında magnezyumun özelliklerinin geliştirilmesi açısından metalik ve seramik takviye ile bir kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ön plana çıkmaktadır.

Magnezyum, yüksek sıcaklarda tutuşma eğiliminde bir metal olduğundan geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi zor olmaktadır. Bu sebeple üretim açısından kontrollü atmosfer veya vakum ortamı kullanılmaktadır. Magnezyum üretimi için toz metalurjik yöntemler ile üretilmesi avantaj sağlamaktadır. Bu sayede hem kontrollü atmosfer ortamında üretim hem de nihai ürüne yakın şekilde parça üretimi mümkün olmaktadır.

1. MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ

Mühendislik malzemelerine giriş yapmadan önce malzeme kavramını açıklamak gerekir. İnsan hayatı boyunca sınırsız bir madde çeşitliliği ile karşı karşıya gelmektedir. Bu sınırsız madde çeşitliliği içerisinde, insanlık için faydalı olan ve insanın kullanabileceği maddelere malzeme denilmektedir. Maddeden yola çıkarak malzemeye dönüşüm süreci insanlık tarihi ile başlar. Teknolojinin olmadığı veya gelişim gösterdiği dönemlerde bile insan maddeyi kendi için yararlı hale getirme düşüncesi ile yaşamıştır. Hala aynı düşünce ile yaşamaya devam etmektedir. Bütün bunlardan yola çıkarsak tarih boyunca malzemeler çok büyük gelişim ve değişim göstermiştir. İnsanoğlunun malzemelere olan bakışı geniş yelpaze içerisindedir. Öyle ki; çağlar boyunca kullanılan malzemeler bulundukları çağa kendi isimlerini vermiştir. Taş, bronz ve demir çağları malzemelerin gelişiminin yaşandığı en önemli devirlerdendir. Yapılan araştırmalar dikkate alındığında o dönemin liderlerinin bulundukları çağın en değerli malzemeleri ile gömülmesi, insanların malzemelere verdikleri değeri göstermektedir [1]. Bunların en güzel örneği olarak; Tutankamon'un mezarında bulunan metal malzemelerdir. Şekil 1'de Tutankamon'un mezarının bir görseli verilmiştir. Özellikle metalik malzemelerin tarihsel süreci açısından en önemli kanıtlardan biri olarak gösterilen bu mezar Howard Carter tarafından 1922 yılında keşfedilmiştir [2]. İngiliz arkeolog Howard Carter 1925' te Tutankamon mumyasının sargı bezleri arasında iki adet hançer bulmuştur. Hançerlerden birinin hala paslanmamış olması bilim insanlarını oldukça şaşırtmıştır. O zamanın teknolojisi dikkate alındığında böyle bir malzemenin ancak göktaşlarından yapılmış olacağı düşüncesi öne sürülmüştür. Teknolojideki gelişmelere bağlı olarak yakın gelecekte yapılan incelemeler bu hançerin yüksek nikel içeriğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Mısırlıların hem süs eşyalarında hem de törenlerinde kullandıkları eşyaların içeriğinde yüksek oranda göktaşı demirinin olduğu yapılan farklı bir çalışma ile tespit edilmiştir. Demir esaslı hançerin yanında altın malzemesinden yapılmış kını ve süslü altın sapın bulunması farklı özelliklerdeki metalik malzemelerin tarihinin ne kadar eskilere dayandığını göstermektedir [3].

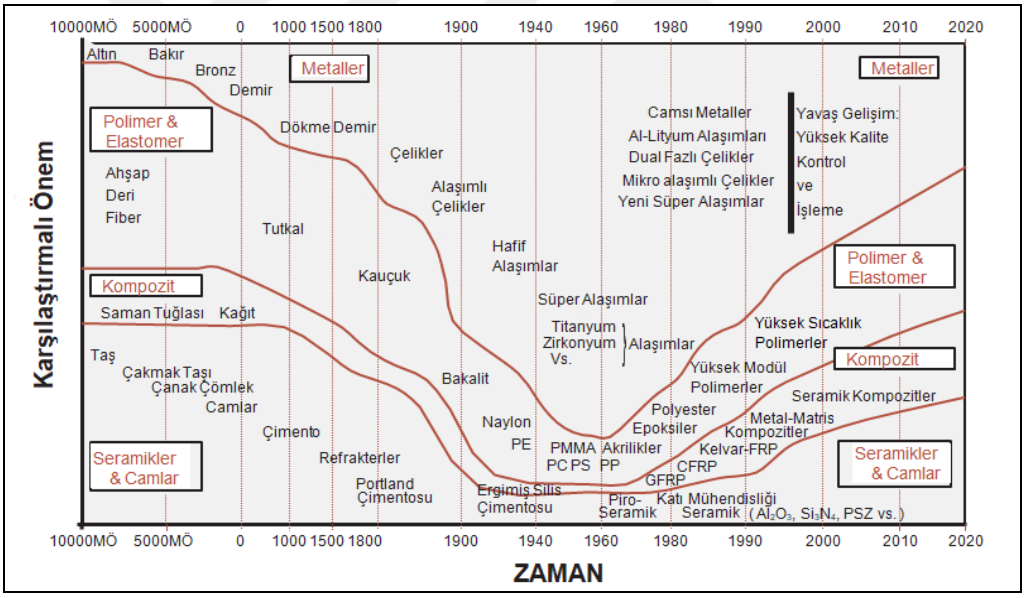


Şekil 1.1. Tutankamon'un mezar görüntüsü [2]

M.Ö. yaşayan insanların hem korunmak hem de avlanmak için ihtiyaç duydukları silahlar farklı malzemelerin gelişiminde itici gücü oluşturmuştur. Yer kabuğundaki doğal maddelere ek olarak dünyaya düşen göktaşlarının içinde bulunan maddeler de zaman içerisinde malzeme gelişimine yüksek oranda katkı sağlamıştır. Bu katkı yeni malzemelerin ortaya konması, mevcut malzemelerin modifiye edilmesi ve yine mevcut malzemelerin birleştirilmesi şeklinde devam etmiştir. M.Ö. dönemin ihtiyaç duyulan malzeme gereksinimleri biliniyor olmasına rağmen teknolojik olarak yetersizliklerden dolayı hem maddelerin çıkarılıp işlenmesi hem de yeni malzeme üretimi sınırlı bir alan içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu sınırlı alan her ne kadar eksiklik gibi gözükse de günümüzde gelinen noktaya bakıldığında hem teknolojik gelişim anlamında hem de sınırsız malzeme çeşitliliği anlamında büyük katkı sağlamıştır. Teknolojik gelişimler ve sınırsız malzeme çeşitlilikleri göz önünde bulundurulduğunda malzemelerin sınıflandırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu gereklilik ile birlikte bilim insanlarının oluşturduğu ortak bir karar sonucunda malzemeler; metaller, seramikler, plastikler ve kompozitler olarak 4 ana başlık altında incelemektedir [1].

Metaller, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler tarihin her döneminde insanoğlunun ihtiyaç duyduğu malzeme grupları olmuştur. Her bir grup malzemenin tarihsel gelişimi farklılıklar göstermektedir. Altın, bakır, bronz ve demir gibi

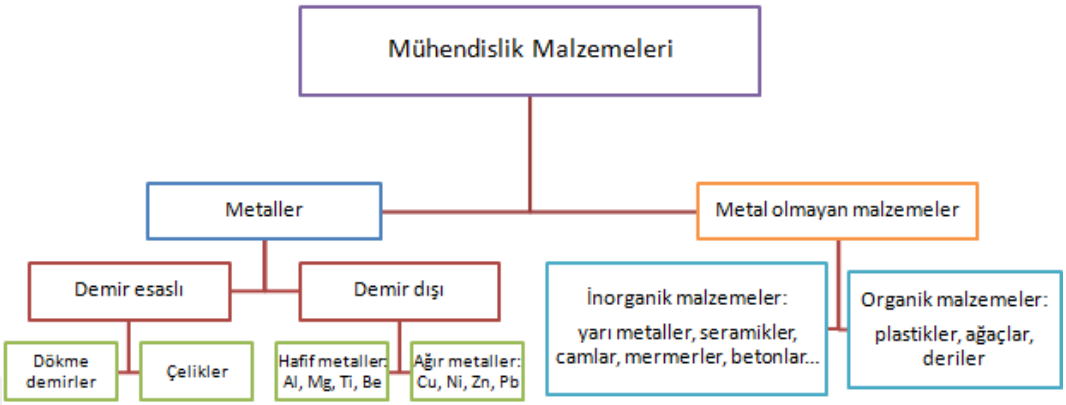
metallerin bulunması ile birlikte kullanılan malzemelerin hem kullanım alanı hem de çeşitliliği artmıştır. 1600'lü yıllarında döküm demir baskın iken, 1900' lü yılların ortalarına gelindiğinde metaller (hafif alaşımlı, süper alaşımlı vb.) daha baskın hale gelmiştir. Metalik malzemelerin mühendislik malzemeleri içerisindeki yeri her zaman bir adım önde olmuştur. Şekil 1.2 de mühendislik malzemelerinin kronolojik sıralamasını gösteren bir grafik verilmiştir. M.Ö. insanların kullandıkları malzemeler arasında polimerler, elastomerler, seramik ve camlar bulunmaktadır. Demirin bulunması ile birlikte metaller bölgesel olarak artmaya başlamıştır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte metalik malzemeler daha çok kullanmaya başlamıştır. 1960 yılına gelindiğinde metalik malzemelerin kullanımın en fazla olduğu görülmektedir. Daha sonra yapılan çalışmalar doğrultusunda hem yeni polimerik malzemelerin keşfi hem de yeni geliştirilen kompozit malzemeler ile birlikte metalik malzemelerin kullanımında azalma olduğu görülmektedir [1].



Şekil 1.2. Mühendislik malzemeleri tarihsel gelişimi [1]

Teknoloji geliştikçe yeni elementlerin keşfi ile daha geniş bir alan kaplayan periyodik tablo mühendislik malzemelerinin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Ancak her ne kadar periyodik tabloda metaller geniş bir aralıkta olsa da henüz sadece birkaç metal, mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir metalik mühendislik malzemesinin belirli (mukavemet, süneklik, işlenebilirlik ve bulunabilirlik vb.) özelliklere sahip olması gerektiği için her metalik malzeme mühendislik malzemesi olarak kullanılamamaktadır. Bundan dolayı mühendislik

malzemeleri için farklı bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma içerisinde hem metalik malzemelerhem de metalik olamayan malzemeler kendi içinde gruplandırılmıştır (Şekil 1.3) [4].



Şekil 1.3. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması [4]

Malzeme bilimi ve mühendisliği alanında ise malzemelerin sınıflandırılması daha kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Bunun sebebi sınıflandırmanın çeşitli sistem temellerine ve malzemenin farklı özelliklerine dayandırılmasıdır. Bu sistemlerin temelinde ise; (i) malzemenin kimyasal bileşimi, (ii) maddenin atomik ve kristal yapısı, (iii) malzemenin doğadaki oluşma şekli, (iv) saflaştırılması, (v) maddenin endüstriyel ve teknik kullanımını sağlamak için gerekli özellikler ve öncesinde, malzemenin tabi tutulduğu üretim süreci gibi faktörler yer almaktadır. Malzeme mühendisliğinin yaygın olarak kullandığı sınıflandırma;

- Metalik malzemeler
- Seramik malzemeler
- Polimerik malzemeler
- Yarı iletken malzemeler
- Biyomalzemeler
- İleri malzemeler şeklindedir [5].

1.1. Metalik Malzemeler

Metal atomları serbest hale gelmeleri kolay olan yalnızca bir kaç tane valans elektronuna sahiptir. Metallerde valans elektronlarının bağ enerjileri düşüktür. Birden fazla metal atomu katı oluşturmak üzere bir araya geldiklerinde valans

elektronları ait oldukları atomlardan kolayca ayrılırlar ve tüm atomlara ait olan elektron grubu haline gelmektedir. Valans elektronlarının serbest oluşu ile metal içinde elektron bulutu oluşarak iyonlar arası uzayı doldurmaktadır. Negatif yüklü elektron bulutu ile metal iyonları arasındaki çekim enerjisi elektronları başlangıçta metal iyonlarından ayırmak için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Metal içinde bağlanma, serbest elektron bulutu ile metal iyonları arasında ortaya çıkmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda metalik malzemeler önemli bir yer teşkil etmektedirler (Şekil 1.4). Metalik malzemeler genel olarak demir esaslı ve demir dışı olmak üzere iki grupta incelenebilir. Demir esaslı malzemeler, tüm metalik malzemeler grubu içerisinde %50' den fazla bir kullanım alanına sahiptirler.

Kullanım alanındaki önem ve uygulamalara bağlı olarak demir esaslı malzemeler birkaç alt başlıktan oluşmaktadır. Demir, çelik, alaşımlı çelik, paslanmaz çelik, takım çelikleri, kalıp çelikleri ve dökme demir olarak adlandırılırlar. Bu malzemelerden istenilen özellikler elde edilmesi için ısıl işleme de tabi tutulabilirler. Demir dışı malzeme grubunda ise malzemelerin önemi kullanım alanlarına dayanmaktadır. Alüminyum, magnezyum ve titanyum metalleri hafif metal alaşımları altında gruplandırılmıştır. Bu metaller diğer demir dışı metal ve alaşımları ailesine yerleştirilmiştir. Bu alt bölümde,

- Yüksek sıcaklık malzemeleri,
- Süper alaşımlar,
- Şekil bellek alaşımları,
- Cam metalleri,
- Lehim malzemeleri,
- Soy metaller ve benzeri gibi birkaç alt grup bulunmaktadır.

Metallerin oluşturdukları intermetalik ve refrakter malzemeler, farklı özelliklerinden dolayı metalik malzemelerden ayrı bir gruba yerleştirilmişlerdir [6].

Dünyadaki insan nüfusunun hızlı bir şekilde artması ve bunun yanında insanoğlunun değişen talepleri doğrultusunda özellikle metalurji ve malzeme mühendisliği alanında birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmaların önemli bir kısmı yeni malzeme üretimi ve tasarımı doğrultusunda yapılmaktadır. Gerçekleştirilmesi

planlanan malzeme tasarım kriterlerinin arasında yoğunluk ön plana çıkmaktadır. Mühendislik malzemeleri açısından bu kriter, aralarında kıyasıya bir rekabet olan otomotiv endüstrisinde büyük önem arz etmektedir [7,8]. Bu doğrultuda otomotiv endüstrisinin yanında hızla gelişim göstermekte olan havacılık ve uzay endüstrisinde de demir dışı metal ailesi grubunda olan magnezyum esaslı malzemeler dikkat çekmektedir [9].



Şekil 1.4. Metalik profil malzemeler [10]

1.2. Seramik Malzemeler

İyonik ve kovalent bağlarla bağlanmış seramik malzemeler, kompleks bileşikler olup; metal ve metal dışı elementlerin her ikisini de içerirler. Kovalent ve iyonik bağlanma enerjileri metalik bağlara göre çok daha yüksek olduğu için inorganik seramik gibi metalik olmayan malzemeler yüksek sertliğe ve yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir. Metalik bağ modelinin aksine, atomik boyutların yer değiştirmesi teorik olarak bölgesel kovalent bağları koparır veya anyon-katyon konumlarını anyon-anyon veya katyon-katyon iticilere dönüştürürler. Genel olarak sert, kırılgan, yüksek ergime derecesi, düşük elektrik ve ısıl iletkenliği, iyi kimyasal ve ısıl kararlılık ile yüksek basma dayanımı gibi temel özelliklere sahiptirler (Şekil 1.5). Geleneksel bir anlatım diliyle seramik: toz şeklindeki inorganik maddelerin oluşturduğu bileşimlerin, çeşitli yöntemlerle şekillendirilmeleri sonrası sertleşip dayanım kazanmaları amacıyla pişirilmelerini içeren bir malzeme dalı olarak tanımlanabilmektedir. Bu malzemeler temel olarak kırılgandırlar ve sünek özellik

göstermemektedirler. Serbest valans elektronlarının eksik olması nedeniyle, inorganik metal olmayan malzemeler elektrik ve ısı için zayıf iletkenlerdir. Bu durum onların mühendislik uygulamalarında iyi izolatör olarak nitelendirilmesini sağlar [11].



Şekil 1.5. Seramik refrakter malzemeler [12]

1.3. Polimerik Malzemeler

Polimerler, birden fazla makro molekülün belirli bir düzen içerisinde, kimyasal bağlarla bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. “Poli-” kelimesi Latince “birden fazla, çok” anlamındadır. “Mer” adı verilen birimlerin tekrarlanması sonucunda polimerler meydana gelir. Diğer bir deyişle polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmuşlardır. Organik polimerler karbon, hidrojen, oksijen, azot ve halojen atomlarından oluşmaktadır. Bir atomun polimer ana zinciri üzerinde bulunabilmesi için en az iki değerlikli olması gerekmektedir. Bu nedenle hidrojen ve halojen atomları ana zincir üzerinde bulunamazlar. Diğer bir gereklilik ise ana zincir üzerinde bulunan atomlar arasındaki bağ enerjisinin yeterli olmasıdır. İnorganik polimerlerde ana zincirde silisyum (Si), germanyum (Ge), bor (B), fosfor (P) gibi elementlerin atomları bulunur. Ana zincirde bulunan atomların bağ enerjileri organik polimerlerde bulunan atomların bağ enerjilerinden daha yüksek değerlerdedir. Bu nedenle, organik polimerlerin kullanım alanları oldukça geniştir. Ancak inorganik polimerler daha iyi ısıl ve mekanik

dayanıklılığa sahiptirler. Bu durum inorganik polimerlerin kullanımını daha spesifik hâle getirmektedir. Doğal ve sentetik zeolitler (Alümina silikat) inorganik polimerlere örnek olarak verilebilir. Polimerik malzemeler [13,14];

- Termoplastikler,
- Termosetler,
- Kompozitler ve
- Termoset kauçukları şeklinde sınıflandırılırlar [13].



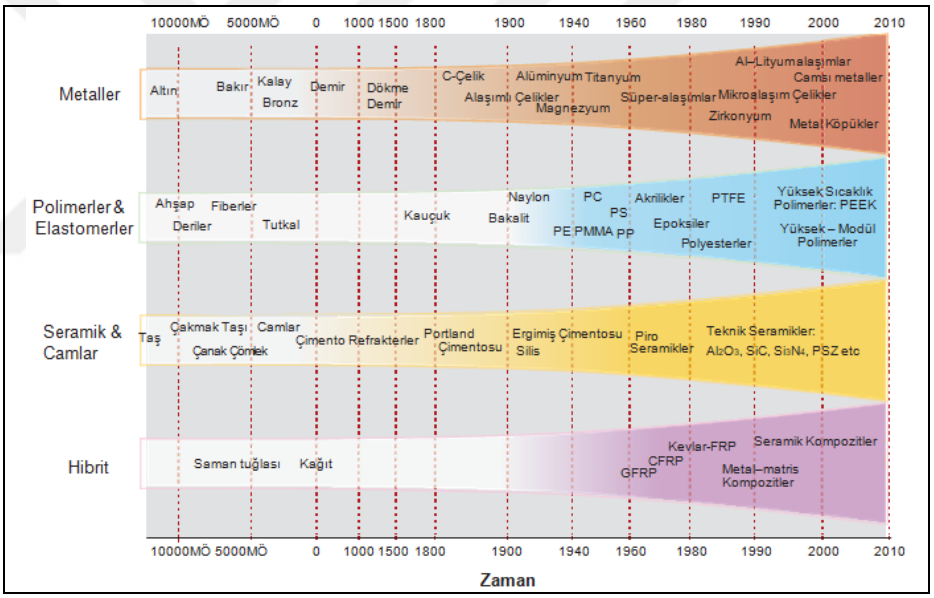
Şekil 1.6. Polimer endüstrisinde kullanılan polimerik hammadde [15]

1.4. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler (çekme mukavemeti, aşınma direnci vb.) istenen mekanik özelikleri elde etmek için matris malzemesi (örn bağlayıcı reçine) adı verilen ana malzeme ve takviye elemanı adı verilen mukavim bir malzemeden oluşmaktadır. Genellikle bileşenler birbirleri içinde çözünmez ve birbirlerinden belirli bir ara yüzeyle ayrılırlar. Kompozit malzemelerin birçok türü bulunmaktadır. Takviye elemanı ile ana faz arasındaki bağ veya takviye elemanının şekli gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır. Takviye elemanı fiber (lifli) veya partikül olabilmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde birbirinden çok farklı takviye ve matris malzemeleri kullanılabilmektedir. Matris metal, seramik veya polimer malzeme gruplarından oluşmaktadır. Takviye elemanları polimerik malzemelerin dışında metalik veya seramik malzemelerden tercih edilebilir [16].

Kompozit malzemelerin M.Ö. 10.000 yılına kadar dayanan bir tarihi bulunmaktadır. Ancak 1940'lı yılların başına gelindiğinde kompozit malzeme kavramı ortaya çıkmış ve bu tarihten itibaren daha hızlı bir gelişim göstermiştir. Farklı malzeme gruplarının

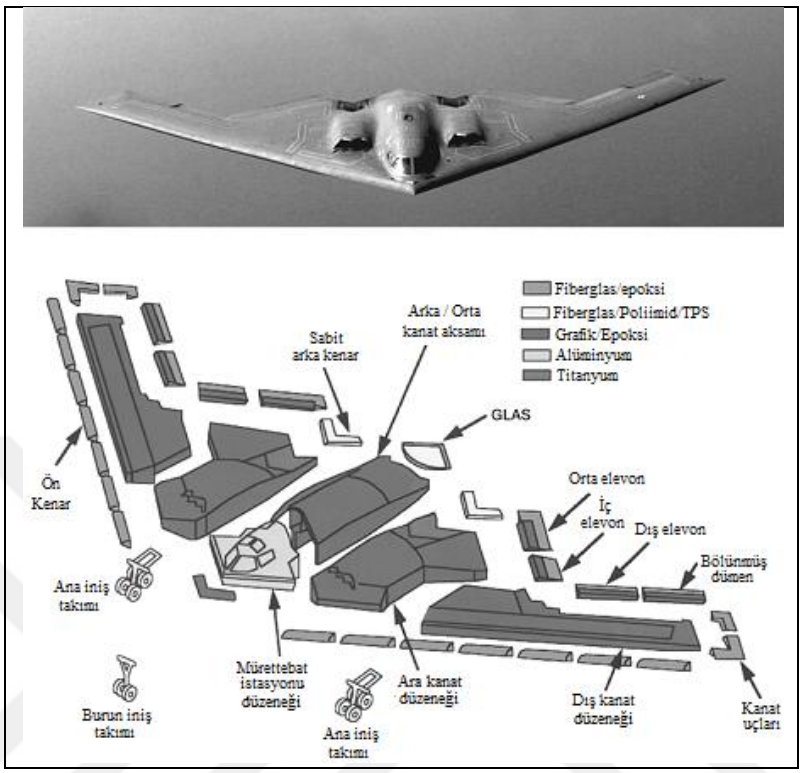
birleştirilmesi ve özelliklerinin geliştirilmesi ile kompozit malzeme sistemi oluşturulmuş ve tarihte önemli bir yer edinmektedir. Şekil 1.7' de kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi verilmiştir. Örneğin, eski İsrailli işçiler Firavunlar döneminde görev yaparken yapısal bütünlülüğü arttırmak için yapıtlara kıyılmış sığla tuğlasını eklemişlerdir. Japon Samuray savaşçılarının arzu edilen malzeme (sertlik, şekillendirilebilirlik, esneklik) özelliklerini elde etmek için kılıç dövmelerinde lamine metaller kullandığı bilinmektedir. Yirminci yüzyılın başlarına gelindiğinde inşaat mühendisleri, betonarme beton yapmak için beton malzeme içerisine çelik iskelet yerleştirmişlerdir. Bu da iyi bilinen bir kompozit malzemeyi yaptıkları binalarda kullanmışlardır. Kompozit malzemelerin modern çağı II. Dünya Savaşı sırasında başlamıştır. Polimer matris malzeme içerisine fiberglas takviye elemanının ilavesi ile birlikte modern çağın ilk temelleri atılmıştır [17].



Şekil 1.7. Kompozit malzemeleri tarihsel gelişimi [18]

Kompozit malzeme gelişiminin tarihçesine bakıldığında; birinci nesil olarak bilinen cam fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler (CFTP) üretilmiştir. Bu malzeme uçakların kanatlarında, burun kısmında ve helikopter rotorlarında kullanılmıştır. Bu malzemelerden mukavemet açısından istenilen sonuçlar alınsa da kırılgan yapıda olduklarından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır. Ayrıca yüzeyde makro çatlaklar görülmektedir. Bu da istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır. Daha sonra laboratuvar ortamında kısa cam elyaflı kompozit malzemeler üretilmiş ancak o

dönemde uygulamaya geçirilmemiştir [19]. Şekil 1.8' de uçak parçalarında kullanılan kompozit malzeme örneği verilmiştir.

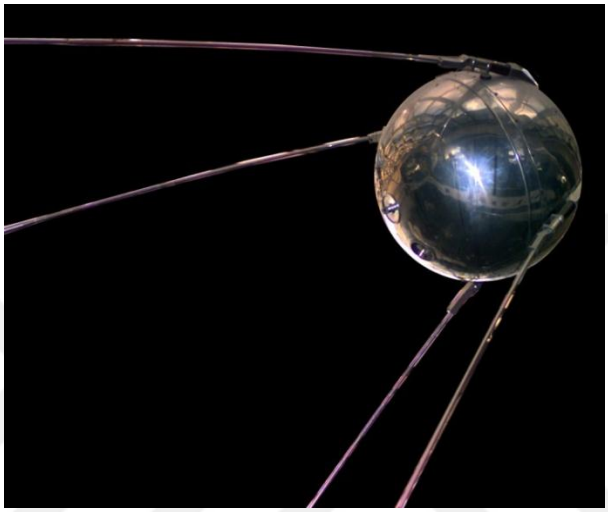


Şekil 1.8. Uçak parçaları [20]

Endüstriyel iş birlik ile birlikte CFTP üzerinde çalışmalar yoğunlaşılmıştır. 1932 yılında ABD'de cam elyaf malzemesinin üretim süreci hakkında çalışmalar yapılmıştır. 1935 yılına gelindiğinde cam elyaf malzemeler artık seri üretim ile üretilmeye başlanmıştır. Aynı zamanda kimya şirketleri yeni polimer malzemeler konusunda araştırmalarına devam etmişlerdir. 1940'lı yılların ortalarına gelindiğinde CFTP kompozit malzemelerin ABD gibi gelişmiş ülkelerde, askeri alanda kullanıldığı görülmektedir [19,20].

İkinci nesil olarak metal matrisli kompozit malzemeler ele alınmaktadır. Bunlara bakıldığında ise tarih 1960'lı yılları göstermektedir. Karbon, bor ve aramid fiberlerin kullanılmasıyla 1960'lı yıllarda kompozitler hakkında en genel fikir ortaya atılmıştır. Sovyet Sputnik uydusunun (Şekil 1.9) fırlatılması ile ilgili bir uzay yarışması gerçekleştirilmiştir. CFTP malzemeler atmosfere giriş ve çıkış sıcaklığından etkilendiği için kullanımından vazgeçilmiştir. Bilim adamları yaptıkları çalışmalarda, kompozit malzemeler grubuna farklı bir yaklaşım olarak metal matrisli kompozit

malzemeler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Demir dışı metal ailesinden olan hafif metallerin ısıl direncini arttırmak ve termal genleşme katsayılarını düşürmek için tipik olarak bir inorganik, seramik elyaf veya parçacık takviye kullanılmıştır. Çelik tel takviyeli bakır ile ilgili yapılan deneyler dışında metal matrisli kompozitler için çok az çalışma yapılmıştır. Karbon ve bor fiberlerin gelişimi ön plana çıkmıştır [19,21].



Şekil 1.9. 1957 Stupnik uydusunun görüntüsü [22]

Bir kompozit, doğası ve kökeni ne olursa olsun, iki heterojen yapıyı birleştiren bir malzeme türüdür. Bilim insanları ve mühendisler, kompozit malzemelerin üretim ve tasarımı için iki malzeme arasındaki ara yüzey özellikleri üzerinde çalışmaların üzerinde durmuşlardır. Heterojen yapıların mekanik özellikleri, matris ve takviye arasındaki ara yüzeylerin kalitesine bağlıdır. Elyaf ile matris arasındaki kimyasal bağları kuvvetlendirmek için katkı maddeleri geliştirilmesi önemli bir detaydır. Kompozitler bu nedenle, kimyagerleri önemli bir açıdan ilgilendirdiği için yeni bir malzeme araştırmasına yönlendirmiştir [20].



Şekil 1.10. Karbon fiber kumaş malzeme [23]

Üçüncü nesil olarak adlandırılan kompozit malzemeler 1960'lı yılların sonlarında uzay ve uçak endüstrisinin talepleri doğrultusunda yeni yüksek modüllü fiber arayışına neden olmuştur. 1970'li yıllarda yüksek fiyatlı elyaflarla üretilen kompozitler uzay endüstrisindeki ve askeri alandaki taleplerin düştüğü dönemlerde de sivil uygulamalara satış yapmak zorundaydı. Sivil uygulamalara geçişinin en önemli göstergesi spor ve otomobil endüstrilerinde daha önemli pazarlar haline gelmesidir. Karbon elyafları 1970'li yıllardan başlayarak, grafit tenis raketlerinde ve 1970'li yıllardan önce kullanılan ahşap raket başlarında kullanılmıştır. Ayrıca golf kulübünün çelik kulüp millerini değiştirmesi ile spor malzemeleri içinde kullanılmıştır. Grafitin daha hafif ve yüksek mukavemeti, daha sıkı tellerle üretilen tenis raketlerinin daha yüksek bir hızda sallanmasına ve böylece tenis topunun hızının arttırılmasına imkân sağlamıştır [19,20].

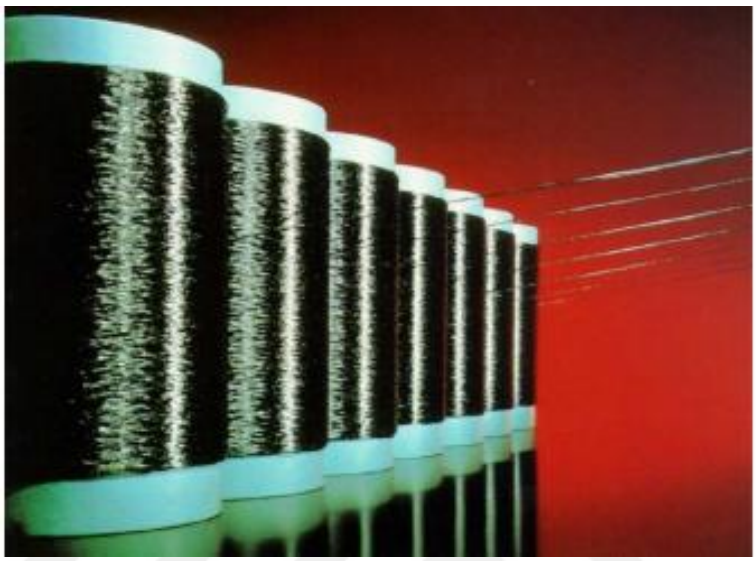


Şekil 1.11. Tenis raketi ve golf sopası başlığı [24,25]

Ay'a gönderilen Stupnik uydusunun başarılı bir şekilde istenilen yere ulaşmasından sonra; uzay mühendisleri Sovyet MIR uzay istasyonu, Skylab, Uzay Mekiği gibi yeniden kullanılabilir uzay araçlarını tasarlamaya başlamış ve sonrasında hepsi tekrarlanan sıcaklık salınımlarına maruz kalmıştır. Bu durum ilk olarak uzay yarışının başında araştırılan metal matris kompozitlerin (MMK) optimizasyonunu gerektirdi. Bunun içinde MMK'lerin yüksek dayanım, yüksek sıcaklık direnci ve düşük termal genleşme katsayısı özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir. Böylece malzeme normal termal döngü süreleri boyunca genleşme ve çok fazla daralma göstermemektedir.1970'li yılların ortalarında SiC gibi yeni elyaflar geliştirilmiştir. Karbon ve bor lifleri metalik matrisler için uygun takviye elemanı olarak kullanılmıştır [19,21].

Seramik matris kompozitlerinin (SMK'ler) gelişimi, SiC gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik malzemenin güçlendirilmiş fiberler takviyesi ile ortaya çıkmıştır. Çünkü düşük ergime noktalı fiberler, seramik sinterleme için gerekli olan yüksek işleme sıcaklıklarında malzeme içerisinde yok olmuşlardır. Yajima'nın 1976'daki Nicalon™ SiC liflerin gelişimi ile önemli bir adım atılmıştır. Gevrek seramikler, takviye edici bir faza ihtiyaç duymaktadırlar. Bu takviye edici faz gerilme-gerinim eğrisinin altındaki alan ile hesaplanmakta ve malzemenin tokluğuna katkıda bulunmaktadır. Seramik malzemelerde lif, bazen çatlak üzerinde köprü görevi görür

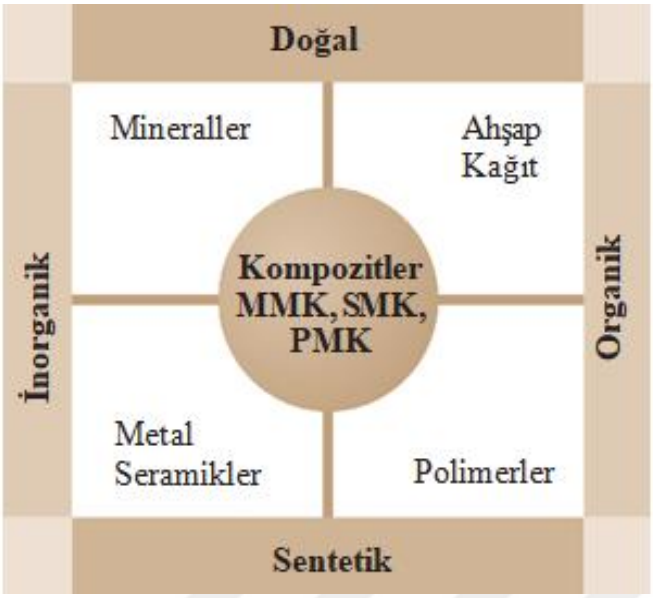
ve çatlamanın ön kenarına yayılmasını önlemek için bir baskı kuvveti oluşturmaktadır. Fakat fiber; aynı zamanda matrisin "çekilmesi" yoluyla çatlak yayılım enerjisinin bir kısmını absorbe etmektedir. Bu çekilme işlemine yardımcı olan lifler için kaplamalar geliştirilmiştir [26,27].



Şekil 1.12. NICALON™ seramik fiber [27]

1990'lı yıllara gelindiğinde hibrit kompozit ve nano kompozitler olmak üzere 2 konu üzerinde çalışılmıştır. Doğadan esinlenilerek moleküler ölçekte inorganik ve organik bileşenlerin karıştırılıp elde edilen malzeme "hibrit malzeme" olarak adlandırılmıştır. Endüstriyel araştırmacılar ve bilim insanları daha küçük takviye elemanı kullanarak kompozit malzemeleri elde etmişler ve konu dağılımını genişletmeye çalışmışlardır. Bu süreçte nano kompozit terimi ortaya çıkmıştır [19].

Endüstriyel açıdan bakıldığında kompozit teknolojisi; havacılık, otomotiv ve elektrik sektörü olmak üzere çok çeşitli endüstriyel sektörlerde hızla büyüyen değişime ayak uydurmak için gelişim göstermektedir. Yeni fiberler, yeni matrisler, yeni kompozit yapılar ve yenilikçi imalat süreçleri, küreselleşen dünya pazarında gittikçe artan rekabeti korumak için hayati önem taşıyan performans iyileştirmeleri ve maliyet düşüşlerinin yanında heyecan verici fırsatlar sunmaya devam etmektedir. Kompozit malzemelerin özelliklerinin öngörülmesi, bu karmaşık malzemelerin daha etkili ve güvenilir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca gelişen bilimsel anlayış ve modelleme kabiliyeti ile gelişmeye devam etmektedir [28].



Şekil 1.13. Kompozit malzeme seçimi [11]

Metal matrisli kompozitler (MMK'ler) genelde hafif metal alaşımları olan alüminyum, magnezyum veya titanyum alaşımlarından oluşurlar. Bu alaşımlar seramik parçacık, whisker veya fiberlerle takviye edilmiştir. Takviye elemanları çok büyük önem arz etmektedir. Çünkü; belirli bir kompozit malzemenin mekanik özelliklerini, maliyetini ve performansını takviye elemanları belirlemektedir. Parçacıklarla (süreksiz takviye türleri ile takviye edilmiş) yapılan kompozitler, takviyesiz metallere kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca takviye elemanı içeren ve takviye elemanı içermeyen metaller maliyet açısından kıyaslandığında takviyeli metallerin daha iyi mekanik özellikler sergilemesinin yanında maliyetinin takviyesiz metallerle yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem takviyeli metallerin daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. Sürekli takviye (uzun fiber veya tel takviyesi), MMK malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişmesini sağlamakta ancak maliyetlerinin de yükselmesine sebep olmaktadır. Metaller takviye edilirken birçok farklı özellikler üzerinde değişimlerin yapılması planlanmaktadır. Örneğin; hafif metallerin takviye edilmesi, daha düşük ağırlık istenen alanlarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Burada en önemli durum bileşen özelliklerinin geliştirilmesidir. Hafif metal kompozit malzemelerin tasarımı için [29,30]:

• Düşük süneklik,

• Oda sıcaklığında ve oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda akma dayanımı ve gerilme mukavemetinde artışın sağlanması,

• Geleneksel alaşımlara kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda sürünme direncinde artışın sağlanması,
• Yüksek sıcaklıklarda yorulma mukavemetinde artışın sağlanması,
• Termal şok direncinin iyileştirilmesi,
• Korozyon direncinin artırılması,
• Young (Elastisite) modülünde artışın sağlanması,
• Termal uzamada azalma hedeflenmiştir.

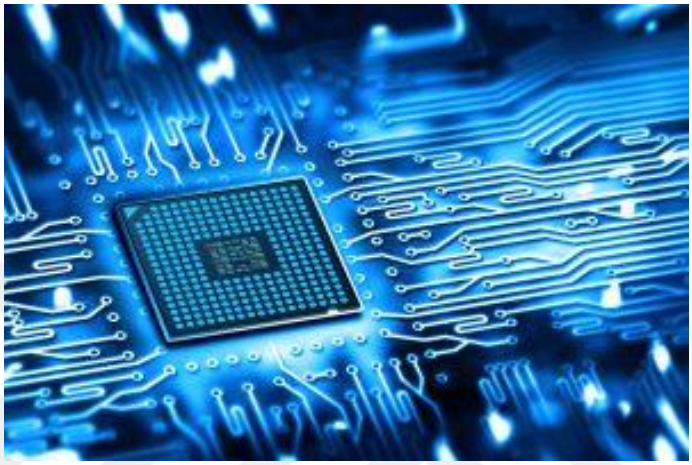
Özetlemek gerekirse, uygulama alanının genişletilmesi, ortak malzemelerin ikame edilmesi ve bileşen özelliklerinin optimizasyonu olanakları sunarak ağırlığa özgü özelliklerde bir iyileşme meydana getirmektedir. Fonksiyonel malzemelerle, materyalin uygun işlevini sürdürmenin ön şartı olan başka bir amaç daha bulunmaktadır. Hedefler şunlardır:

• Yüksek iletkenliği korurken, iletken malzemelerin dayanımını arttırmak,
• Düşük sıcaklıkta sürünme direncinde iyileşme (reaksiyonsuz maddeler) sağlamak,
• Yorulma davranışının iyileştirilmesi (anahtarlama kontağı),
• Aşınma davranışının iyileştirilmesi (sürtünmeli temas),
• Elektronik bileşenler için katmanlı kompozit malzeme üretimi,
• Sünek kompozit süper iletkenlerin üretimi,
• Özel özelliklere sahip manyetik malzemelerin üretimi [30].

1.5. Yarıiletken Malzemeler

Yarı iletken malzemelerin, metaller ve metal olmayan malzemeler arasında ara bir konumu vardır. Yarı iletken malzemelerin en önemli elementleri silisyum ve germanyum elementleridir. Bu elementler kovalent bağ ile bağlanırlar ve elmas yapıya sahiptirler. III-V-bileşikleri de benzer şekilde yapılandırılmıştır. Galyum arsenik (GaAs) buna örnek olarak verilebilir. Yarı iletkenlerin elektriksel dirençleri iletkenler ile yalıtkanlar arasındadır. Yarı iletkenler, tamamen doldurulmuş ve tamamen boş elektron bantları arasında bir enerji aralığına sahiptirler. Yarıiletkenlik, iç ve dış yarı iletkenlik olarak ikiye ayrılabilir. “İç yarı iletkenlik”, saf bir malzemedeki doğal yarı iletkenliği tanımlar. Çoğu iç yarı iletkenler, bir elektronik devrede oda sıcaklığında kullanılacak yeterli derecede düşük dirence sahip değildirler. Gerekli direnç değerini elde etmek için, sisteme kontrollü empürite

ilavesi gerçekleştirilir. Bu şekilde elde edilen malzemeye "dış yarı iletken" adı verilir. İlave edilen malzemenin valansı esas malzemenin valansından büyükse oluşan yarı iletken "n-tipi" dış yarı iletken; valans değeri küçükse "p-tipi" dış yarı iletken olarak adlandırılır. Cu_2O, $BaTiO_3$, VO_2, ZnO, SiC ve $MoSi_2$ başlıca yarı iletken seramiklerdir. Yarıiletkenler, elektronik bileşenler ve uygulamalar için önemli fonksiyonel malzemelerdir [11].



Şekil 1.14. Yarı iletken bilgisayar parçası [31]

1.6. Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, insan vücudundaki canlı dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan doğal ya da yapay malzemelerdirler. Biyomalzemelerden beklenen temel özellikler biyouyumlu olmaları, kemiğe yakın elastik ve mekanik özellikler göstermeleri, yüksek korozyon dayanımı ve uygun tasarımda olmalarıdır. Sürekli olarak veya belli aralıklarla vücut akışkanlarıyla (örneğin: kan) temas ederler. Bu nedenden dolayı vücuda yerleştirilecek malzemenin vücutla uyum içerisinde olması, yerine konulduğu organın fonksiyonunu kısmen ya da tamamen yerine getirebilmesi, biyomalzemelerin önemini artırarak inceleme alanlarının genişlemesine yol açmıştır. Biyomalzemeler, biyomedikal uygulamalar için uygun malzeme sınıfı olarak geniş yer kaplamaktadır. Sentetik olarak biyolojik olmayan maddelerden veya inorganik maddelerden türetilmiş olabilirler. Ayrıca canlı dokulardan da elde edilebilirler. Biyomalzemeleri içeren ürünler oldukça çeşitlidir. Biyokimyasal sensörler, tek kullanımlık malzemeler ve ürünler, ilaç verme sistemleri, dişçilik, plastik cerrahi, kulak ve oftalmolojik cihazlar, ortopedik protezler, yara tedavisi yardımcıları, biyomedikal ve hijyenik kullanımlar için

ambalaj malzemeleri örnek olarak verilmektedir. Şekil 1.15'de biyomalzeme örneği verilmektedir. Biyomalzemelerin uygulanması için sentetik substratlar ile biyolojik dokular arasındaki etkileşimin anlaşılması klinik gereksinimlerin ihtiyaçlarını karşılamak için çok önemlidir [11].



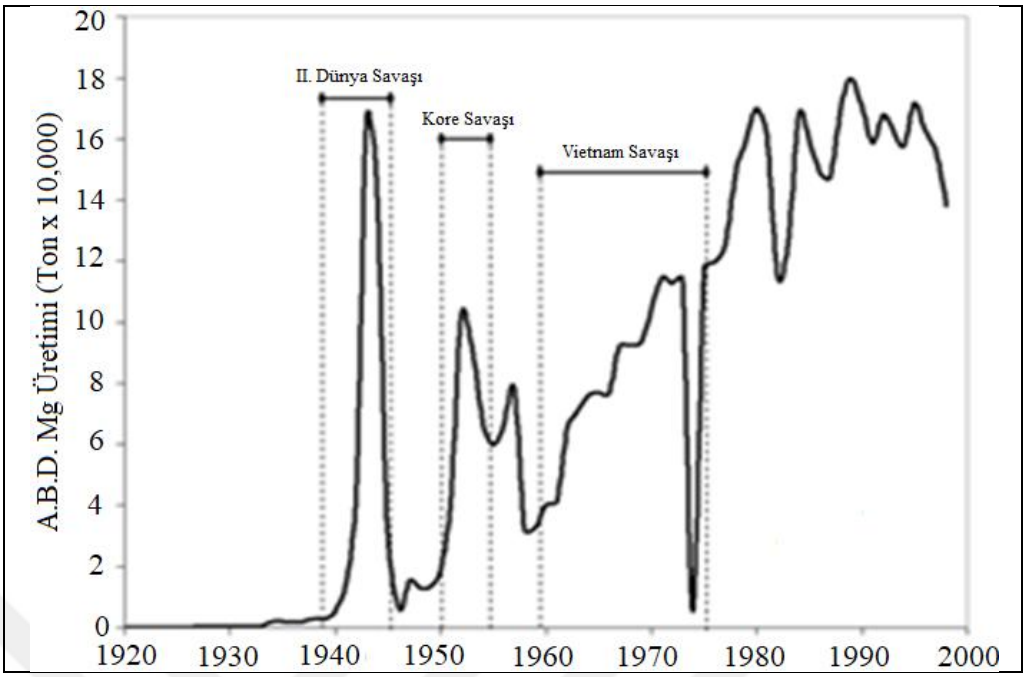
Şekil 1.15. Diş implantı için kullanılan biyomalzeme [32]

2. MAGNEZYUM VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANIMI

2.1. Magnezyumun Tarihçesi ve Geleceği

Magnezyum ve alaşımlarının tarihsel açıdan incelendiğinde 19. yy başlarına dayanan bir geçmişi bulunmaktadır. Bu geçmiş krolonojik sırası ile incelendiğinde tarihsel gelişmeler şu şekilde sıralanabilir. 1808 yılında Sir Humphrey Davy isimli bilim insanı magnezyumun oksit halinde olduğu magnezyayı keşfetmiştir. Bu keşif ile yola çıkan Antoine-Alexander Bussy 1828 yılında magnezyadan magnezyum metalini saf halde elde etmiştir. Bu tarihten beş sene sonra 1833 yılında J. Von Liebiling ve Michael Faraday isimli iki bilim insanı klorürden indirgeme yöntemi ile magnezyumu elde etmişlerdir. Magnezyumun ticari üretimi başlamadan önce, 1896-1915 yılları arasında Herbert H. Dow tarafından 18 yıllık laboratuvar araştırması ve pilot araştırmalar yapılmıştır. Herbert H. Dow'un yaptığı çalışmaların üzerinden 16 yıl geçtikten sonra 1930'lu yılların başında magnezyumun bir kilogramı 5 dolardan 30 sente inmiştir. Campbell ve Hatton, 1951 yılında yaptıkları çalışmalarda magnezyumun üretiminin işletme maliyetlerini daha da düşürmüşlerdir. Magnezyum üzerine önemli çalışmaları olan Herbert H. Dow 1997 yılında ölmüştür. 80 yıllık yaşamı süresince yılda en az 100000 ton miktarındaki magnezyumun üretimine büyük katkı sağlamıştır [33-35].

Amerikan savunma sanayisi de magnezyuma büyük bir ilgi duymuştur. İkinci Dünya, Kore ve Vietnam savaşlarında askeri uygulamalarda magnezyum ve alaşımları yoğun ilgi görmüştür. Farklı üretim yöntemleri ile üretilen ve özellikle askeri hava araçlarında kullanılan magnezyum ve alaşımlarının kullanım miktarı Şekil 2.1' deki grafikte gösterilmiştir [34].



Şekil 2.1. Amerikan askeri uygulamalarında magnezyum kullanımının yıllara göre değişimi [34]

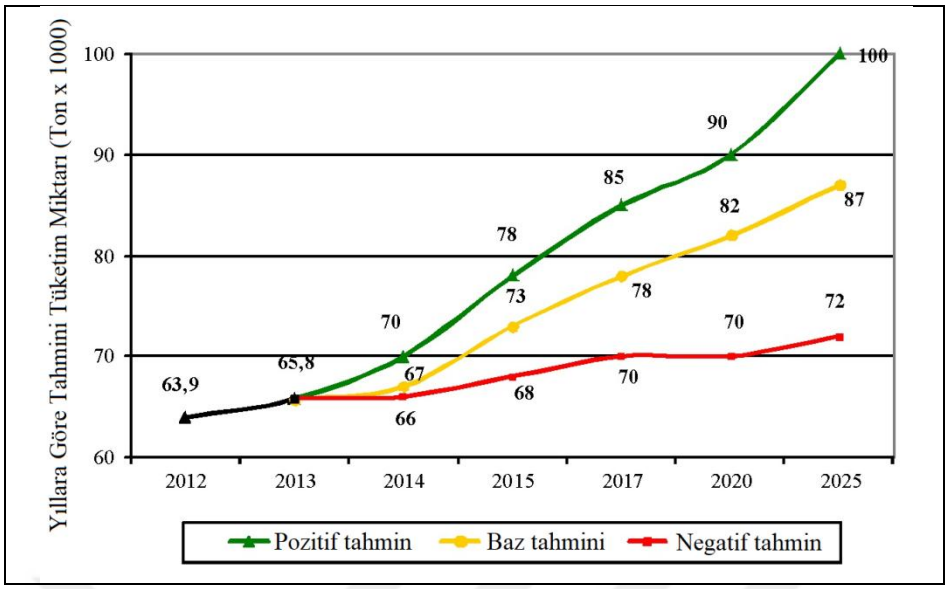
Günümüze gelindiğinde, dünya nüfusunun son elli yılda artması ile birlikte insanların kullandıkları araç ve gereçlerin hafif olması gerekliliği ön plana çıkmıştır. Bu gereklilik havacılık, uzay ve özellikle otomotiv endüstrisinde daha fazla önem arz etmektedir. Hem yakıt tüketimi açısından hem de çevreye salınan zararlı gazları en asgari düzeyde tutma açısından magnezyum ön plana çıkmaktadır [36,37]. Otomotiv sektörü için en somut örnek olarak; Volkswagen markası, Beetle modelindeki her otomobilinde 22 kg'a yakın magnezyum kullanmaktadır. Bu Beetle modeli Otomotiv endüstrisinde motor haricinde magnezyum kullanılan ilk örnektir. Porsche ise ilk olarak 1928 yılında magnezyum alaşımlı motor ile magnezyum kullanan otomotiv şirketleri arasına girmiştir. Porsche markası adı altında üretilen otomobiller için kullanılan magnezyum miktarı otomobil başına 2005 yılında 3 kg, 2010 yılında 20 kg ve 2015 yılında ise bu rakam hayli yükselerek 50 kg değerine ulaşmaktadır. Şekil 2.2' de araçlarda kullanılmaya başlanılan magnezyum parçaları örneği verilmiştir. [38,39].



Şekil 2.2. Otomotiv endüstrisinde kullanılan magnezyum parçalar [38]

Magnezyum kullanımı sadece otomotiv sektörüyle sınırlı değildir. Yakın gelecekte spor sektöründe çok fazla kullanılacağı düşünülmektedir. Magnezyum hafif, dayanıklı ve aynı zamanda alüminyuma göre 16 kat daha fazla şok ve titreşim absorblama özelliğinden dolayı, üstün rekabet avantajı sağlayan ideal bir malzemedir [40].

Birçok motosiklet, dağ bisikleti imalatçısı ve spor sektörlerinde kullanılan yenilikler de dikkat çekmektedir. Kayakçıların, snowboardcuların ve hatta buz patencilerinin yüksek hızlarda çok daha iyi denge sağlaması için ekipmanlarının bir kısmı magnezyumdan üretilmektedir. Tüketici elektroniği, magnezyum ve alaşımlarının önemli bir rol oynadığı başka bir alandır. Dizüstü bilgisayar veya cep telefonu piyasası ürünlerinin daha hafif ve dayanıklı olması için kullanılan parçalarının bir kısmının magnezyumdan üretilmesi düşünülmektedir. Magnezyum ısıl iletkenlik açısından plastikten 100 kat daha iyidir [40,41]. Bunların yanında gelecekteki havacılık endüstrisindeki magnezyum ve alaşımlarının uygulaması günümüzde hızlı şekilde çalışan araştırma ve geliştirme projelerine dayanacaktır. Bu tür projeler günümüzde özellikle Avrupa Birliği projelerinde ve ülkelerinde, ABD, İsrail, Fransa ve Avusturya'da bulunmaktadır. Magnezyumun öngörülen yıllık tüketim miktarı Şekil 2.3' te verilmiştir [42,43].



Şekil 2.3. Magnezyumun ön görülen yıllık tüketim miktarı (bin ton) [43]

2.2. Magnezyumun Temel Özellikleri

2.2.1. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri

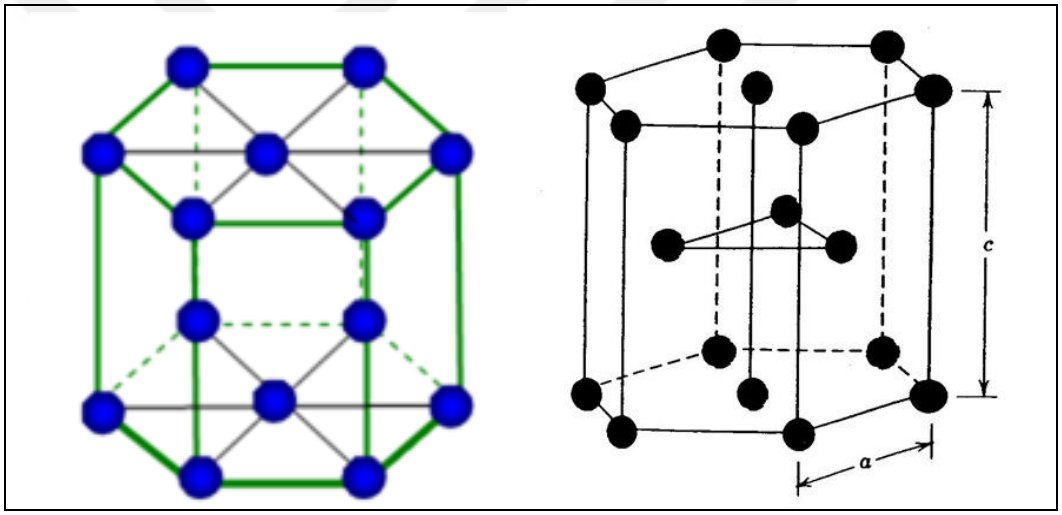
Magnezyum, mühendislik malzemeleri içerisinde kullanılan en hafif metaldir. Yer kabuğunun %2,7' sinde ve okyanusların %0,13' ünde bulunması sebebi ile doğada en fazla bulunan mineraldir. Ticari önem olarak kazanılabilir magnezyum minerali, 11 ülkede 38 önemli yatakta 380 milyon ton olarak çıkarılmaktadır. Magnezyumun çıkarıldığı üç temel kaynak bulunmaktadır. Bunlar; Deniz suyu, mineral kayaçlar ve asbesttir. Periyodik tablonun 2A grubunda yer alan ve toprak alkali elementi olan magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.1' de verilmiştir [35,44]. Magnezyum kristal yapısı itibariyle titanyum, kadmiyum ve çinko ile benzer olup hekzagonal sıkı paket yapıdadır. Şekil 2.4' te hekzagonal sıkı paket yapısı verilmiştir [45].

Tablo 2.1. Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [35,44]

Simgesi	Mg
Ergime Noktası	650°C
Yoğunluğu	1,74 $g.cm^{-3}$

Tablo 2.1. (Devam) Magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [35,44]

Kristal Yapısı	Hekzagonal Sıkı Paket
Young Modülü	45 GPa
Çekme Dayanımı	80-180 MPa
Akma Dayanımı	20 MPa
Elastik Modül	44,5 GPa
Brinell Sertlik	30



Şekil 2.4. Magnezyumun kristal yapısı (HSP yapısı) [45,46]

2.2.2. Magnezyumun kimyasal özellikleri ve magnezyum elde edilmesi

Periyodik tablonun 2A grubunda yer alır ve sembolik olarak "Mg" olarak ifade edilir. Atom numarası 12 olan magnezyum gümüşi beyaz renkte ve diğer metalik malzemelere göre çok hafiftir. Magnezyum; alkillerin çoğu ile hidrokarbonlarla, aldehitlerle, alkollerle ve yağların çoğu gibi birçok organik maddeyle çok az reaksiyona girmektedir. Katalizör olarak kullanılan magnezyum yoğunlaşma, indirgeme ve dehalojenleştirme reaksiyonlarını desteklemektedir [47].

Doğada magnezyum saf halde bulunmamaktadır. Saf Magnezyum üretilmesi için kullanılan çeşitli mineraller bulunmaktadır. İlk olarak magnezit, esas olarak

karbonatlanmış magnezyumdan oluşur ve düşük konsantrasyonda kalsiyum, demir ve mangan içermektedir. Bunlar mangezit fiziksel özelliklerine benzer karbonatlardan oluşan kalsit grubuna aittir. Magnezit genellikle magnezyum bakımından zengin kayaların karbonat açısından zengin çözeltilerle reaksiyona girmesi ile üretilmektedir. Kalsit benzeri kristal yapıya sahiptir ve beyazdır. Magnezit normal olarak tanımlanmış bir form olan kristalleri üretememektedir. İkinci olarak dolamit de magnezit gibi karbonatlı bir içeriğe sahiptir. Dolomit genellikle renksizdir ve küçük elmas şekilli kristaller gibidir. Dolomit, magnezyum iyonları varlığında kalsit dönüşümleri sonucu oluşmaktadır. Dolomit kaya kimya endüstrisinde magnezyumun hazırlanması için gereklidir. İnşaat ve dekorasyon taşı olarak kullanılmaktadır [48,49]. Üçüncü olarak bişofit minerali ise kristal biçiminde ve renksizdir. Bişofit hem madencilikte hem de denizden üretilen kaya taşı üretim sürecinin bir yan ürünü olarak elde edilmektedir. Tuzlu su çözeltilerinden olan Büyük Tuz Gölü'nden gelen deniz suyundan çıkarılmaktadır. Bişofit çıkartmak için su, güneşten buharlaştırma yoluyla solüsyondan kısmen uzaklaştırılır ve daha sonra diğer tuzlar kristalleştirilir. Karnalit de bişofit gibi kaya taşı üretiminde ve magnezyum için hammadde olarak hizmet etmektedir. Deniz suyunun yoğunlaştığı ve devam eden buharlaşmaya maruz bırakıldığı buharlaşma havuzlarının çökeltisi ile üretilmektedir. Karnalit oluşumu süreci, yoğun ve doğal buharlaşmayı sağlayacak özel iklim koşullarına ihtiyaç duymaktadır. Buna ek olarak, oluşum havzası özel bir şekle sahip olmalıdır. Bu türden tipik koşullar, karnalitin büyük kütleler halinde göründüğü ve kristal biçimli olmadığı yer Ölü Deniz'dir. Yılan taşı olarak da bilinen serpantin karnalit ile benzer kimyasal özelliklere sahip, ancak farklı bir yapıda olan silikat minerali grubu içerisindedir. Bu grup, magnezyumdan daha zengin minerallerden üretilmektedir ve çoğunlukla yeşilimsi magnezyum hidroksit silikatlardan oluşmaktadır. Serpantin grubundaki en iyi bilinen minerallere krisotil denir ve bunların ana formülü: $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$'dir. Serpantin grubundaki minerallerin çoğu asbest liflerinden oluşmaktadır. Asbest, evlerin ve binaların izolasyonu için kullanılmaktadır. Serpantin yapısı katmanlar arasında $Mg(OH)_2$ tabakalarına sahip tetrahedral silikatlar katmanlarını içermektedir. Serpantin metamorfik kayaçların bir bileşenidir. Deniz suyu da magnezyum üretiminde hammadde olarak kullanılan malzemelerden bir tanesidir. Tablo 2.2' de magnezyum minerallerinin kimyasal formülü ve magnezyum konsantrasyonları verilmiştir [50].

Tablo 2.2. Minerallerinin kimyasal formülü ve magnezyum konsantrasyonları [48-50]

Mineraller	Formüller	Mg Konsantrasyonu (%)
Magnezit	$MgCO_3$	28,8
Dolomit	$MgCO_3*CaCO_3$	28,8
Bişofit	$MgCl_2*6H_2O$	11,96
Kamalit	$MgCl_2*KCl*6H_2O$	8,75
Serpatin	$3MgO*2SiO_2*2H_2O$	26,33
Deniz Suyu	$Mg^{2+}_{(aq)}$	0,129

2.3. Magnezyumun Alaşımları

Çoğu metaller gibi magnezyum nadiren saf haliyle kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının hem dövme yöntemi ile hem de döküm yöntemi ile üretilmesi özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır. Magnezyum, hekzagonal sıkı paket kafes yapısına sahiptir ve geniş bir element yelpazesiyle katı çözelti oluşturan bir atomik çapa sahiptir. Kadmiyumun haricinde magnezyum da dâhil olmak üzere çoğu ikili alaşımlar ötektik veya peritektik sistemler oluştururlar. Alaşımın ana amacı, alaşımların özelliklerinde belirli gelişmeler yapmaktır. En yaygın alaşım elementleri alüminyum, çinko, manganez, zirkonyum, gümüş, itriyum ve nadir toprak elementleridir. Bakır, nikel ve demir, magnezyum alaşımlarının kalitesini artırmak için kontrollü olarak eklenen alaşım elementleri olarak kabul edilir [51].

Amerikan Test ve Malzeme Topluluğunun (ASTM) yapmış olduğu standart sistemi ile magnezyuma ilave edilen elementler büyük harf ile gösterilmektedir. İlave edilen alaşım elementlerine bağlı olarak genelde iki harf ve iki rakamdan oluşmaktadır. Harflendirme işleminde yüzde miktarı en yüksek olan ve onun hemen arkasından bir sonra gelen elementin harfi kullanılmaktadır. Geri kalan iki rakamda ise ilave edilen

yüzde miktarına göre yuvarlama işlemi yapılmaktadır. Tablo 2.3' te en çok kullanılan alaşım elementleri ve harfleri verilmiştir [52].

Magnezyum alaşımlarından AZ91 ve AZ31 örnek verilecek olursa;

- İki alaşımda da büyük a (A) olanlar alüminyum elementini simgelemektedir.
- İki alaşımda da büyük z (z) olanlar çinko elementini simgelemektedir.
- 9 ve 3 rakamları alüminyum miktarını belirtmektedir ve sırası ile % 9 ve 3 miktarında alüminyum bulunmaktadır.
- Her iki alaşımda da çinko miktarı eşit olup % 1 civarındadır [53].

Tablo 2.3. En çok kullanılan alaşım elementleri ve harfler [51]

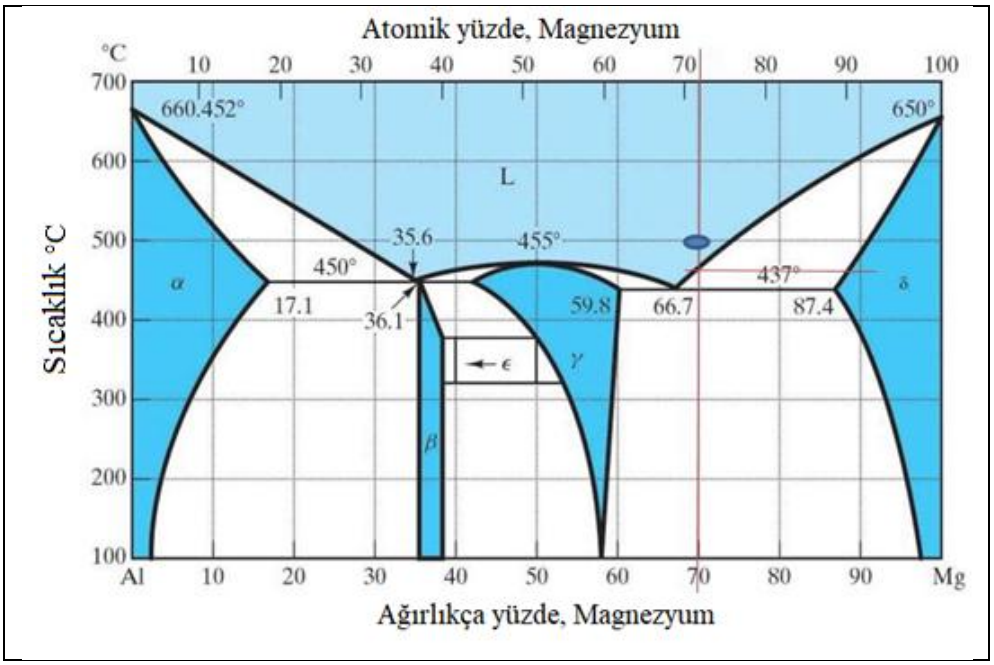
Harf	A	C	K	M	Q	S	X	Z
Element	Al	Cu	Zr	Mn	Ag	Si	Ca	Zn

2.3.1. Mg-Al alaşımları

Alüminyum, Mg alaşımlarında kullanılan en yaygın alaşım elementidir [51]. Magnezyum, alüminyum ve bunların alaşımları hafif metallerin ana üyesidir. Magnezyum ve alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet ve yüksek sertlik gibi önemli avantajlarından dolayı ileri mühendislik uygulamaları olan otomobil ve havacılık endüstrileri için iyi bir aday malzemeleridir. Bununla birlikte, saf magnezyum daha düşük mukavemet, yüksek sıcaklık ve zayıf korozyon direnci, mühendislik alanlarında daha ileri uygulamalar için engel oluşturmuştur. Bir başka yaygın olarak kullanılan hafif metal olan alüminyum ve alaşımları aynı zamanda yüksek özgül mukavemet ve mükemmel aşınma direncine sahiptir. Al alaşımlarından farklı olarak, Mg alaşımlarının korozyon kontrolü çok daha zordur. Mg alaşımları için koruyucu tabaka olarak Al alaşımları tercih edilir. Kompozit benzeri yapı olarak birleştirilip üzerinde oluşan yapı ile hem korozyon hem de aşınma özelliklerini geliştirmek için ideal bir çözümdür [54].

Mg alaşımları içerinde Mg-Al ikili sistemi bilinen en eski ve en çok kullanılan döküm alaşımlarındandır. AZ91, AM50 ve AM60 gibi yüksek alüminyum içeren

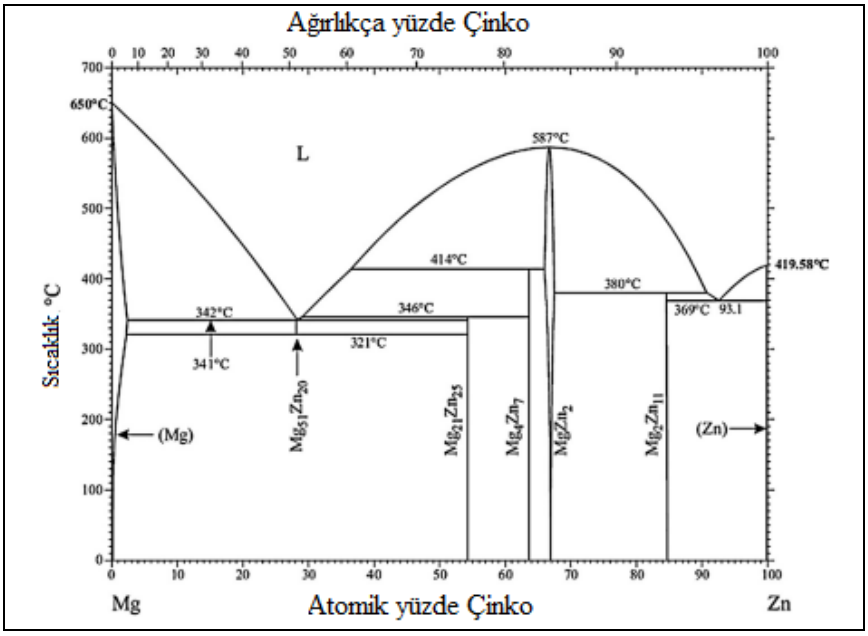
üçlü alaşımlar hala tüm magnezyum alaşımlı dökümlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Birçok ticari döküm magnezyum alaşımı, ağırlıklı olarak AZ91D, AM60B, AM50A, AE42 ve AS21 alaşımları gibi Mg-Al alaşımlarıdır. AZ91D, AM60B ve AM50A alaşımları nispeten yüksek Al içeriği bulunduğundan, mekanik özellikler, korozyon direnci ve döküm özelliklerinin iyi bir kombinasyonunu sunmaktadırlar. Al'nin Mg içindeki maksimum çözünürlüğü, 25°C'de yaklaşık %2,1'den 437 °C ötektik sıcaklığa kadar %12,6'ya değişmektedir. Ötektik kompozisyon %35,6 ağırlıkta ve ötektik α-Mg ile γ-fazı arasında olan $Mg_{17}Al_{12}$ bileşiğidir. Faz diyagramından da görüleceği üzere, Mg-Al alaşımları çökelti oluşturma işlemi gerçekleştirebilirler ancak Mg-Al alaşımlarının çözeltiye alınması pek çok Al-Si alaşımında görülen ötektik etkiyi göstermez. Çünkü γ-$Mg_{17}Al_{12}$ çökeltisi tutarsız bir biçimde oluşmaktadır. Mg-Al ikili alaşımları genelde yüksek derecede dökülebilirdir ve tipik olarak iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, ticari alaşımlar nadiren ikili alaşımlardır. Çinko, manganez, nadir toprak metalleri ve silisyum ilaveli çoğunlukla üçlü alaşımlardır. Bu ilaveler spesifik özellikleri geliştirir ve alaşımları döküm için daha uygun hale getirmektedir. Bunlar ayrıca alaşımın katılaşma davranışını zorlaştırmaktadır [51,55,56].



Şekil 2.5. Al-Mg faz diyagramı [57]

2.3.2. Mg-Zn alaşımları

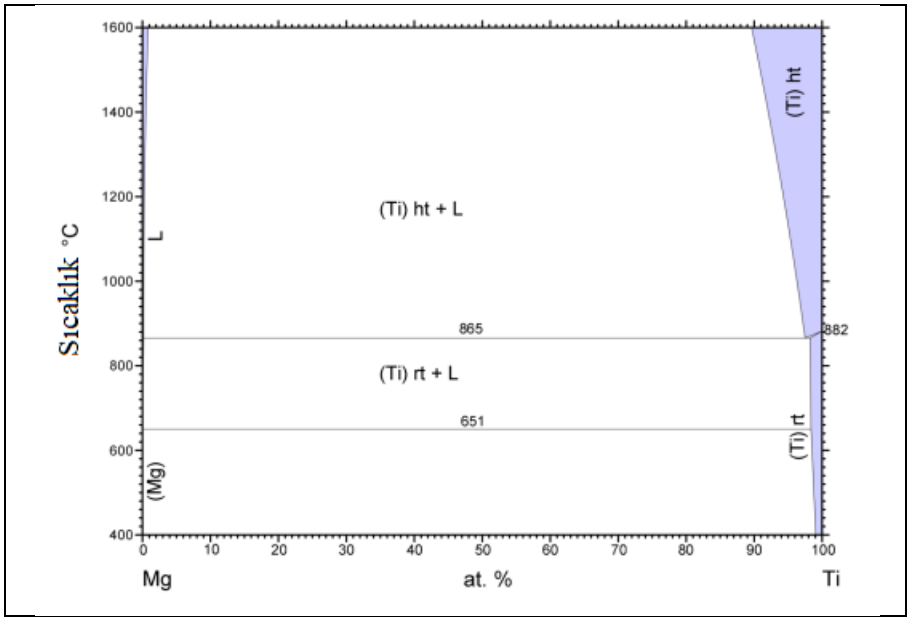
Magnezyum alaşımlarında en önemli 2. Element olarak çinko kullanılmaktadır. Özellikle 3'lü sistem olarak AZ91ve AZ31 en önemli alaşımlardır. Bazı ticari magnezyum döküm alaşımları, az miktarda nadir toprak elementlerinin eklenmesiyle Mg-Zn ikili alaşım sistemine dayanır [58]. Şekil 2.6' deki Mg-Zn faz diyagramında gösterildiği gibi, Mg-Zn sisteminde $Mg_{51}Zn_{20}$, $Mg_{21}Zn_{25}$, Mg_4Zn_7, $MgZn_2$ ve Mg_2Zn_{II} olmak üzere beş intermetalik bileşik bulunmaktadır. $M_{51}Zn_{20}$ fazı oda sıcaklığında dengeli değildir. $Mg_{21}Zn_{25}$, Mg katı-çözeltisi (α-Mg) ile intermetalik denge halindeyken, Zn içeren ticari Mg alaşımlarında yapay yaşlanma sırasında Guinier Preston (GP) zonlarının oluşmasıyla $MgZn_2$ ve Mg_4Zn_7'nin metastabil çökeltileri oluşur [59]. Çinko ve magnezyumun insan sağlığı açısından da toksik etkisi bulunmamaktadır. Aksine çinko insan vücudu için yararlı bir elementtir ve biyomedikal uygulamalar için tercih edilmektedir. Mg-Zn alaşımları son zamanlar biyomedikal uygulamalarda da kullanılan bir alaşım türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca çinko, magnezyum alaşımlarının korozyon direncini ve mekanik özelliklerini artırmaktadır. Örneğin; magnezyumdaki çinko oranı arttırılarak magnezyumun korozyon özellikleri iyileştirilir. Ayrıca çinko, katı bir çökelti sertleştirme mekanizması yoluyla magnezyumu etkin bir şekilde güçlendirebilir [53].



Şekil 2.6. Mg-Zn faz diyagramı [59]

2.3.3. Mg-Ti alaşımları

Mg-Ti sisteminin faz diyagramı, magnezyum ve titanyumun denge çözünürlüğünün çok düşük olduğunu ortaya koymaktadır. İkili magnezyum-titanyum sisteminin katı çözünürlüğü her iki taraf için de %2'den azdır. Magnezyum ve titanyum, birbiri içersinde çözünmediklerinden dolayı intermetalik bileşikler oluşturmazlar. Bununla birlikte Ti, Mg'a göre küçük bir çözünürlüğe sahip olan bir elementtir. Ağırlığı sadece %0,125'e kadar olan bir konsantrasyonda Ti içeren alaşımlar, Mg-Ti esaslı alaşımlar için Şekil 2.7' de verilen faz diyagramında gösterilmektedir. Bu faz diyagramları; mukavemet, korozyon ve aşınma direnci açısından hafif ve kolay şekil verme özelliklerine sahip olan Mg-Ti esaslı alaşım sağlamak için pratik bir uygulama alanına sahip değildir. Titanyumun magnezyumun sınırlı çözünürlüğü ve ergime noktaları arasında büyük bir fark (Ti (1668 °C) ile Mg (650 °C)) olmasından dolayı geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile Mg-Ti alaşımlarının üretimi mümkün değildir. Ark-eritme, hızlı katılaşma ve Mg-Ti alaşımlarının katı halde işlenmesi yoluyla üretimi mümkün kılınmaktadır. Böylece günümüze kadar, yüksek bir konsantrasyonda Ti içeren bir Mg-Ti esaslı alaşım üretmek mümkün olmamıştır ve pratikte yüksek bir konsantrasyonda Ti içeren Ti-Mg esaslı alaşım üretilememiştir. Bu sınırlı çözünürlükten dolayı Mg içerisine titanyum ilavesi sonucunda metal matrisli metal takviyeli bir kompozit malzeme elde edilmektedir [60-62].



Şekil 2.7. Mg-Ti faz diyagramı [63]

3. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Yaklaşık bir asırdır petrol rezervlerindeki petrolün aşırı derecede tüketilmesinden dolayı özellikle otomobil sektörü açısından büyük sıkıntılar meydana gelmektedir. Bunun yanında bilim insanlarının araştırması ve geliştirmesi yönünden hafif metaller çok fazla çalışma alanı oluşturmaktadır. Hafif metaller, yakıt verimliliğini ve doğaya salınan zararlı gazların azaltılması için özellikle taşımacılık sektöründe tercih edilen bir konuma gelmiştir. Hafif metallerden olan magnezyum ve alaşımları, kritik uygulamalar için oldukça başarılı bir seçim olmaktadır. Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluklu, yakıt verimliliği ve geri dönüştürülebilirlik özellikleri iyi olan mühendislik malzemeleridir. Magnezyum esaslı malzemelerin yüksek spesifik mekanik özellikler sergilemesi; otomobil, uzay, havacılık, elektronik ve spor endüstrilerinde olası kullanımları için üreticilerin ilgisini çekmiştir. Magnezyum ve alaşımları; boyutsal kararlılık, işlenebilirlik ve sönümleme kapasitesi yönünden oldukça dikkat çekici bir malzemedir. Magnezyumun kullanımındaki başlıca kısıtlayıcı faktörler arasında düşük elastisite modülü, kullanım sıcaklığında bir artış ile hızlı bir güç kaybı ve zayıf sürünme direnci bulunmaktadır. Geleneksel olarak alaşım elementleri ilavesi, son zamanlarda daha kuvvetli ve sert malzemelerle takviye edilmesi bu sınırlamaları ortadan kaldırmak için iyi bilinen uygulamalar arasındadır [64,65].

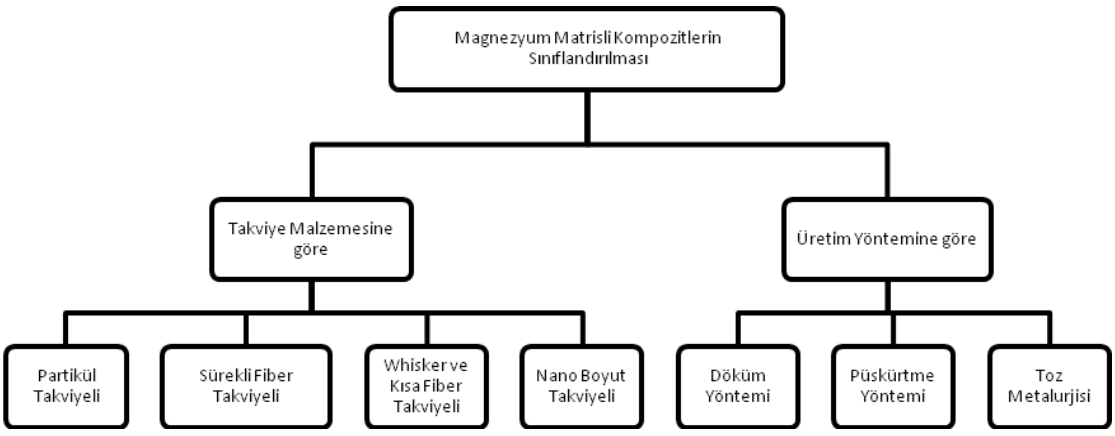
Magnezyum matrisli kompozit; düşük yoğunluklu, yüksek spesifik mukavemet ve spesifik rijitlik, mükemmel döküm kabiliyeti, yüksek aşınma direnci ve sönümleme kapasitesi gibi üstün özellikleri nedeniyle alüminyum matrisli kompozitlerle rekabet edebilecek metal matrisli kompozit malzeme olarak bilinmektedir. Magnezyum matrisli kompozit, mükemmel yapısal ve fonksiyonel malzemedir [66].

MMK'lerin geleneksel metal veya alaşımlara kıyasla daha iyi avantajları olduğu için MMK'ler çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde kullanılacak malzemelerde; düşük yoğunluk, özel termal genleşme katsayıları, iletkenlik

özellikleri ve mekanik özellikler önemlidir. Bu nedenle, diğer endüstrilerle karşılaştırıldığında havacılık endüstrisi, MMK'lerin bu özelliklerini geliştirmeye odaklanmaktadır. MMK'lerin maliyeti ikinci planda tutulmaktadır. Magnezyum matrisli karbon takviyeli malzeme bunun en güzel örneklerindedir. Otomotiv endüstrisinde kullanılacak parçalar için yüksek dayanım, sıcaklık direnci, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek aşınma ve sürünme direncine sahip malzeme özellikleri gerekmektedir. Otomotiv endüstrisinde bu özellikler gerektiğinden, bu endüstri piston çubukları, çerçeveler, vana yayı başlıkları, fren diskleri ve fren balatalarını yapmak için Mg-SiC ve Mg-Al_2O_3 kullanmaktadır. Askeri uygulamalar için yüksek özgül mukavemet, sertlik, darbe mukavemeti ve yorulmaya dayanıklı malzemeler gerektirir. Bu nedenle askeri alanda; türbin bıçakları, füzeler, zırhlar ve kurşungeçirmez parçalar gibi ürünler için Mg-C ve Mg-B_4C'yi kullanılmaktadır [67].

3.1. Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması

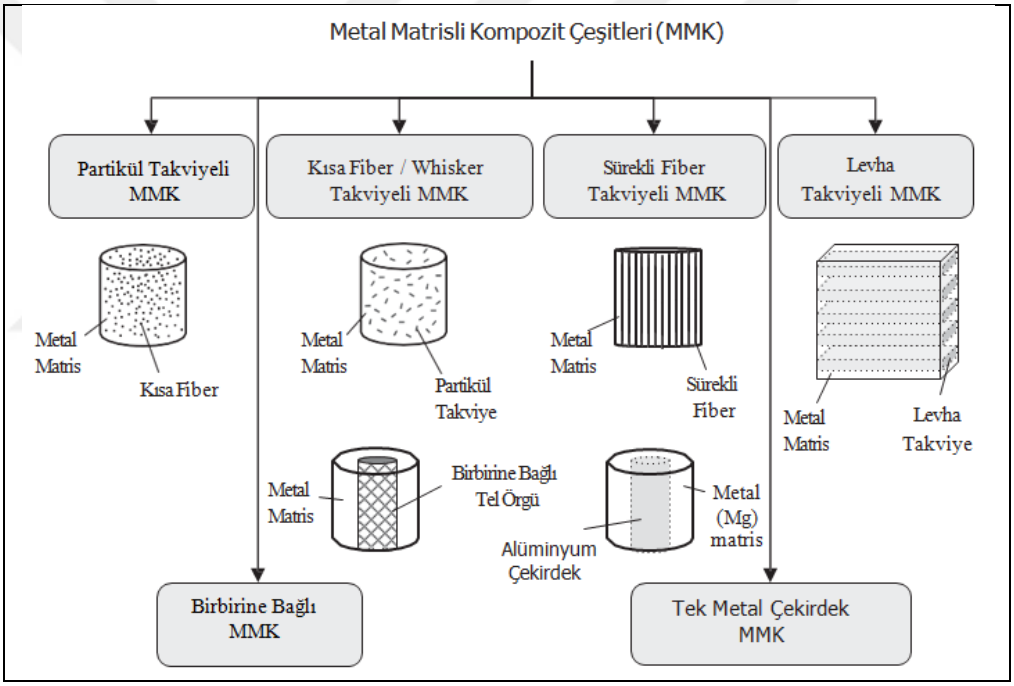
Kompozit malzemeler matris fazı, takviye elemanı ve üretim yöntemine göre sınıflandırılmaktadır. Matris malzemesi belirlendikten sonra en önemli işlem takviye elemanı ve üretim yöntemini belirlemektir (Şekil 3.1) [68]. Magnezyum matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan sınıflandırma işleminde takviye malzemesi olarak partikül, whisker-kısa fiber, uzun fiber ve nano boyutta takviye belirlenmiştir. Üretim yöntemi olarak en çok kullanılan yöntemler arasında döküm, püskürtme ve toz metalurjisi bilinmektedir [69].



Şekil 3.1. Magnezyum matrisli mompozitlerin sınıflandırılması [68]

3.1.1. Takviye malzemesine göre sınıflandırma

Kompozit malzemelerde matris malzemesinin görevi; takviye elemanının malzeme hacmi içindeki dış yükleri almak daha sonrasında dağıtmak için gerekli olan geometrik biçim ve boyutları şekillendirmek, şekillendirdikten sonra bir arada tutmaktır. Takviye malzemesinin görevi ise matris malzemesini dış etkilere karşı korumaktır. Yani takviye malzemesi, matris malzemesinin kullanılan alana göre mekanik veya kimyasal özelliklerini geliştirmelidir [69]. Sınıflandırma işlemi partikül takviyesi, birbirine bağlayan, kısa fiber/whisker, sürekli fiber ve levha olarak 5 kısma ayrılır. Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesine göre sınıflandırma Şekil 3.2'de verilmiştir [68].



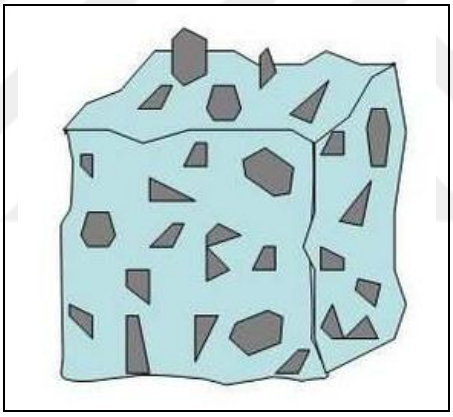
Şekil 3.2. Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanları [68]

Magnezyum matrisli kompozit malzeme son yıllarda üzerine yoğunca çalışılan mühendislik malzemesi olarak bilinmektedir. Takviye malzemesi olarak literatür çalışmalarında;

- Partikül takviyesi
- Sürekli Fiber takviye
- Kısa fiber / Whisker takviyesi
- Nano boyutta takviyesi yapıldığı görülmektedir [70-77].

3.1.1.1. Partikül takviyesi

Partikül takviyeli Mg matrisli kompozitler, partiküllerin homojen olarak dağılma özellikleri nedeniyle tek parça üretilmiş Mg'nin benzer imalat tekniği kullanılarak üretilmektedir. Bu nedenle üretim maliyetleri açısından diğer takviye malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetlidir. Mg matrisindeki partikülleri takviye etmek için, toz metalurjisi ve ergimiş metal yöntemleri olmak üzere iki temel üretim yöntemi kullanılmaktadır. Toz metalurjisinde, partiküller Mg tozları ile karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Homojen karışım sağlamasını etkileyen faktörler takviye büyüklüğü ve matris tozlarının boyutudur. Ergitme üretim yönteminde partikül ile matris malzemesi arasındaki reaksiyon ve takviye partikül boyutu üretim yöntemini etkileyen faktörler arasındadır [78]. Şekil 3.3' te partikül takviyeli kompozit malzeme verilmiştir.

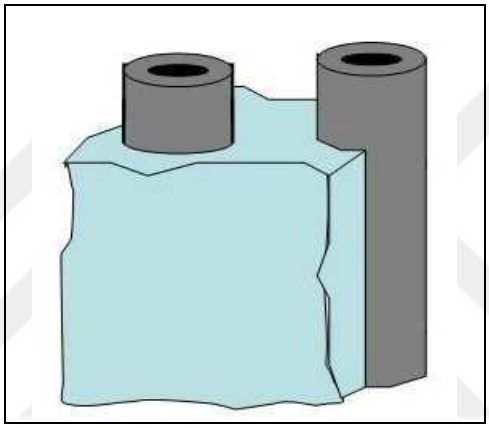


Şekil 3.3. Partikül takviyeli kompozit malzeme [79]

3.1.1.2. Sürekli fiber takviyesi

Partikül takviyesi çeşitliliğine kıyasla, sürekli fiber biçiminde daha az malzeme bulunmaktadır. Ancak endüstride çok daha değişik şekillerde, mekanik özelliklerde malzemeler ve tedarikçiler bulunmaktadır. Genellikle tek filaman veya çoklu filaman olarak adlandırılan fiberler kullanılmaktadır. Bu fiberler 5 ila 25 μm aralığında yüzlerce veya binlerce ince fiber içermektedir. Magnezyum esaslı kompozitler için karbon elyafları Ar-Ge projelerinde ve birkaç endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük yoğunluklu bileşenler ve yüksek karbon fiber mukavemeti geleneksel magnezyum ve alaşımlarına göre MMK malzemeye önemli avantajlar

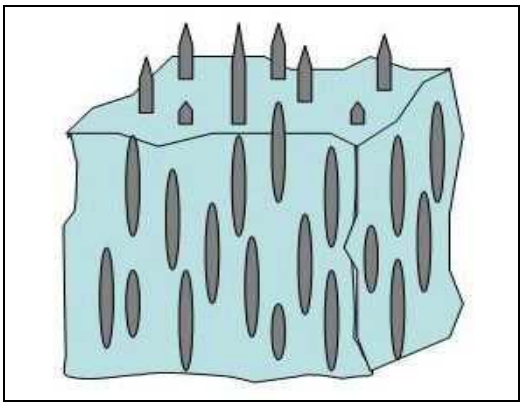
sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlarının bir başka özelliği de düşük Young modülüne sahip olmasıdır. Ancak takviyesiz magnezyum alaşımları kullanırken bir dezavantaj sağlamaktadır. MMK'nin bir parçası olarak magnezyum alaşımları sönümleme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca titreşim ve gürültüyü azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu durum ürünlerin çalışması sırasında fayda sağlamaktadır. Böylece karbon fiber takviyeli magnezyum alaşımlarına dayanan MMK'ler uçak motoru kompresör bıçakları gibi havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan ürünler için gelecekte önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir [69]. Şekil 3.4'te sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme verilmiştir.



Şekil 3.4. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme [79]

3.1.1.3. Kısa fiber ve whisker takviyesi

Kısa fiber ve whisker ticari olarak preform formundadır. Kısa fiberlerin daha fazla yük taşıma ve aktarma kabiliyeti, partikül takviyesine kıyasla daha iyi mekanik özellikler sağlamaktadır. Bazı uygulamalarda bir malzemenin anizotropik özelliği, parçacık takviyeleri kullanılarak elde edilemeyen ancak kısa fiber veya whisker kullanılarak elde edilebilen önemli bir faktördür. Kısa fiber ve whiskerlerin takviye edici ve güçlendirici etkileri ile ilgili olarak sürekli fiber ve partiküllerin arasında yer almaktadır. Uzun fiber takviyesi anizotropik mekanik özelliklere (fiber hizalamasını takiben yüksek mukavemet ve dikey vektörlerde düşük mukavemet) neden olurken, partikül takviyesi izotropik özelliklere yol açar. Kısa fiberlerin kullanılmasıyla takviye edici fiberlerin miktar, tür ve dağılımının belirlenmesinin ardından mekanik özelliklerin ayarlanması mümkündür. Şekil 3.5' te kısa fiber ve whisker takviyeli kompozit malzeme verilmiştir [78,79].



Şekil 3.5. Kısa fiber veya whisker takviyeli kompozit malzeme [79]

3.1.1.4. Nano boyutta takviye malzemesi

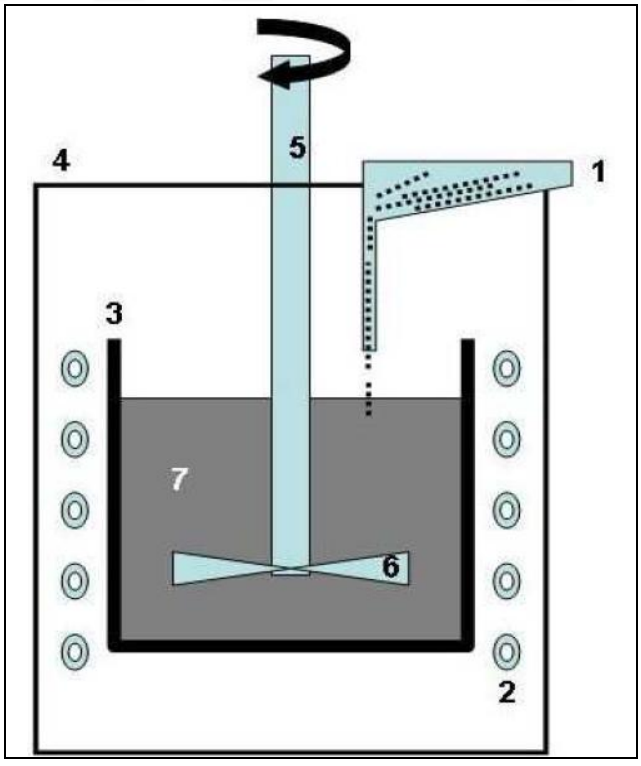
Magnezyum matrisli nano kompozitleri (MMNK), bileşenlerinden birinin magnezyum veya alaşımları diğerlerinin silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), Karbon Nano tüpler vb. Nano boyutlu parçacıklarla takviye edildiği MMK türüdür. Magnezyum Matrisli Nano kompozitlerinin imal edilebildiği çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler katı hal, sıvı hal ve buhar biriktirme yöntemleri olmak üzere 3'e ayrılır. Magnezyum matris nano kompozit üretiminde tercih edilen yöntemler toz metalurjisi yöntemi, döküm ve sprey şekillendirmedir. Magnezyum ve alaşımları; yüksek özgül mukavemete sahip en hafif yapısal metalik malzemeler olduğundan, magnezyum esaslı metal matrisli nano kompozitler (MMNK), tek parça alaşımlara kıyasla büyük ilgi görmektedir [80].

3.1.2. Üretim yöntemine göre sınıflandırma

Magnezyum ve alüminyum esaslı alaşımların ergime sıcaklıkları birbirine yakın olduğu için, magnezyum matrisli kompozit malzemelerin üretimi diğer alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretimine çok benzerdir. Örneğin, magnezyum matrisli kompozitlerde takviye edici fazlar (partikül, fiber, whisker vb.) çoğunlukla farklı döküm yöntemleri ve toz metalurjisi gibi klasik yöntemlerle magnezyum alaşımlarına dahil edilmektedir [81].

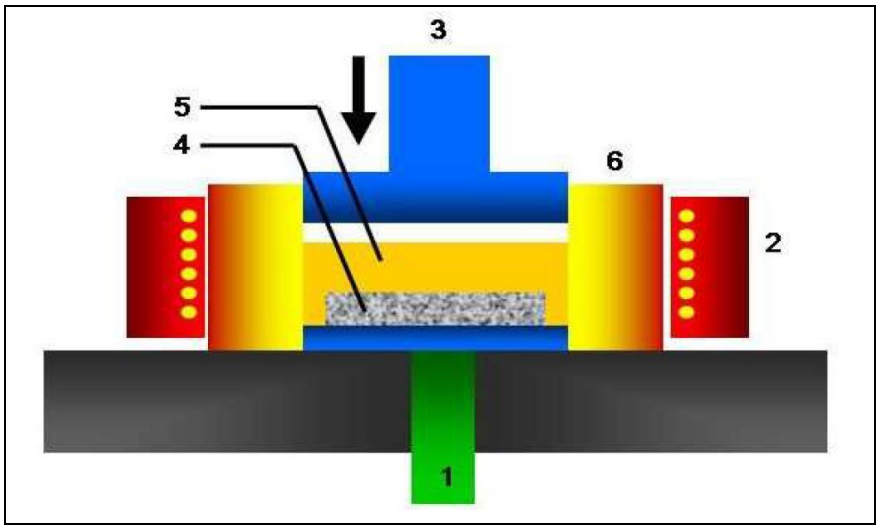
3.1.2.1. Döküm

Metal matrisli kompozitlerin karıştırma döküm ile üretimi 1968'de başlatılmıştır. S. Ray, seramik tozları içeren ergimiş alüminyum alaşımlarına alüminyum ergiyiğini ilave ederek bu yöntemin başlamasını sağlamıştır. Karıştırma döküm yöntemiyle ilgili önemli bir husus, ergitme ve döküm işlemleri sırasında takviye parçacıklarının yüzey oluşturması veya çökelmesinin neden olduğu takviye parçacıklarının ayrılmasıdır. Parçacıkların katı içindeki son dağılımı; parçacıkların ergiyik ile ıslanma durumu, karıştırma mukavemeti, nispi yoğunluk, katılaşma hızı gibi malzeme özelliklerine ve işlem parametrelerine bağlıdır. Karıştırma süresi ve ergime sıcaklığı, bileşenler arasındaki bir ara yüzeyin gelişimini kuvvetle etkiler. Isıtılmış bir pota, karıştırma sırasında sıcaklığını korur. İşlemin bir taslağı Şekil 3.6' da verilmiştir. Takviye (1) ergimiş metale (7) eklenir. Pota (3) bir vakum haznesi (4) içinde bulunmaktadır. Isıtılmış pota (2) içinde pervane döner sayesinde hem yatay hem de dikey bir girdap oluşturulur ve bu da takviyenin parçalanıp homojen olarak dağılmasını sağlar. Hafif bir vakum kullanılması, malzemelerin ergiyik üzerinde gaz tutucu veya gaz sınır tabakası oluşturmasını önlemektedir [79,81].



Şekil 3.6. Karıştırma döküm prosesi [79]

Ergiyik infiltrasyon dökümü veya sıkıştırma döküm yöntemi, fiber takviyeli magnezyum kompozitlerin üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıkıştırma dökümü kavramı, 1800'lü yılların başında endüstride kullanılmaya başlamıştır. Bununla birlikte sıkıştırma döküm uygulaması için ilk olarak 1931'de uygulamaya geçilmiştir. Bu yöntem kullanılarak SiC_w/Mg, SiC_w/AZ9 ve diğer birçok Mg matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Lif içeren prefabrike preformlar ve gerekli partiküller, yüksek sıcaklıkta kararlı bağlayıcılar (silika) ile sıkışmış ardından tanımlanmış bir takviye hacim fraksiyonuna sahiptir. Bu fraksiyon genellikle %10 ile 60 (%-hacimce) arasındadır. Çoğunlukla hacimce %15-25 hacim oranında bir takviye bulunmaktadır. Bu preformların imalat süreci nedeniyle, fiberler genellikle rastgele yönlendirilmemişlerdir. Bunun yerine düzlemsel bir izotropik dağılımı bulunmaktadır. Sıkıştırma döküm sürecinin bir örneği Şekil 3.7' de gösterilmektedir. Isıtılmış preformlar (4) önceden ısıtılmış bir kalıba (6) konulur ve aşırı ısıtılmış ergiyik üzerine dökülmektedir (5). Ergime, hidrolik bir rulo (3) ile preforma sıkıştırılır. Tam sızdırmadan sonra parça basınç altında katılaşır ve bir püskürtücü (1) ile dışarı çıkartılmaktadır. Türbülanslı akış ve basınç altındaki katılaşma sayesinde dökümler gözeneklerden arındırılmış ince taneli mikroyapıya sahip olmaktadır. Dezavantajı infiltrasyonun erken aşamalarında preforma zarar verme ihtimalidir. Bu işlem, tamamen güçlendirilmiş MMK'lerin ve seçici olarak takviyeli alanlara sahip parçaların imal edilmesine olanak tanımaktadır [78,79].



Şekil 3.7. Sıkıştırma döküm prosesi [79]

3.1.2.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme ile şekillendirme yönteminde, ergimiş metal yüksek hızlarda püskürtülerek ince metal bir tabaka oluşmasını sağlar. Bu tabakanın hızlı bir şekilde katılaşması, birleşmesi ve biriken malzemenin sıkılaştırılıp yoğunlaşması ile üretim gerçekleştirilir. Alternatif olarak süreksiz partiküller, metal spreyi ile birlikte enjekte edilir. Partiküllerin havada bulunduğu süre boyunca ya da bir iletken alt-tabakanın üzerinde yüksek enerjili bir darbe ile bir kompozit oluşturmak üzere katı ya da kısmen katı metal damlacıklarında parçacık haline gelme olanağı sağlanır. Malzeme biriktirme oranı 6-10 kg/dak'dır. Püskürtme formlu malzemenin yapısı, aşırı soğutma seviyelerine ve büyüme koşullarına bağlı olarak sıçrama sınırları, porozite, hücresel, dendritik veya eş eksenli bölgelerden oluşmaktadır. Püskürterek şekillendirmede kısa parçacık matrisi etkileşim süreleri; ara yüzeyler arası değişikliklerde ve kararlı kimyasal bağların oluşumuna neden olmak için genellikle yeterlidir. Çalışma süreci parametrelerinin dikkatli kontrolü ile homojen bir dağılım gerçekleştirilir. Tanecik yapısı hem kırılma tokluğunu hem de yorulma mukavemetini etkiler. Bu tür üretimlerin tasvir edilmesinde en iyi bilinen yöntem Osprey prosesidir [81].

3.1.2.3. Toz metalurjisi

Toz metalurjisi (TM) ve infiltrasyon teknikleri MMK'lerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir. Bu iki yöntem geleneksel parça metalurjisi ile üretim içerisinde yer almaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen metal matrisli kompozitler metalik tozu ve seramik parçacıklarını karıştırılması önemi bir tekniktir. Örneğin; seramik içeriğinin tüm yapıda mükemmel bir şekilde kontrol edilip, kullanışlı ve çok yönlü dağılmasının sağlanmasıdır. Kaynak malzemeleri, matrisi oluşturan metalik veya metal-seramik tozları ve çeşitli konfigürasyonların partiküller takviye malzemesidir. Toz metalurjisi üretim yöntemi içerisinde tozların harmanlanması, sıkıştırılması, sinterlenmesi ve ekstrüzyonu bulunmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi esas olarak herhangi bir alaşımın matris olarak kullanılmasına izin verdiği için uygulanabilirlik açısından tercih edilmektedir. Ayrıca herhangi bir takviye malzemesinin uygulanmasına da izin vermektedir. Çünkü katı hal işleme tekniği kullanılarak bileşen arasındaki reaksiyon minimuma indirilebilir. Bunlara ek olarak yüksek hacimli takviye fraksiyonları da mümkündür. Toz metalurjisi

işleminde; magnezyum ve takviye tozları, kontrollü bir atmosfer altında veya vakum altında belirli bir sıcaklıkta karıştırılır, preslenir ve sinterlenir [80,82]. Toz metalurjisi tekniğinin aşağıdaki avantajları vardır [78] :

- Herhangi bir alaşım bir matris malzemesi olarak kullanılabilir,
- Herhangi bir takviye yöntemi kullanılabilir. Çünkü matris ile takviye arasındaki istenmeyen reaksiyonlar katı hal süreçleri kullanılarak kontrol edilebilir,
- Takviye malzemesinin hacminin, genel malzeme hacmine kıyasla daha yüksek hacim oranında birleştirilmesi mümkündür. Yüksek hacimli takviye fraksiyonları modülü en üst düzeye çıkarır ve termal genleşme katsayısı en aza indirilir.
- Döküm yönteminde mümkün olmayan karıştırılamaz matrisi ve takviyeleri karıştırma imkanı sağlamaktadır.

Bununla birlikte, bu yöntemin en büyük zorluğu sürecin karmaşıklığıdır ve seri üretime uygun değildir [78].

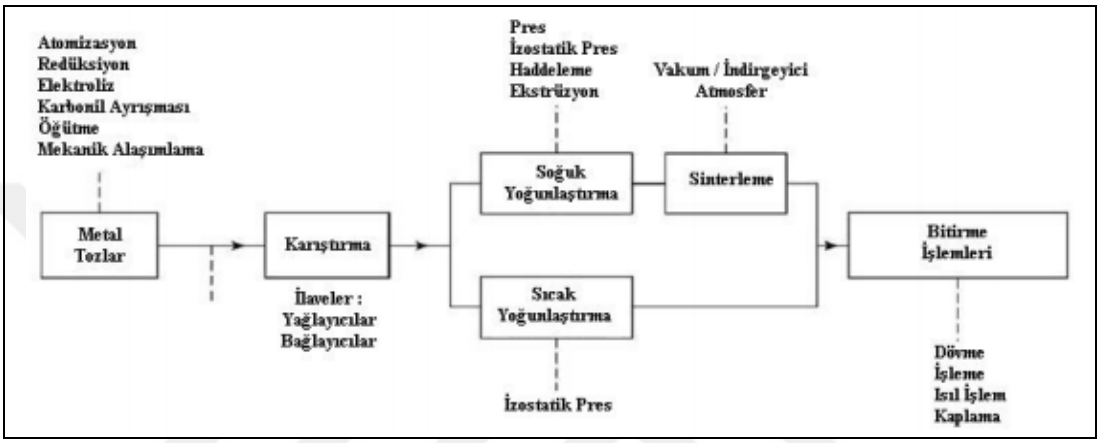
4. TOZ METALURJİSİ

Metal tozlarının preslenerek belirli bir şekle getirilmesi ile üretimi uzun yıllar öncesine dayanmaktadır. Toz metalurjisi eski uygarlıklarda ve tarih öncesi çağlarda sanat için uygulanmıştır. Delhi'deki demir sütunlar, Mısır medeniyetindeki bazı uygulamaları ve İnka'lar tarafından kullanılan kıymetli metal eşyalar toz metalurjisi açısından tarih öncesi kullanım alanlarında en güzel örnekler arasına girmektedir. Modern toz metalurjisi (TM) teknolojisi ise, tungsten karbürlerin üretimi ve rulmanlar için gözenekli bronz burçların seri üretimi ile 1920'lerde başlamıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında birçok kompozit malzeme ve savaş sonrası yıllara gelindiğinde yani 1960'ların başlarına kadar çok çeşitli demir ve demir dışı malzemelerin üretiminde hatırı sayılır derece toz metalurjisi yöntemi gelişme göstermiştir. Belirgin olarak İkinci Dünya Savaşı ve hemen sonrasından itibaren, TM'nin büyümesi, esas olarak ekonomik olarak üretim, benzersiz özellikler ve üretim süreçleri gibi üç potansiyel nedene bağlıdır. Toz metalurjik işlem; tozlardan hem hassas şekilli parçalar hem de hassas oranlarda alaşım malzemesi üretmek için hızlı, ekonomik ve yüksek hacimli bir üretim yöntemidir. Toz metalurjik üretim yöntemi son yıllarda mühendislik malzemelerinin üretimi açısından gelişim göstermiştir. Ayrıca son otuz yılda, toz ile üretilen malzemelerde geleneksel olarak üretilen malzemelere kıyasla hassas mühendislik malzemelerini üretmek için daha fazla tercih edilme sebebi olmuştur [83].

Son yirmi yılda, toz üretim tekniklerinde önemli gelişmeler olmuştur. Üstün özelliklere sahip yeni toz türleri, daha büyük oranda ve daha yüksek mukavemetli malzemelerin üretimine izin vermektedir. Orijinal toz parçacıklarının yapısının kontrolü, nihai sinterlenmiş malzemelerin yapısının daha olumlu sonuçlar vermesini mümkün kılmaktadır. Tamamen yoğun yüksek performanslı alaşımlardan, işlenmesi zor olan ürünlerin toz metalurjisi yöntemi ile işlenmesi sağlanarak daha düzgün mikroyapılar elde edilmektedir. Çok çeşitli özelliklere sahip çok fazlı kompozitler TM tekniği ile ekonomik olarak üretilebilir. Amorf, mikro kristal veya metastabil

alaşımlar gibi malzemeler de TM yöntemleriyle işlenebilmektedir. Son zamanlarda toz metalürjik yöntemi ile daha büyük parçaların üretimine imkan sağlanmaktadır.

Toz metalurjisi ile geleneksel malzemelerden daha fazla mekanik özelliklere sahip malzemeler; yeni alaşım elementleri, iyi ısıl işlemler ve yüksek yoğunluklar elde edilerek geliştirilmiştir. Şekil 4.1' de toz metalurjisi işleminin genel akış şeması gösterilmektedir [84,85].



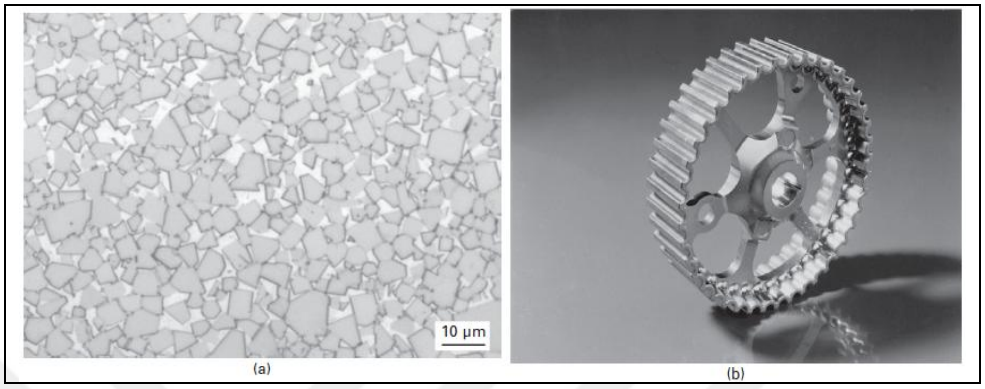
Şekil 4.1. Toz metalurjisi akış şeması [85]

4.1. Toz Metalurjik Yöntemin Avantajları

Toz metalurjisi (TM), klasik ingot metalurjisi yöntemi yerine, tozlardan metalik malzemeler ve bileşenler üreten(bazı durumlarda sanat) teknolojidir. TM ürünleri büyük ölçüde iki ana gruba ayrılabilir. Birinci grup toz metalurjisi malzemeleri içermektedir. İngot metalurjisi ile üretilemeyen kendine has mikroyapısıyla (Şekil 4.2 (a)) WC-Co malzemesinin üretilmesine olanak sağlamaktadır. İkinci grup ise karmaşık şekilli parçaların üretilmesini içermektedir. Burada toz metalurjisi karmaşık biçimli parçaların ekonomik olarak çok sayıda üretilmesini sağlamaktadır. Klasik bir örnek verecek olursak, otomotiv eksantrik mili kayış kasnağıdır (Şekil 4.2 (b)).

Toz metalurjisi yönteminin tercih edilmesinin nedenleri şunlardır: İlk olarak TM'yi destekleyen teknik nedenler vardır, ikincisi ağırlıklı olarak daha ekonomik bir üretim yolunu tercih etmektedir. Tüm TM ürünleri, rekabet edebilmek için ekonomik kriterlere uymak zorundadırlar. Çoğu durumda TM ürününün kendisi rakiplerinden daha pahalıdır ancak performansı daha yüksektir. Maliyet tasarrufları, satın alma maliyetinden daha fazla olmaktadır. Diğer iki nedenin sentezi olan üçüncü bir ürün

grubu olmalıdır. Bu ürün grubu nihai malzeme üretimi veya en azından belirli malzeme parçalarından nihai şekle yakın üretimidir. Toz metalurjisi imalatı, yüksek malzeme kullanımı ve enerji verimliliği olan özellikle pahalı malzemeler için yararlı olan ürünleri elde etmek için uygun bir yöntemdir [86].



Şekil 4.2. Toz metalurjik ürünleri: (a) WC-Co sert metal mikro yapısı (b) eksantrik mili kayış kasnağı [86]

Toz metalurjisi yönteminin avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

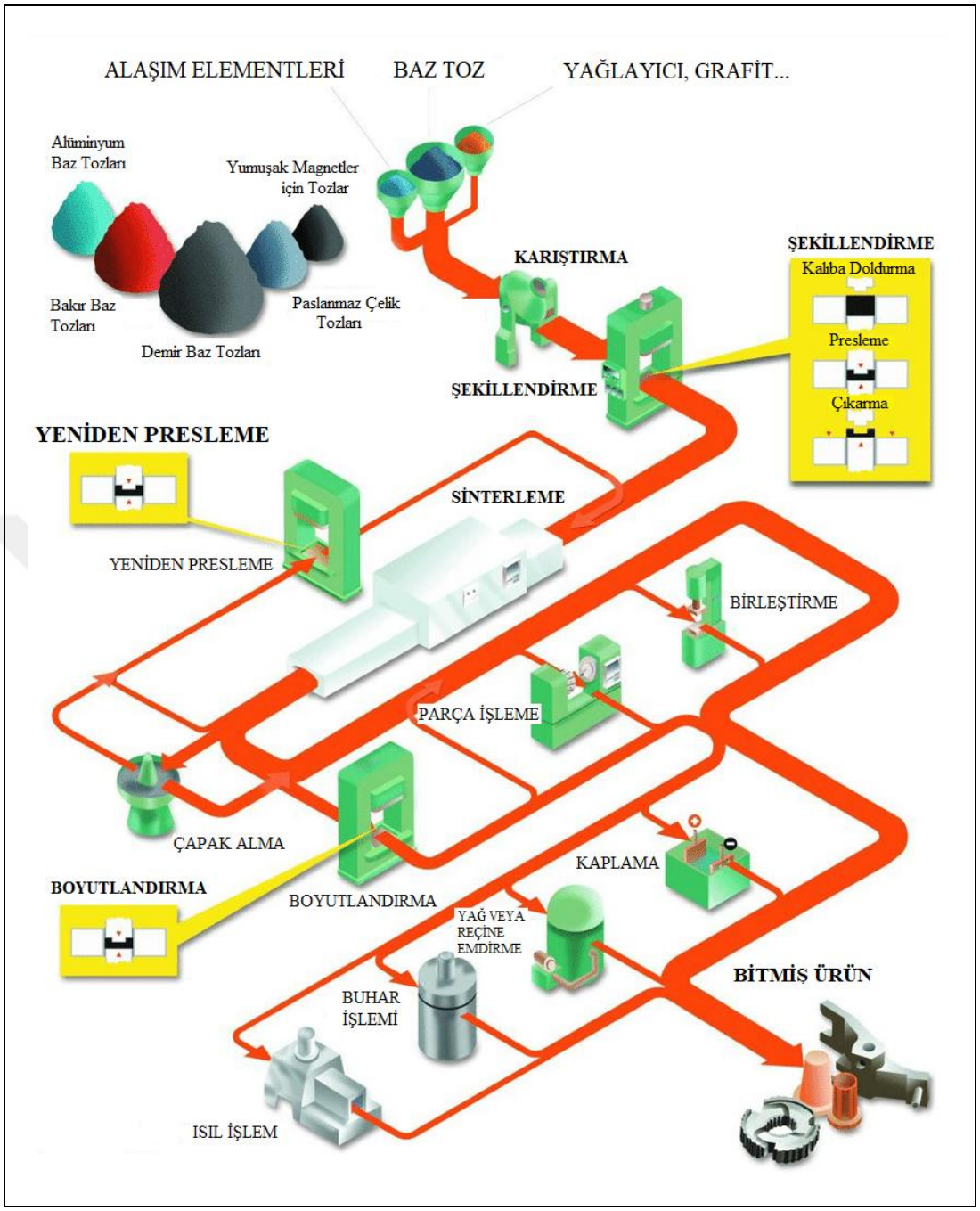
- Yüksek ham madde kullanımı (üretimde çok az malzeme kaybı)
- Yüksek üretim hızları,
- Düşük üretim maliyeti,
- Düzgün yüzey eldesi,
- Tolerans değeri düşük parça üretimi
- Karmaşık şekilli parçaların üretimi
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin üretimi
- Yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi
- Metal matris kompozit ve metal alaşımların üretimi
- Üstün mikro yapısal özelliklere sahip parça üretimi [84,86].

Geçmiş yıllarda, metal matrisli kompozitlerin üretimi için çok miktarda yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında toz metalurjisi (TM) tekniği, kompozitlerin üretiminde bir takım avantajlar sağlamaktadır. Toz metalurjisi düşük üretim sıcaklıklarına ihtiyaç duymaktadır. Takviye malzemelerinin her yerde eşit dağılımı sağlanmaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri ile elde edilmesi güç olan malzemelerin, toz metalurjisi ile üretimi sağlanmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında; magnezyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde

toz metalurjisi üretim yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Toz metalurjisi üretimi literatürde magnezyum matris içerisine eklenen farklı takviye elemanı (B_4C, Ti6Al4V, SiC vb.) ile yapılmaktadır [87-89].

4.2. Toz Metalurjik Üretim Yönteminin Akış Şeması

Toz metalurjisi ile üretim yöntemi, olasılık bakımından çok fazla olduğu bilinmektedir. En temelde ham madde olarak alınan tozlar, kalıptan rahat çıkması açısından yağlayıcı ilavesi ve ham mukavemet sağlamak için bağlayıcı ilavesi ile karıştırılmaktadır. Karışımın ardından parçanın şeklini oluşturmak için pres işlemine tabi tutulur. Pres işleminin ardından ön ısıtma işlemi ile parçanın yapısından yağlayıcı ve bağlayıcı ilaveler uzaklaştırılmaktadır. Sonra sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterlenme esnasında toz partiküller arasında difüzyon meydana gelir. Sinterleme işlemi ile istenilen mikroyapı ve şekil bakımından istenilen görüntünün oluşması beklenmektedir. Sinterleme işleminin ardından gerekirse son yüzey işlemleri yapılır. Sonucunda bitmiş ürün elde edilmektedir. Şekil 4.3'te toz metalurjik üretim yöntemi akış şeması verilmektedir [90,91].



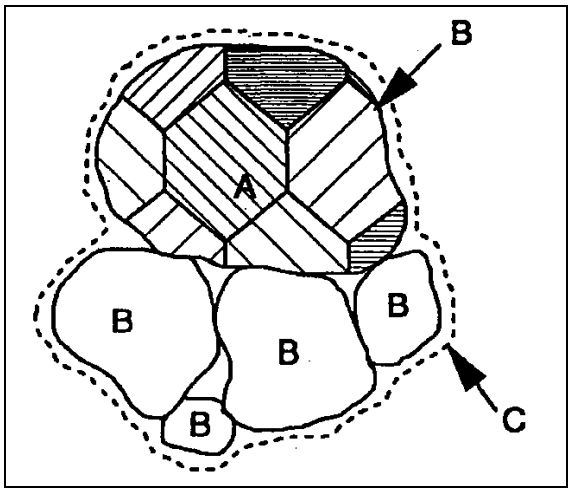
Şekil 4.3. Toz metalurjik üretim yöntemi akış şeması [92]

4.3. Toz Özellikleri ve Nihai Ürüne Etkisi

Başlangıç tozlarının özellikleri (şekil ve boyut) toz metalurjisi ile üretilen nihai parçaların özelliklerini belirlemektedir. Bu nedenle, toz metalurjisi işleminde toz özelliklerinin rolünün doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Ayrıca toz özelliklerini karakterizasyonu için uygun yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Metal ve seramik tozlarında çeşitli dağılım unsurları veya partikülleri ortaya

çıkabilir. Bu elementlerin tanımlanması için ortak toz metalurjisi terminolojisi Şekil 4.4' te verilmiştir. Toz parçacık terimi, tek bir partikülün üretim süreci boyunca doğrudan ayrı parçacıklar halinde oluşturulan birincil parçacıkları ifade etmektedir. Bu toz parçacıkları amorf veya kristal olabilmektedir. Kristalin parçacıklar tek kristallerden veya birkaç kristalden oluşmaktadır. Ayrıca taneden (polikristalin) de oluşabilmektedir. Polikristal tozlar tek veya çok aşamalı elde edilebilir. Toz parçacıkları Şekil 4.4' de gösterildiği gibi ikincil parçacıklar veya aglomera oluşturabilir. Toz metalurjisi işleminde aglomerasyon çoğunlukla istenmeyen bir durumdur. Ancak isteğe bağlı olarak kontrollü bir şekilde üretilebilmektedir. Aglomera diğer parçacıklardan oluşan katı parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, birincil parçacıkların aglomerayı oluşturmasına neden olan çekim kuvvetlerinin doğasından bağımsızdır. Aglomerat terimi, birincil parçacıklar arasındaki zayıf bağ ile sınırlandırılır. Kuvvetli şekilde birbirine yapışmış sert aglomeratlar, agrega olarak tanımlanmaktadır [93]. Şekil 4.4'te verilen;

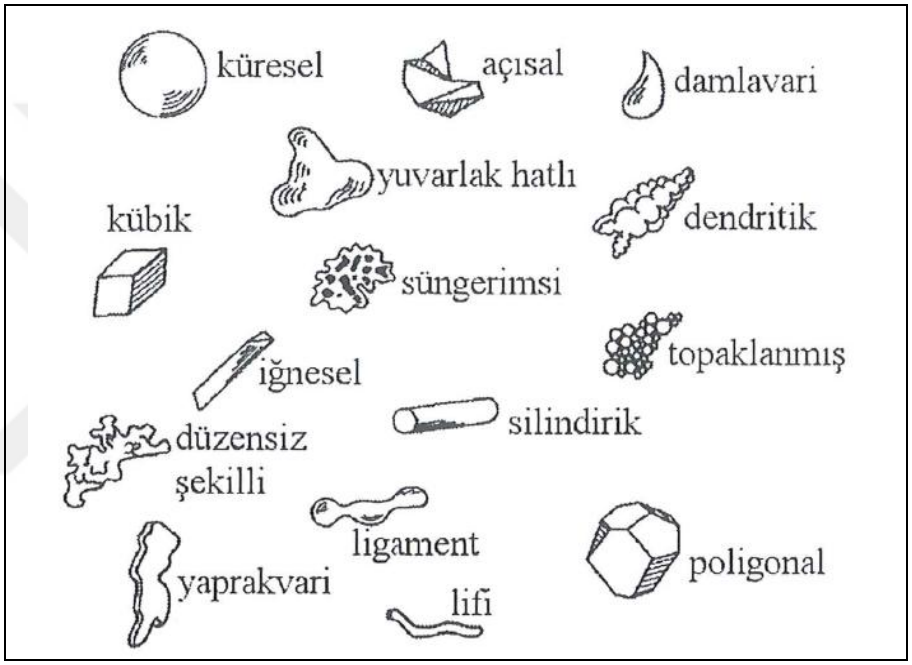
- A: Taneyi
- B: Toz Partikülünü
- C: Aglomerayı tanımlamaktadır.



Şekil 4.4. Tane, toz partikülleri ve aglomeranın terminolojisi [93]

Toz metalurjisinde en önemli parametrelerden bir tanesi de toz partiküllerinin şeklidir. Ulusal ve uluslararası standartlara göre küresel, lifli, dendritik, düzensiz şekilli, süngerimsi, topaklanmış vb. gibi toz parçacık biçiminin basit bir nitel karakterizasyonu yapılmıştır. Şekil 4.5' te bazı tipik örnekleri gösterilmektedir.

Kantitatif karakterizasyon için karakteristik doğrusal, iki veya üç boyutlu parametrelerin (en/boy oranı) ilişkilerini temsil eden şekil faktörleri genellikle uygulanmaktadır. Makro boyutta incelendiğinden tozların şekline bağlı olarak bir akış belirlenebilmektedir. Bu da üretim sırasında tozların kalıbı tam olarak doldurması açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Mikro boyutta bakıldığından tozların şekli üretilen nihai ürünün mikroyapısını etkilemektedir. Bu durum toz partiküllerin şekli için dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi olarak dikkat çekmektedir [90,93].



Şekil 4.5. Toz partikül örnekleri [90]

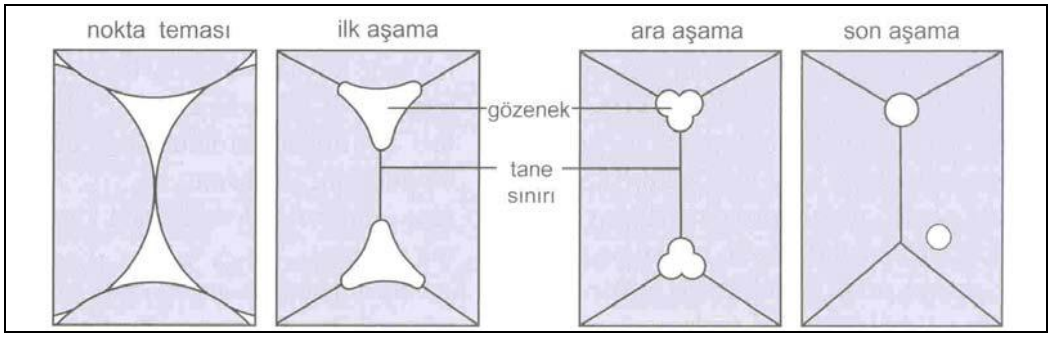
4.4. Sinterleme

Sinterleme, termal enerji uygulayarak metal ve / veya seramik tozlarından yoğunluk kontrollü malzemeler ve bileşenler üretmek için kullanılan bir işleme tekniğidir. Malzeme sentezi ve işleme, son yıllarda malzeme gelişimi için çok önemli hale geldiğinden, bir malzeme işleme teknolojisi olarak sinterlemenin önemi artmaktadır. Aslında sinterleme, tarih öncesi çağlardan beri çanak çömleğin ateşlenmesiyle ortaya çıkan en eski insan teknolojilerinden biridir. Sünger demirden alet üretimi de sinterleme ile sağlanmıştır. Bununla birlikte, 1940'lı yıllardan sonra sinterleme bilimsel olarak incelenmiştir. O zamandan beri sinterleme işleminde dikkate değer gelişmeler yapılmıştır. Modern çağda sinterlemenin en önemli ve yararlı

kullanımlarından biri toz metalurjik parçalar ve yığın seramik bileşenleri de dahil olmak üzere her türlü sinterlenmiş parçaların üretimidir. Genel olarak sinterleme işleminde, sinterleme değişkenlerinin kontrolü, tekrarlanabilir olması ve önceden belirlenmiş mikroyapı ile sinterlenmiş parçalar üretmek amaçlanmaktadır. Mikroyapısal kontrol; tane boyutunun kontrolü, sinterlenmiş yoğunluk ve gözenekler de dâhil olmak üzere diğer fazların boyut ve dağılımı anlamına gelmektedir. Çoğu durumda, mikro-yapısal kontrolün nihai amacı ince bir tane yapısı olan tamamen yoğun bir yapı hazırlamaktır [94].

4.4.1. Geleneksel sinterleme

Sinterleme üzerine bilimsel araştırmalar yapılmış ve sinterleme sırasında toz partiküller arasında meydana gelen değişimler tanımlanmaya çalışılmıştır. 1945 yılında Frenkel adlı bilim insanı tarafından kristal yapıların sıcaklık ve viskozite arasındaki bağlantısı araştırılmıştır. Kuczynskı ise boyun büyümesinin, yüzey oluşmasının ve boşluk konsantrasyonun difüzyon ile gerçekleştiğini göstermiştir. Alexander ve Ballufi yaptıkları deneysel çalışmada boyun büyümesi ve boşluk boyutunun küçülmesinin atomların bir yerden başka bir yere taşınımı ile gerçekleştiğini ispatlamaya çalışmışlardır. Son olarak Rhines sinterleme kademelerinin üç adımda açıklanabileceğini ileri sürmüştür [95]. Sinterleme kademeleri sırasında meydana gelen değişimler Tablo 4.1' de verilmiştir. Şekil 4.6' da sinterleme sırasında porozitede meydana gelen değişimler verilmiştir [96]. Şekil 4.7' de sinterleme süresi boyunca yoğunlukta meydana gelen değişim gösterilmektedir [95].

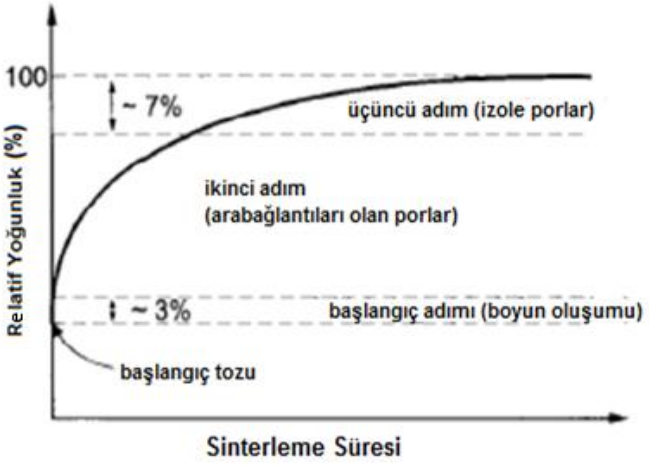


Şekil 4.6. Sinterleme sırasında porozitede meydana gelen değişimler [95]

- İlk aşamada, partiküllerin hareketi ile taneler arasındaki temas noktaları artar ve bu şekilde taneler arasında boyun oluşumu başlamaktadır. Yüzey enerjisi yüksek olduğundan bu bölgelerde malzeme difüzyonu daha rahat şekilde gerçekleşmektedir [96].
- İkinci aşamada, difüzyon boyun bölgelerine doğru devam etmektedir ve toz partikülleri arasındaki boşluklar, birbirleri arasındaki bağlantılar ve kesitler küçülmeye başlamaktadır. İkinci adımın sonunda bu yolların kendi aralarındaki bağlantılar kesilmektedir.
- Sinterlemenin üçüncü yani son aşamasında birbirinden bağımsız küçük poroziteler gittikçe küçülür ve yuvarlaklaşır. İyi bir sinterleme sonucunda bu boşluklar tamamen kaybolabilmektedir [95].

Tablo 4.1. Sinterleme kademeleri sırasında meydana gelen değişimler [96]

Sinterleme Kademeleri	Meydana gelen değişimler
1. Kademe (Başlangıç Kademesi)	Partiküllerin yeniden düzenlenmesi
	Partiküller arası boyun oluşumu
2. Kademe (Ara Kademe)	Boyun bölgesinin gelişimi
	Tane büyümesi
	Yüksek oranda çekilme
	Devamlı porozitelerin oluşumu
3. Kademe (Son Kademe)	Tane büyümesinin devam etmesi
	Devamsız porozitelerin oluşumu
	Tane sınırı porozitelerin eliminasyonu



Şekil 4.7. Sinterleme süresi boyunca yoğunlukta meydana gelen değişim [95]

4.4.2. Basınç destekli sinterleme

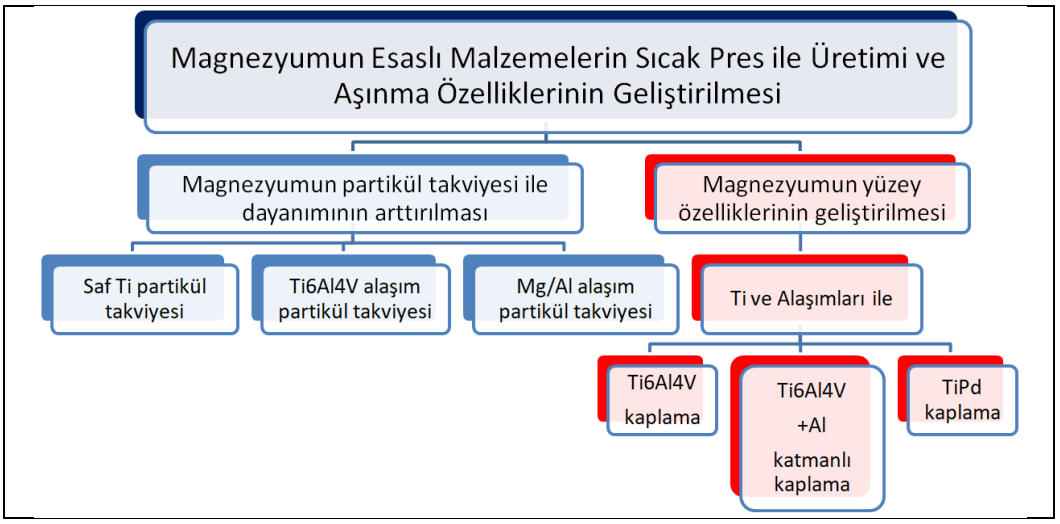
Sıcak pres, zayıf sinterleme davranışına sahip malzemelerin yoğunlaştırılması için uygun bir yöntemdir. Toz presleme ve sinterlemeyi tek bir proseste birleştiren bu teknik, geleneksel toz sinterleme işlemine göre birçok avantaj sağlamaktadır. Sıcaklık ve basıncın eşzamanlı uygulanmasıyla, çok çeşitli işlenecek malzemelerde teorik yoğunluğa yakın bir yoğunluk elde etmek mümkündür. Metal partiküllerin plastik deformasyona olan direncinin sıcaklık artışıyla birlikte hızla azaldığından, sıcak presleme ile sinterleme için daha düşük basınç altında yapmak gerekir. Ayrıca sıcak presleme ile yoğunlaştırma, toz karakteristiklerine nispeten daha az hassastır. Sıcak presleme parametreleri olan basınç, sıcaklık, zaman ve çalışma atmosferi malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Yüksek hız takım çelikleri, süper alaşımlar, berilyum ve refrakter metaller özellikle sıcak presle üretim işlemine uygundur. Sıcak presleme, sinterleme sıcaklığında yeterli atomik hareketliliğin olmayışı nedeniyle sinterlenmesi zor olan saf karbürler, nitritler ve boritler gibi yoğun ince taneli şekiller üretmenin tek yoludur [84].

Sıcak presleme prosedüründe yer alan çeşitli adımlar şunlardır;

- Toz veya soğuk sıkıştırılmış preform kalıp cihazın içine yerleştirilmesi,
- Kalıbın dirençle veya indüksiyon yöntemi ile önceden belirlenmiş bir sıcaklığa ısıtılması,
- Kalıp boşluğundaki toza basınç uygulanması,
- Sıkıştırma sırasında gerekli maksimum sıcaklığa ulaşılana kadar sıcaklığın sürekli olarak artırılması,
- Sıkıştırma basıncının ve sıcaklığın bekleme süresi boyunca korunması,
- Kalıbın yavaş bir şekilde basınç altında malzemenin oksitlenmeyeceği bir sıcaklığa soğutulmasıdır [84].

5. MALZEME VE YÖNTEM

Tez kapsamında ilk olarak Saf Mg tozları içerisine ayrı ayrı saf Ti, Ti6Al4V ve $Mg_{50}Al_{50}$ ön alaşımlı tozları ilave edilerek magnezyumun dayanımının arttırılması üzerinde durulmuştur. Dayanım artışı için seçilen malzeme gruplarının magnezyum içinde çözünürlüğü önemli bir etkendir. Titanyumun magnezyum içerisinde çözünürlüğü nerdeyse yoktur. Fakat alüminyum ve vanadyum içeren Ti6Al4V alaşımının da bir alternatif olarak ilave edilmesi bu çözünürlük kavramının çözümüne yönelik bir yaklaşımın bir sonucudur. Biraz daha bakış açısının geliştirilmesi açısından Mg/Al alaşımı da saf magnezyuma ilave edilmiştir. Dolayısıyla çözünürlüğün olmadığı, sınırlı olduğu ve yüksek olduğu bir sistem üzerinden yola çıkılarak magnezyumun bu ilavelerle toz metalurjik prosesleri kullanarak üretimi ve özelliklerinde meydana gelen değişimler üzerinde durulmuştur. Belli bir seviye dayanımın arttırılmasını takiben yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla iki farklı titanyum alaşımı ile magnezyum altlık malzeme kaplanmıştır. Kaplama malzemeleri için döküm ürünü çubuklar kullanılmıştır. Tüm üretim süreçleri ve özelliklerde meydana gelen değişimler aşağıda sunulmuştur. Tez kapsamında takip edilen sürecin şematik görüntüsü Şekil 5.1' de verilmiştir.

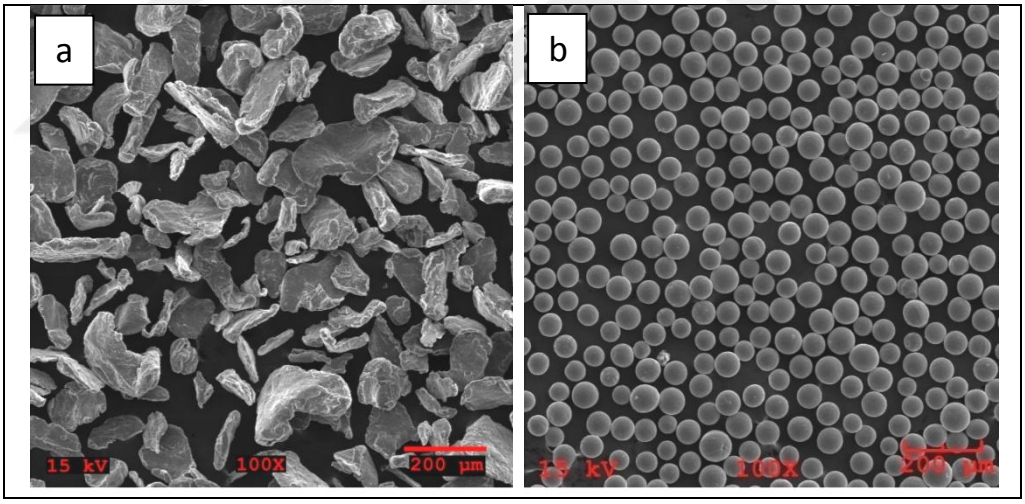


Şekil 5.1. Tez kapsamında takip edilen akış şeması

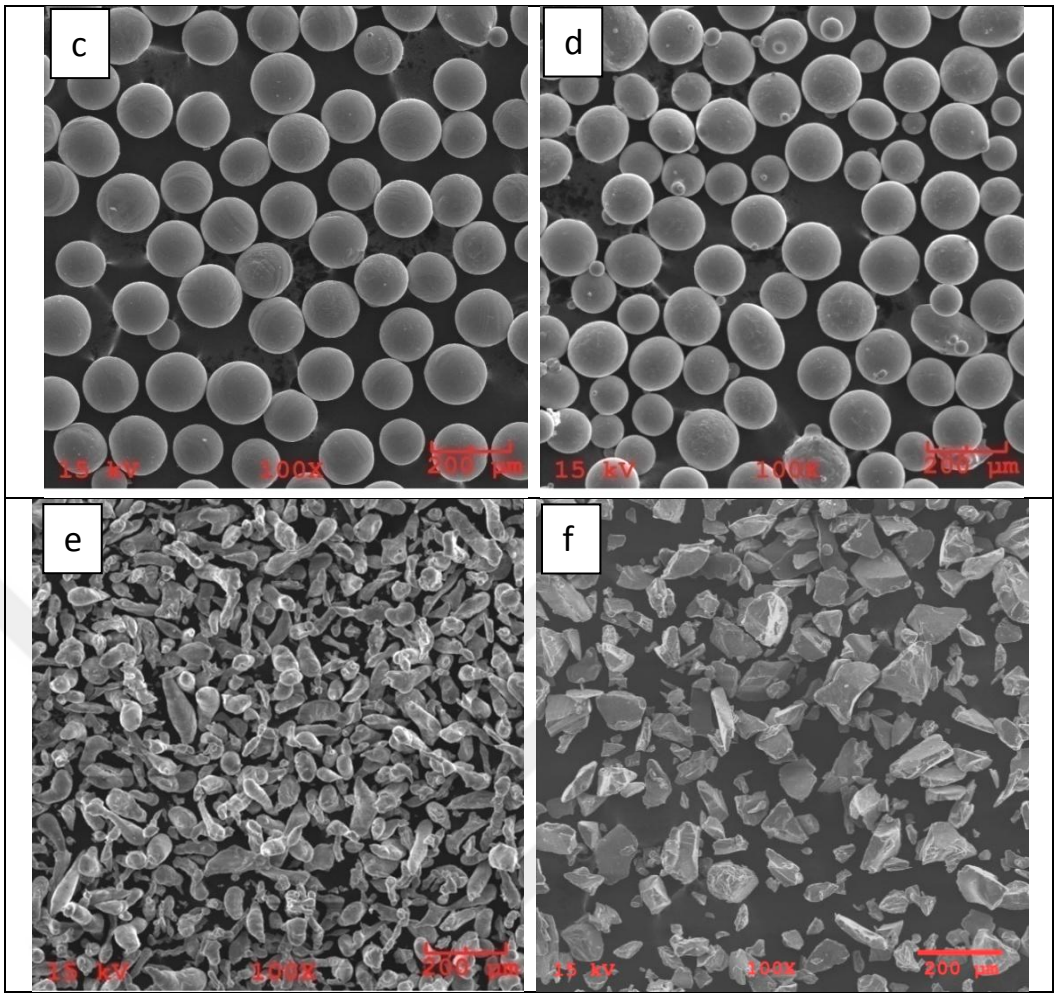
5.1. Saf Magnezyumun Dayanımının Arttırılması

5.1.1. Çalışmada kullanılan malzemeler

Saf magnezyumun dayanımın arttırılması amacıyla toz formunda ilaveler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan ticari saflıktaki magnezyum tozları ve MG50Al50 ön alaşımlı tozları Tekirdağ'da bulunan MME Magnezyum ve Metal Tozları Endüstri ve Ticaret A.Ş'den, titanyum tozları Çin'de bulunan Baoji RuiHong Metal Materials Co. Ltd. Şti.'den, kaplama malzemesi olarak kullanılan titanyum plakalar Kocaeli'de bulunan Timet Titanyum Metal Medikal firmasından ve son olarak ara yüzey olarak kullanılan alüminyum tozları ise Kocaeli'de bulunan Gürel Makine A. Ş.'nde temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bu tozların taramalı elektron mikroskobunda çekilen görüntüleri Şekil 5.2' de verilmiştir. Magnezyum ve alüminyum tozları karmaşık şekilli fakat yuvarlak hatlı morfolojiye sahipken titanyum tozları küresel bir morfolojiye sahiptirler.

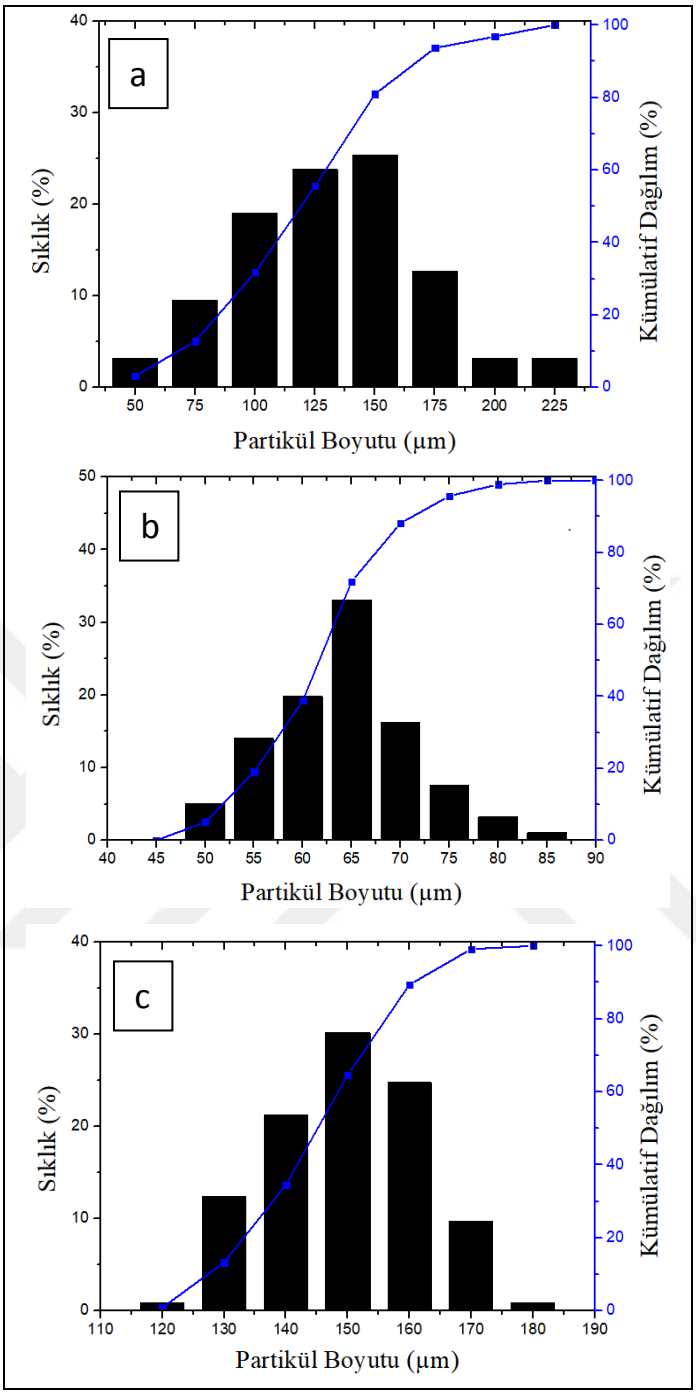


Şekil 5.2. Tez kapsamında malzeme üretimleri için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri, (a) Mg tozu (~175 µm), (b) Ti tozu (~ 60 µm, ince), (c) Ti tozu (~145 µm, kaba), d) Ti6Al4V tozu (~140 µm), (e) Al tozu (~75 µm), (f) MgAl tozu (~60 µm)

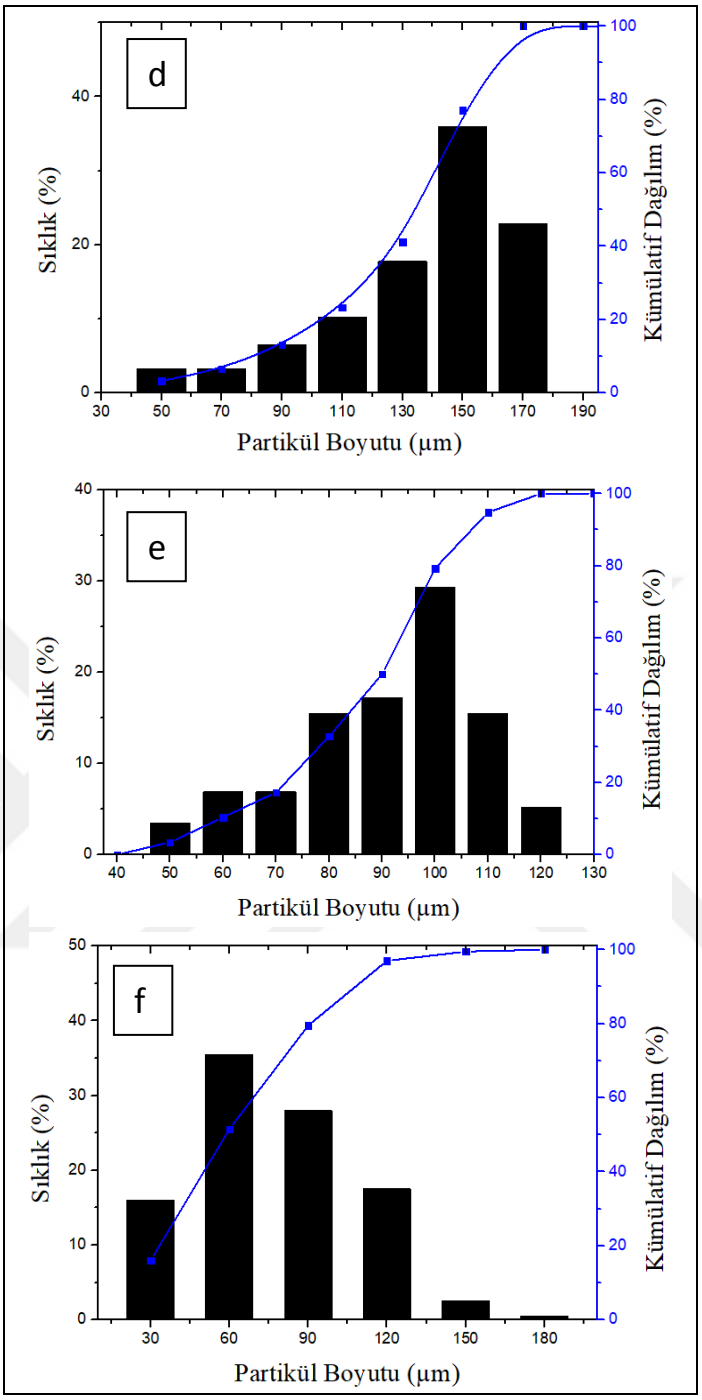


Şekil 5.2. (Devam) Tez kapsamında malzeme üretimleri için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri, (a) Mg tozu (~175 µm), (b) Ti tozu (~ 60 µm, ince), (c) Ti tozu (~145 µm, kaba), d) Ti6Al4V tozu (~140 µm), (e) Al tozu (~75 µm), (f) MgAl tozu (~60 µm)

Magnezyumun dayanımının arttırılması için ilave edilen tozların boyut dağılımları taramalı mikroskop ile çekilen görüntüler üzerinden yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Elde edilen boyut dağılımları Şekil 5.3' de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında titanyumun dayanıma etkisinin belirlenmesi sürecinde iki farklı toz boyutu kullanılmıştır. Boyut farklıkları üzerinden sonuçlar değerlendirilmiştir. Titanyum tozlarının boyutları farklı olacak şekilde seçilmiştir. Boyut dağılım diyagramları incelendiğinde tüm toz grupların geniş bir boyut dağılımı aralığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Çalışmada kullanılan tozların boyut dağılımları a) saf magnezyum, (b) saf titanyum (ince partikül boyutlu), (c) saf titanyum (kaba partikül boyutlu), (d) Ti6Al4V, (e) saf alüminyum tozu, (f) Mg50Al50 tozu

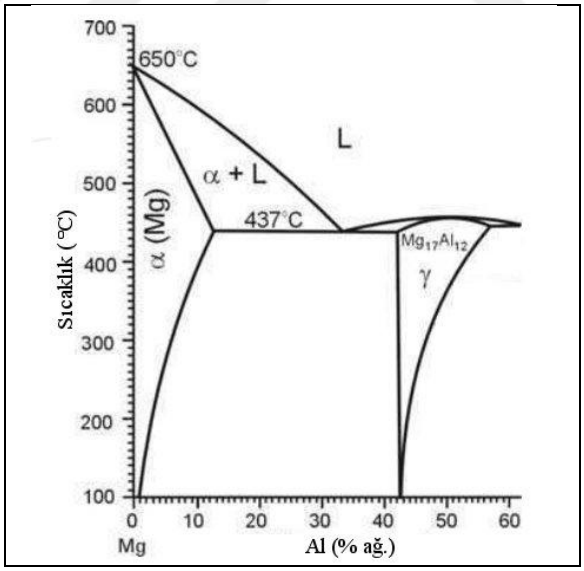


Şekil 5.3. (Devam) Çalışmada kullanılan tozların boyut dağılımları a) saf magnezyum, (b) saf titanyum (ince partikül boyutlu), (c) saf titanyum (kaba partikül boyutlu), (d) Ti6Al4V, (e) saf alüminyum tozu, (f) Mg50Al50 tozu

5.1.2. Tozların karıştırılması işlemi

Saf Mg tozları içerisine sırasıyla % 5, 10 ve 15 oranlarında (ağırlıkça) saf Ti (ince, 60 µm), saf Ti (kaba, 145 µm) ve Ti6Al4V tozları (140 µm); $Mg_{50}Al_{50}$ ön alaşımlı

tozu ise (% ağırlıkça) 5, 15, 25 oranlarında ilave edilmiş ve ardından karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Aşınma testleri sonrasında aşınma oranlarındaki değişimler arasında daha kapsamlı karşılaştırma yapılabilmesi açısından 145 µm boyutundaki Ti tozları içeren karışımlar %1 ve %2.5 oranları da eklenerek gerçekleştirilmiştir. $Mg_{50}Al_{50}$ ön alaşımlı tozu saf magnezyuma yapıdaki tüm Al oranı ağırlıkça %5, 10 ve 15 olacak şekilde ilave edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken başka bir nokta ise yapının sahip olduğu toplam Al oranına tekabül eden Mg-Al ön alaşımlı partikül takviye oranın farklı olmasıdır. Dolayısıyla verilen 5-10-15 bileşim değerleri yapıdaki toplam Al içeriği olup, bu oranın sağlanması için ilave edilen M50Al50 partikül takviye oranı ise %12, 30 ve 50 olacak şekilde saf magnezyuma ilave edilmiştir. 50-50 MgAl bileşimi $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğidir. Bu bileşimin ergime sıcaklığı 458 °C'dir. Mg-Al alaşımları aluminyumun magnezyum içerisindeki bir katı çözeltisi (α, hsp) ve γ fazı üzerinden karakterize edilir. Şekil 5.4 Mg-Al faz diyagramını göstermektedir [97]. β fazı olarak da adlandırılan Mg fazının elastik modül değeri 80 GPa ile saf magnezyumun 45 GPa dır. Tablo 5.1' de üretilen numuneler kompozisyonları ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Mg-Al faz diyagramında $Mg_{17}Al_{12}$ bileşiminin gösterimi [97]

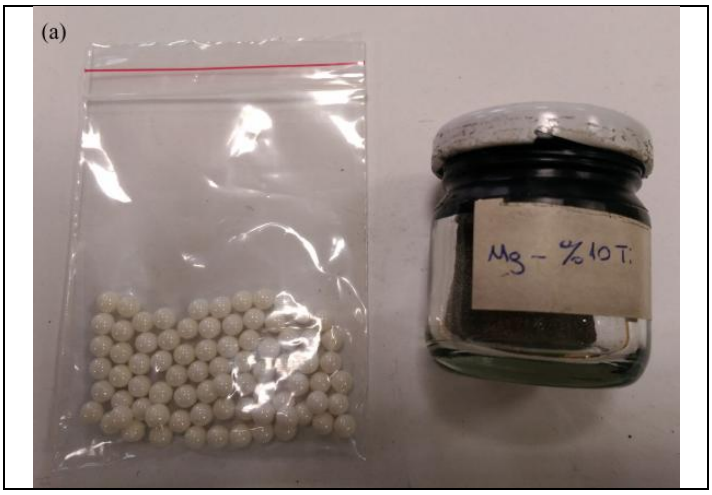
Tablo 5.1. Tez kapsamında kullanılan bileşimler

Numunelere verilen kodlar	Kompozisyon
MTi 1	Mg-1%Ti (145 µm)
MTi 2,5	Mg-2,5%Ti (145 µm)

Tablo 5.1. (Devam) Tez kapsamında kullanılan bileşimler

MTi 5	Mg-5%Ti (145 µm)
MTi 10	Mg-10%Ti (145 µm)
MTi 15	Mg-15%Ti (145 µm)
MT 5	Mg-5%Ti (60 µm)
MT 10	Mg-10%Ti (60µm)
MT 15	Mg-15%Ti (60 µm)
MTA 5	Mg-5%Ti6Al4V (140 µm)
MTA 10	Mg-10%Ti6Al4V (140 µm)
MTA 15	Mg-15%Ti6Al4V (140µm)
MgAl 5	Mg-5%Al %12 Mg50Al50
MgAl 15	Mg-15%Al %30 Mg50Al50
MgAl 25	Mg-25%Al %50 Mg50Al50

Tablo 5.1'deki bileşimler cam bir kavanoz içerisinde (Şekil 5.5. (a)) karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Kavanoz hacminin %50'sini kaplayacak şekilde 3 mm çapında zirkonya bilyeler ve % 25'ini kaplayacak şekilde toz karışımları kavanoz içerisine eklenmiştir. Karıştırma işlemi 200 rpm'de 5 dakika süre ile yapılmış olup MSE-TEC marka bilyeli değirmen kullanılmıştır (Şekil 5.5b). Her bir bileşim için aynı karıştırma parametreleri uygulanmıştır.



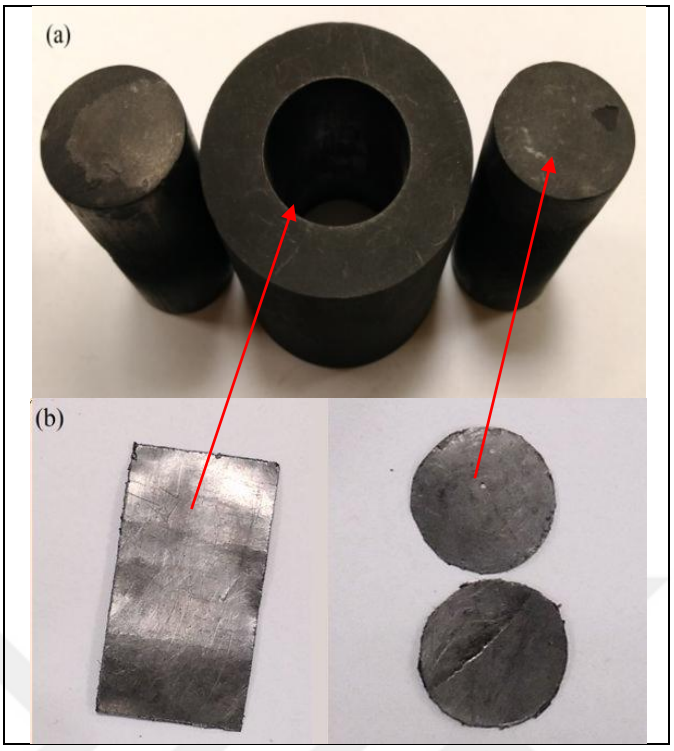
Şekil 5.5. (a) Zirkonya bilye, cam kavanoz ve (b) MSE-TEC marka bilyeli değirmen



Şekil 5.5. (Devam) (a) Zirkonya bilye, cam kavanoz ve (b) MSE-TEC marka bilyeli değirmen

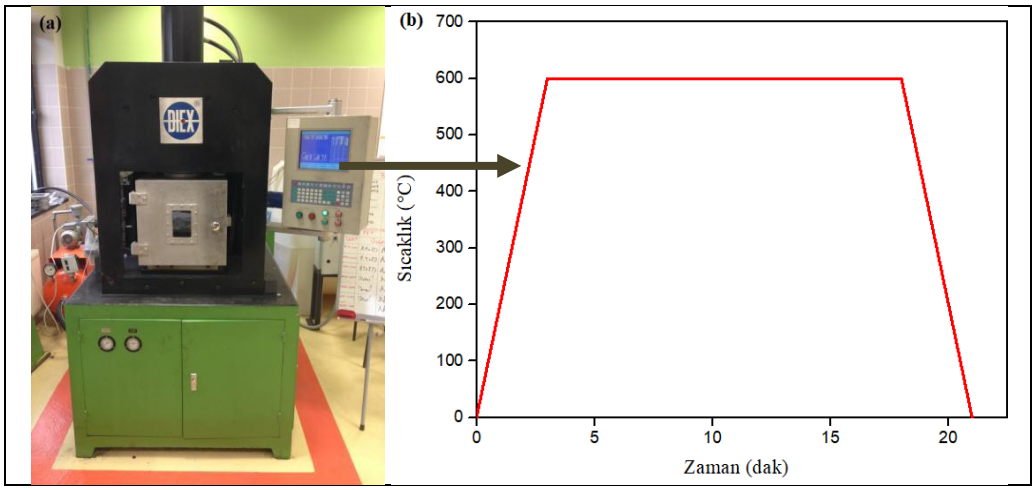
5.1.3. Toz karışımlarının sinterlenmesi

Tez kapsamında malzemelerin üretimi için toz metalurjik sıcak pres yöntemi kullanılmıştır. Sıcak pres yönteminde grafik kalıp tercih edilmektedir. Grafit kalıp sahip olduğu yüksek elektrik ve ısıl iletkenliğinin yanında kendinden yağlayıcılık özelliklerine de sahip olduğundan basınç destekli sinterleme tekniklerinin birçoğunda sıklıkla kullanılmaktadır. Her ne kadar grafit doğal yağlayıcılık özelliğine sahip olsa da çalışma sırasında kalıp ile malzeme arasında etkileşim nedeniyle oluşabilecek reaksiyonların önlenmesi ve bu doğrultuda hem numunenin şeklinin korunması hem de grafit kalıbın ömrünün arttırılması amacıyla grafit gövde içerisine, alt ve üst zımbalar yüzeylerine yine grafitten yapılmış kağıt eklenmiştir. Çalışmada kullanılan grafit kalıp ve grafit kağıtların görüntüsü Şekil 5.6' da verilmiştir. Grafit kalıbın iç çapı 20 mm olarak seçilmiştir. Elde edilen numunelerin yüksekliği ise kalıba konulan toz miktarı ile rahatça kontrol edilebilmektedir ve çalışmamızda 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Grafit kâğıdın kalınlığı ise 0,20 mm'dir.



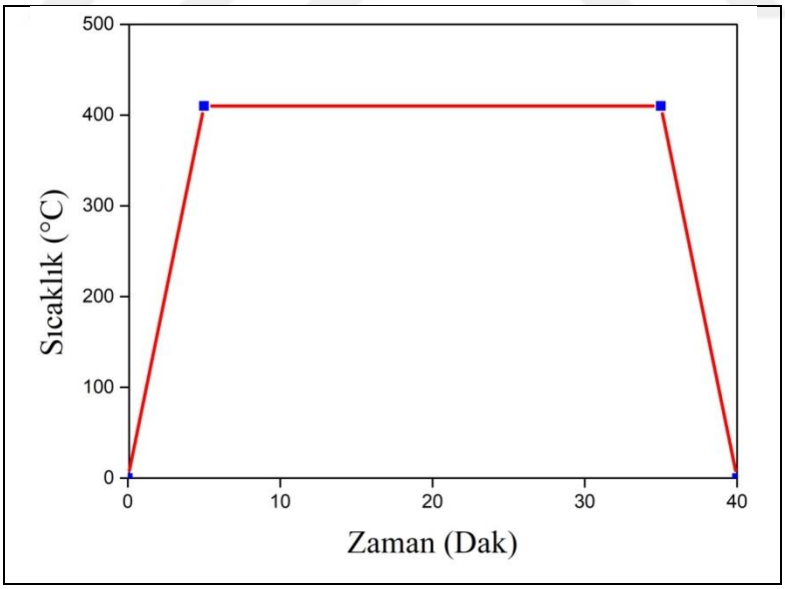
Şekil 5.6. Kullanılan grafit kalıp (a) ve grafit kağıtlar (b)

Tüm farklı bileşime sahip magnezyum esaslı numunelerin ve kaplamaların üretimi Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan DIEX marka (Şekil 5.7(a)) sıcak pres cihazında gerçekleştirilmiştir. Magnezyumun oksijene olan yüksek afinitesi nedeniyle sinterleme işlemi vakum (10^{-4} mbar) atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Seçilen kompozisyonlara göre farklı sinterleme çevrimleri kullanılmıştır. Saf Mg içerisine ilave edilen farklı boyutlardaki saf Ti ve Ti6Al4V içeren kompozisyonlar sıcak pres ile Şekil 5.7b'de görüldüğü gibi 600°C'de 15 dak. süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada uygulanan basınç 45 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. (a) DIEX sıcak pres cihazı ve (b) sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği

Saf magnezyuma ilave edilen Mg50Al50 ön alaşımlı toz partikülleri ile hazırlanan karışım ise Şekil 5.8' de görüldüğü gibi 410℃'de 30 dak. sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme sıcaklığının 410°C seçilmesinin sebebi Mg-Al arasında oluşan ötektik bileşimin sıcaklığının dikkate alınmasıdır. Bu sinterleme çevrimi boyunca 25MPa basınç uygulanmıştır.



Şekil 5.8. Mg50Al50 alaşımı içeren magnezyumun sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği

5.2. Kaplama Aşaması

5.2.1. Çalışmada kullanılan kaplama malzemeleri

Saf magnezyumun dayanımının partikül takviyesi ile arttırılmasına yönelik çalışmaları takiben magnezyumun yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yapılacak kaplamalar için titanyum plakalar hazırlanmıştır. Silindir halde bulunan Ti6Al4V malzemesi ile levha halde bulunan Ti0.2Pd alaşımlı malzeme kesilme işlemine tabi tutulmuştur. Dairesel numuneler torna ile 0,5 mm kalınlığında ve 20 mm çapında olacak şekilde (Şekil 5.9) pul formunda kesilmiştir.



Şekil 5.9. Kaplama amacıyla hazırlanan titanyum alaşımları

Levha halinde olan Ti-Pd malzemesi freze makinesinde kalınlığı 0,5 mm kadar inceltildikten sonra LAZER MAKİNA ltd. Şti. firmasında dairesel pul şeklinde işlenmiştir. İşlem Kesit Water-Jet TK-TRUMP50-G3015DY marka su jeti cihazı (Şekil 5.10. (a)) ile yapılmıştır. Su jetinin çalışmasında kesici özelliğe sahip (abrasif) kum ve 3000 bar basınçta su kullanılmıştır.

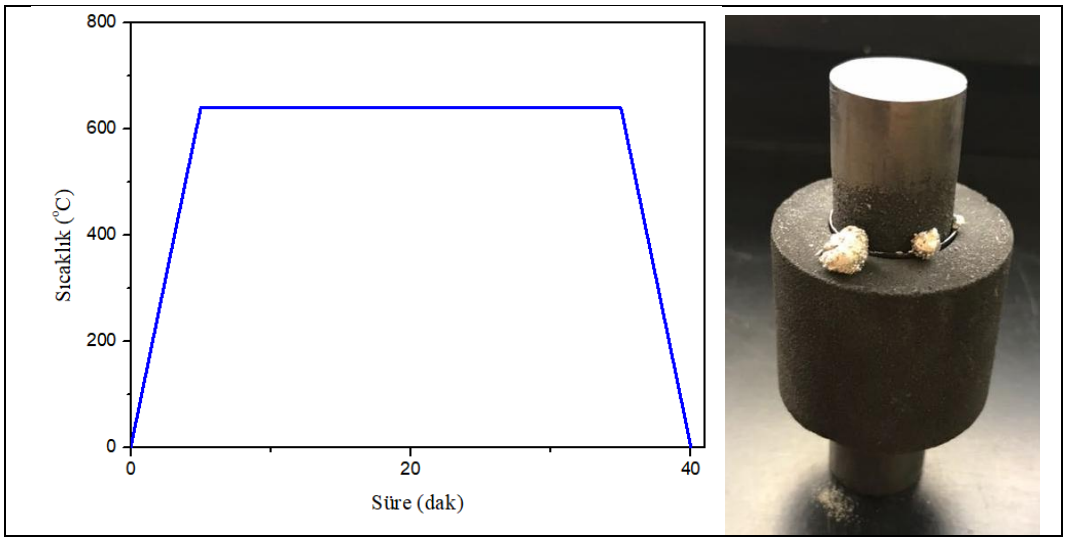


Şekil 5.10. (a) Water-Jet TK-TRUMP50-G3015DY marka su jeti cihazı (b) Kesim esnasındaki görüntüsü

5.2.2. Sıcak pres kaplama işlemlerinin gerçekleştirilmesi

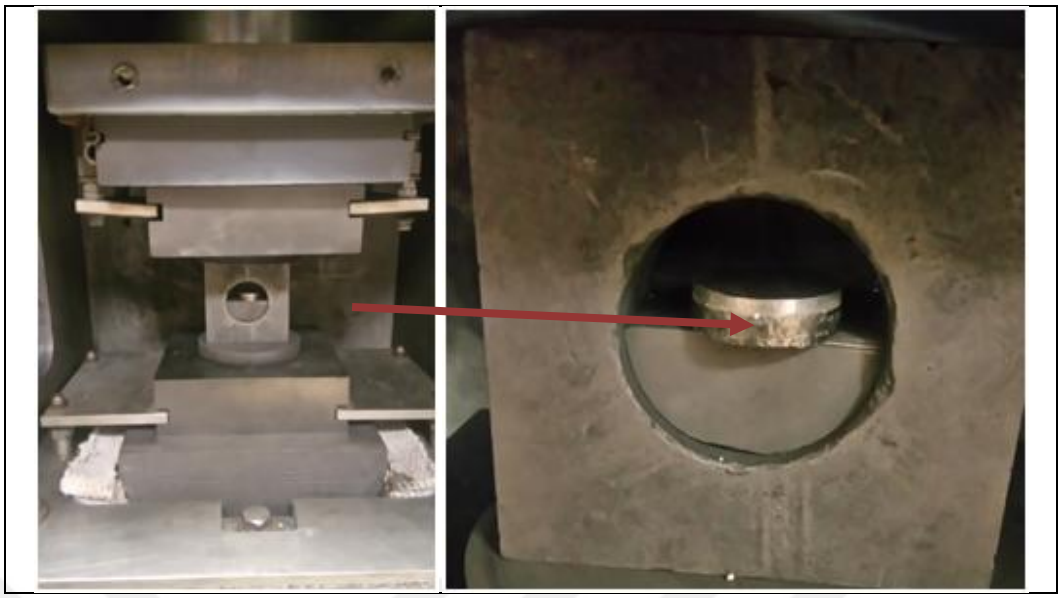
Yukarıda açıklandığı şekilde hazırlanan pul şeklindeki kaplama malzemeleri yine sıcak pres ile magnezyum üzerinde kaplanmıştır. Üç farklı süreç takip edilmiş, üretim parametreleri aşağıda verilmiştir. İlk olarak Ti6Al4V alaşımı ile Mg tozların kaplanmış, daha sonra Ti0.2Pd alaşımı ile yine Mg tozları kaplanmış, nihayetinde magnezyum ile titanyum arasına bağlantı özelliklerinin geliştirilmesine yönelik alüminyum ara katman ilave edilerek kaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Magnezyum, alüminyum ve titanyum katmanlı numune üretimi işleminde ilk adım olarak pul şeklindeki Ti6Al4V numunenin altına alüminyum tozu eklenerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi, sırasında 5 dakika ısıtma süresi ile oda sıcaklığından 640'ye çıkılmıştır. 640'de 30 dak. bekleme süresinin ardından 5 dak. soğutma ile birlikte tüm proses 40 dakikada tamamlanmıştır. Şekil 5.11'de sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık zaman grafiği verilmiştir. Tüm kaplama işlemi süresince 45 MPa basınç uygulanmıştır.



Şekil 5.11. (a) Ti-Al katmanlı üretim için sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafiği (b) basınç altında kalıp dışına taşan ergimiş metal

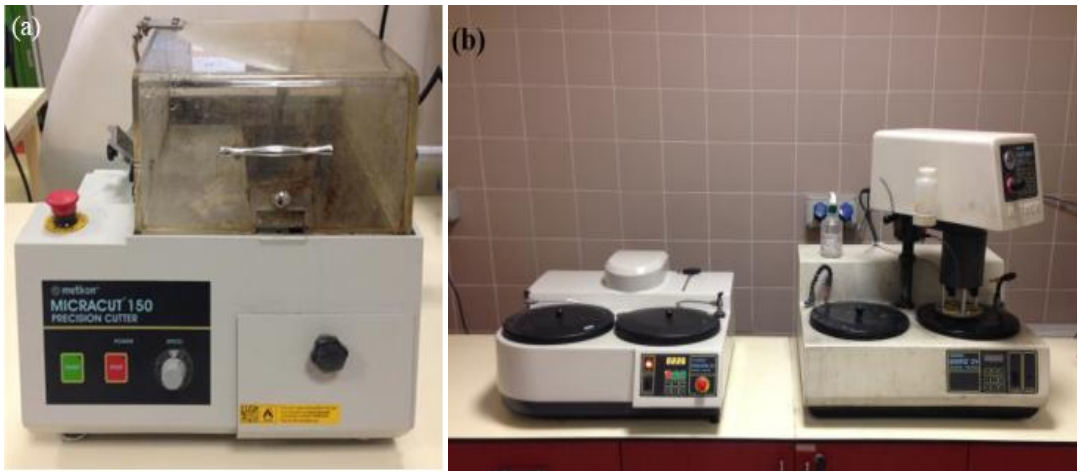
Titanyum ile alüminyum arasında bağlantının elde edilmesinin ardından alüminyum ile magnezyumun birleştirilmesine yönelik denemeler gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılan ilk denemelerde Al-Mg ötektik bileşim oluşturduğundan dolayı numune ergimiş ve kalıptan dışarı çıkmıştır (Şekil 5.12.b). Yüksek oranda elementel Mg ve Al partikülleri temas halinde olduklarından basınç altında yeterli sinterlemeyi sağlayacak şekilde üretim sağlanamamıştır. Bu nedenle nispeten düşük bir sıcaklıkta sıcak pres ile yeterli bağlantı sağlanmış ardından basınç desteği kaldırılarak sinterleme işlemine devam edilmiştir. Titanyum alüminyum katmanlı üretimin altına eklenen magnezyum 420℃'de sıcak pres yöntemi ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. 30 MPa basınçta 5'er dak. ısıtma, soğutma ve 10 dakika sinterleme işlemi ile toplam 20 dak. süre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sıcak pres işleminin ardından hazırlanan bir kalıp düzeneği ile vakum ortamında geleneksel sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Ötektik sıcaklığının hemen altındaki sıcaklıkta 30 dak. bekletilmiştir. Şekil 5.12'de hazırlanan basınçsız sinterlemeye imkan tanıyan kalıp düzeneğinin sıcak pres içindeki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.12. Basınç etkisini kaldıran kalıp düzeneğinin sıcak pres içerisindeki görüntüsü

5.3. Üretilen Numunelerin Metalografik İşlemlerle Hazırlanması

Üretilen numunelerin kesimi METKON Mikrocut 150 marka hassas kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.13 (a)). Elde edilen kompakt malzemelerden aşınma ve korozyon numunelerinin hazırlanması için numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuşladır. Zımparalama için 600, 1000 ve 2000 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Ardından parlatma işlemi 3 μm'lik elmas pasta ile yapılmıştır (Şekil 5.13 (b)).



Şekil 5.13. (a) Hassas kesme cihazı ve (b) zımparalama ve parlatma cihazı

5.4. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluk ölçümü AND Marka GR-200 model hassas terazi (Şekil 5.14) cihazında ASTM B962 – 17 standardına göre yapılmıştır [98]. Arşimet prensibi yardımı ile yapılan deneyde magnezyumun korozyon özellikleri dikkate alınarak etil alkolden yararlanılmıştır.

Arşimet prensibi;

$$\text{cismin yoğunluğu} = \frac{\text{cismin havadaki ağırlığı}}{\text{cismin havadaki ağırlığı} - \text{cismin sıvıdaki ağırlığı}} \times \text{sıvının yoğunluğu} \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [98]. Burada etil alkolün yoğunluğu 0,789 $g.cm^{-3}$ olarak alınmıştır.



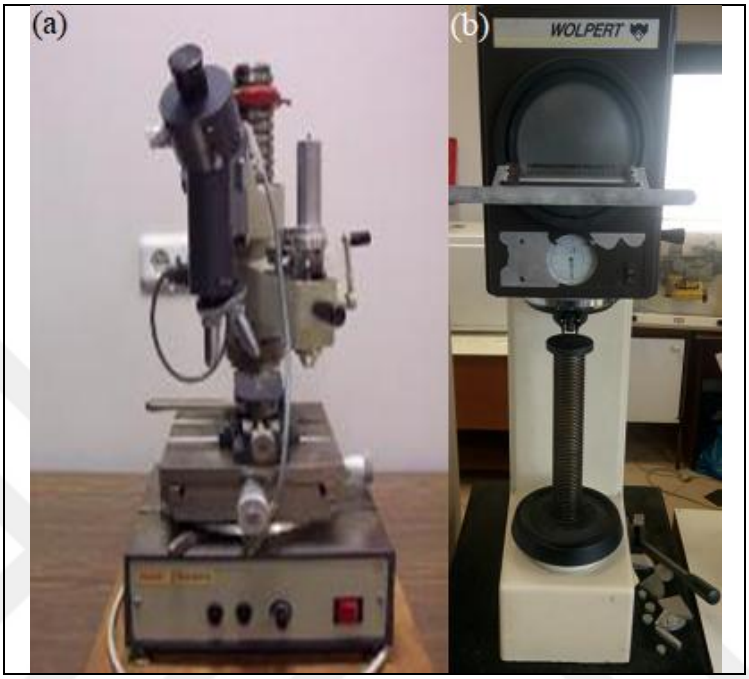
Şekil 5.14. AND GR-200 marka hassas terazi

5.5. Mekanik Testler

5.5.1. Sertlik testleri

Numunelerin sertlik deneyleri Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yapılan kaplamaların malzemedeki sertlik değişimine etkilerinin belirlenmesi amacıyla ölçümler Zwick marka Vickers mikrosertlik cihazında yapılmıştır Şekil (5.15(a)). Ölçümler 2,5 kgf yükte 10 saniye

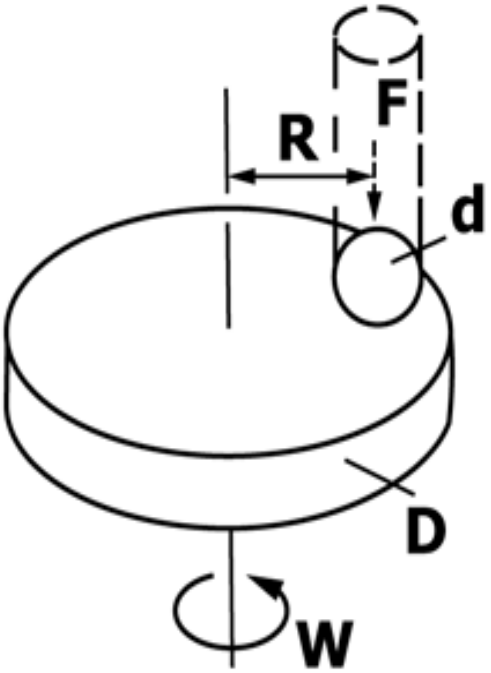
süre ile gerçekleştirilmiştir. Magnezyum esaslı titanyum partikül takviyeli kompozit malzemelerin Brinell sertlik ölçümü, 62,5 kg yükte, 2,5 mm bilye çapında ve 15 sn sürede gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15. (b)‘ de Wolpert marka Brinell sertlik cihazı verilmiştir.



Şekil 5.15. (a) Zwick marka Vickers mikrosertlik cihazı (b) Wolpert marka Brinell sertlik cihazı

5.5.2. Aşınma testi

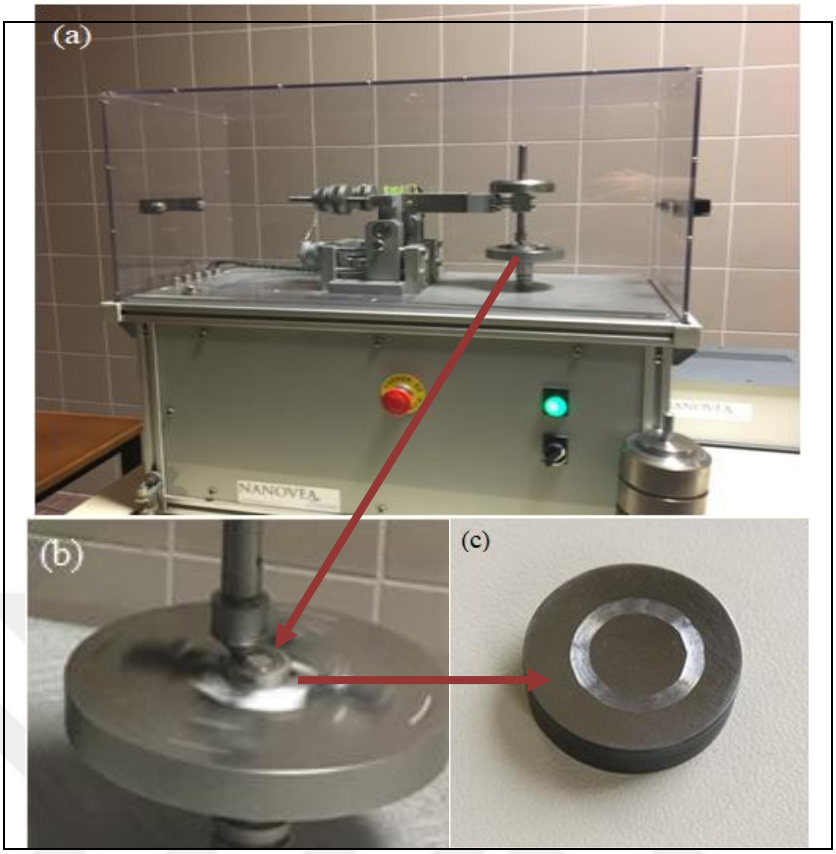
Elde edilen malzemelerin aşınmaya karşı gösterdikleri davranışları Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuarında bulunan NANOVEA marka ball on disk tipi aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM G99 – 17 standardına göre yapılan deneyin şematik gösterimi Şekil 5.16’ de verilmiştir. Burada F uygulanan kuvvet, d bilye çapı, D disk çapı, R aşınma yarıçapı ve w diskin dönme hızıdır [99]. Deneyde kullanılan parametreler Tablo 5.2’de verilmiştir. Deneyde kullanılan cihaz Şekil 5.17 (a)’ da verilmiştir. Deney sonrasında numune yüzeyinde oluşan aşınma izinin makro görüntüsü Şekil 5.17 (b) ‘ de verilmiştir.



Şekil 5.16. Ball on disk aşınma deneyinin şematik gösterimi [99]

Tablo 5.2. Numunelere uygulanan aşınma deneyi parametreleri

Uygulanan Kuvvet	Kullanılan Bilye	Dönme hızı	Mesafe	Aşınma Çapı
20N	100 Cr6 (6 mm çap)	150 rpm	200 m	10 mm



Şekil 5.17. (a) NANOVEA marka aşınma cihazı, (c) Test sonrası aşınan yüzeyin makro görüntüsü.

5.6. Mikroyapısal Karakterizasyon

5.6.1. SEM ve EDX ile gerçekleştirilen analizler

JEOL JSM-6060 (Şekil 5.18) marka taramaları elektron mikroskobu ile deneyde kullanılan tozlar ve numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Tabakalı üretilen malzemelerin EDX analizi aynı cihaz yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. JEOL JSM-6060 marka taramaları elektron mikroskobu

5.6.2. Optik mikroskop ile karakterizasyon

Elde edilen numunelerin incelenmesinde Olympus BX41M-LED marka optik mikroskop cihazından yararlanılmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.19. Olympus marka optik mikroskop

5.7. XRD Analizi ile Faz Tayini

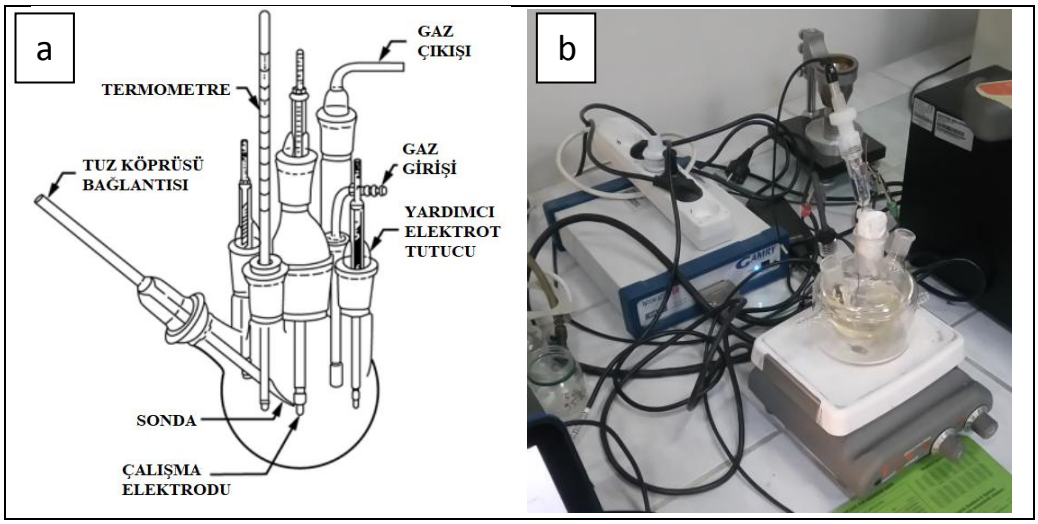
Numunelerin XRD analizi RigakuSA-HF3 marka cihazda yapılmıştır (Şekil 5.20). 40 V ve 20 mA ile gerçekleştirilen analizde oluşan Cu-Kα X-ışınları 1.54 Å dalga boyundadır (λ=1.54 Å) ve ölçümlerde tarama alanı olarak 10-80° ve tarama hızı 1°/dak. seçilmiştir.



Şekil 5.20. RigakuSA-HF3 marka XRD cihazı

5.8. Korozyon Testleri

Korozyon deneyi Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Deney ASTM G5 − 14 standardındaki korozyon hücresi (Şekil 5.21 (a)) GAMRY INTERFACE 1000 marka (Şekil 5.21 (b)) cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Literatürden yola çıkılarak yapılan korozyon deneyinde çözeltinin saf su + %3,5 NaCl olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.21. (a) ASTM G5 − 14 standardındaki korozyon hücresi [100] (b) GAMRY INTERFACE 1000 marka cihaz

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

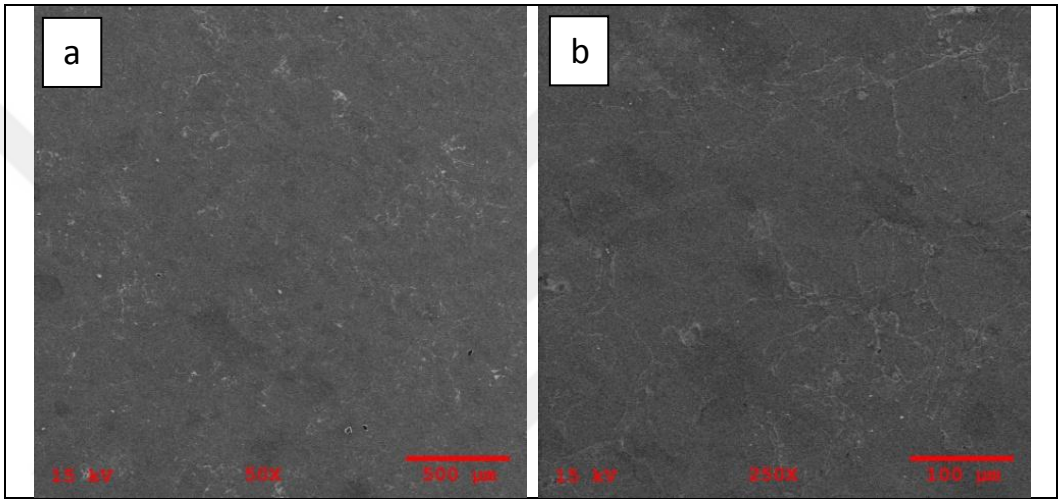
Tez kapsamında farklı bileşime sahip magnezyum esaslı malzemelerin üretimi ve titanyum esaslı malzemeler ile magnezyumun kaplanması gerçekleştirilmiştir. Titanyum ve magnezyum arasında çözünürlüğün olmaması sebebiyle saf titanyum içeren magnezyum esaslı malzemeler kompozit benzeri bir yapı sergilemiştir. Her ne kadar çözünürlük olmasa da gerek yapıya partikül formunda ilave sonrası gerekse yapılan kaplamalar sonrasında magnezyum ile titanyum arasında kuvvetli bir tutunma elde edilmiştir. İlave olarak alüminyum içeren Ti6Al4V alaşımı ile üretilen magnezyum ve yine aynı malzemenin kaplanması ile elde edilen malzemede ise alüminyumun katkısı nedeniyle daha kuvvetli bir tutunma elde edilmiş, sonuçlar EDX analizleri ile desteklenmiştir. Magnezyumun dayanımının arttırılmasına yönelik olarak ilave edilen elementlerin başında alüminyum gelmektedir. Tez kapsamında farklılık olarak, magnezyuma alüminyum ilavesi Mg50Al50 ön alaşımlı partikülleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla %50 alüminyum içeren ön alaşımlı magnezyum alaşımı üzerinden saf magnezyumun alüminyum içeriği belirlenmiştir. Bahsedilen bu tarz bir üretim süreci ile saf magnezyuma göre daya yüksek dayanım gösteren malzemeler üretilmiştir. Çalışmanın devamında yine magnezyumun yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla saf magnezyuma nazaran daha yüksek dayanım değerlerine sahip olan Ti6Al4V alaşımı ile birlikte titanyum alaşımları içinde en yüksek korozyon direncine sahip alaşımlardan biri olan Ti0.2Pd alaşımı kaplama malzemesi olarak seçilmiştir. Kaplama işlemi için bu malzemelerin pul şeklinde üretimleri ile ilgili bilgiler yukarıdaki bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir. Aşağıda, bahsedilen bu süreç boyunca elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

6.1. Sıcak Pres Yöntemi ile Magnezyum Esaslı Malzemelerin Üretimi

Magnezyum oksijene ilgisi çok yüksek olan bir metaldir. Özellikle geleneksel üretim yöntemleri ile magnezyum esaslı malzemelerin üretimi için koruyucu atmosfer ile birlikte üretimler gerçekleştirilip nihai malzemenin özelliklerinin olumsuz etkilenmesinin önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Ana malzemenin farklı olması durumunda dahi magnezyumun bir alaşım elementi şeklinde ilavesi sürecinde de bileşimde istenen oranların elde edilmesi kolay olmamaktadır. Dolayısıyla yukarıdaki bölümlerde de açıklandığı gibi magnezyum gibi oksijene ilgisi çok yüksek olan metallerin üretiminde vakum ortamının kullanımı önem arz etmektedir. Ayrıca yine geleneksel üretim yöntemlerinin en büyük dezavantajlarından birisi de aralarında çözünürlüğün sınırlı olduğu bileşenlerin üretimi sırasında da homojen bir bileşim elde edilememesidir. Bileşenler arasındaki sınırlı çözünürlük, ıslatma özelliklerinin zayıf olması ve yoğunluk farklılıkları homojen bir iç yapı ve sağlam bir tutunma için dezavantajlar doğurmaktadırlar. Bu noktada da çözüm olarak toz metalurjisi geleneksel yöntemlere göre malzeme üretimi sürecinde avantaj ortaya koymaktadır. Çözünürlüğün olmadığı sistemlerin dahi mekanik bir karıştırma işleminin ardından homojen dağılım sergileyecek şekilde üretimi mümkün olabilmektedir. Bu tez kapsamında bu nedenle toz metalurjik üretim süreçleri takip edilmiş tüm üretim süreçleri 10^{-4} mbar vakum atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.

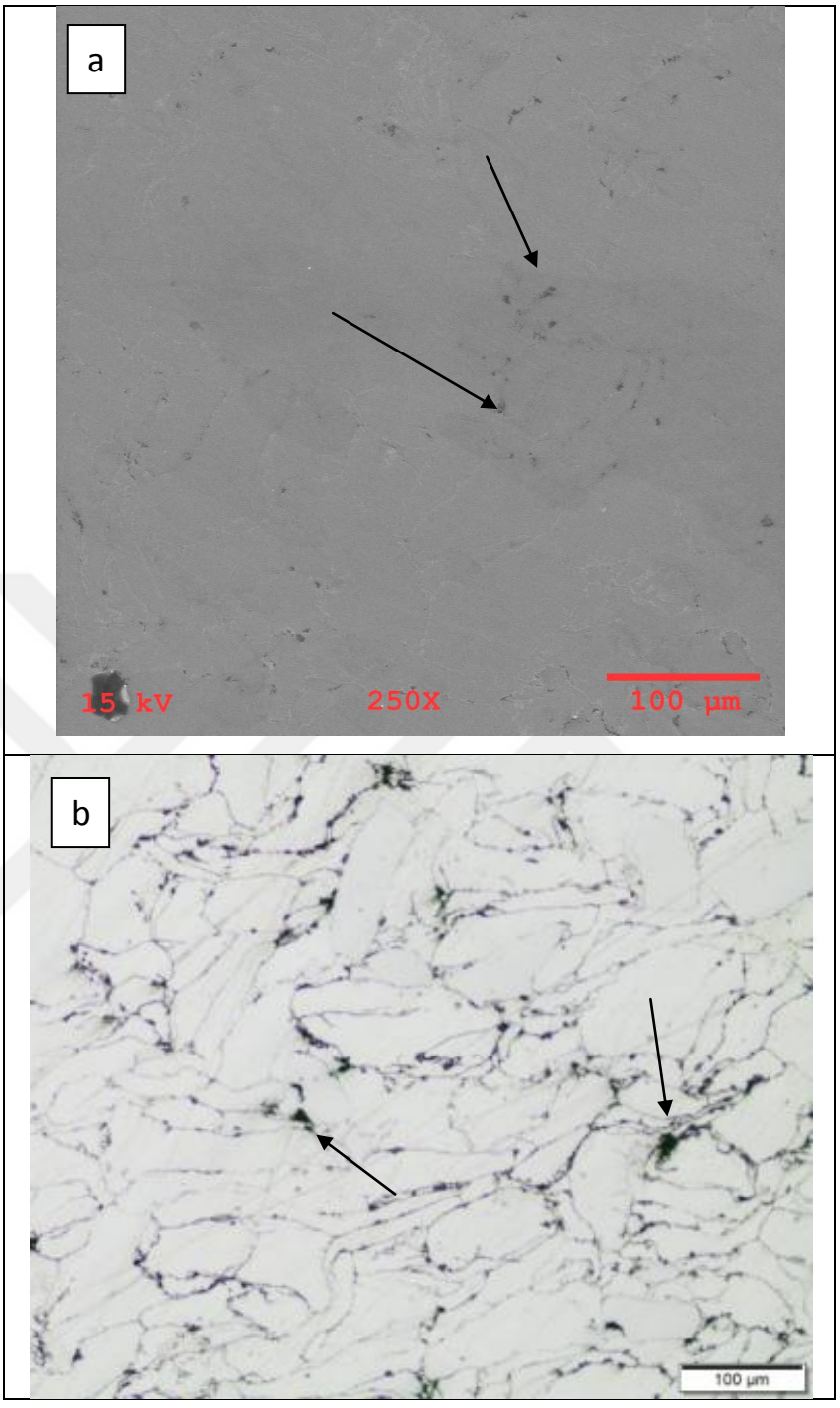
Tez kapsamında üretilmesi planlanan farklı içeriğe sahip magnezyum esaslı malzemeler toz metalurjik yöntemlerden biri olan sıcak pres ile elde edilmişlerdir. Sıcak pres yönteminin avantajı sinterleme sırasında eş zamanlı olarak basınç desteğinin de uygulanmasına müsaade etmesidir. Özelikle yüksek yoğunluk beklendiğinde bu tarz basınç destekli sinterleme yöntemleri tercih edilmektedir. İlave olarak kaba boyutlu partiküllerden daha aktif bir sinterleme davranışı elde edilmesi için basınç desteği önem arz etmektedir. Basınç destekli sinterleme yöntemlerinin başka bir avantajı ise oksitlenmiş tozların sinterlenmesi sırasında oksitlerin basınç desteği ile kırılarak yoğunluk artışına katkı sağlamasıdır. Küçük boyutlu partiküllerin yüksek enerjisi geleneksel üretim süreçlerinde (basınç desteksiz) kendiliğinden itici güç olarak rol almaktadır. Çalışma kapsamında kullandığımız partiküllerin nispeten kaba boyutları nedeniyle sıcak pres ile üretilmeleri de önemli bir anlam içermektedir.

Sonuç olarak magnezyum esaslı malzemeler ve kaplamalar sıcak pres ile üretilmiştir. Bir toz metalurjik malzemeden özel uygulamalar hariç beklenen yüksek yoğunluk sergilemesidir. Belirlenen ve yukarıdaki bölümlerde açıklanan sinterleme parametreleri sonrasında elde edilen saf magnezyumun iç yapısını gösteren SEM görüntüsü Şekil 6.1'de verilmiştir. SEM görüntüsünden de net bir şekilde görüleceği gibi neredeyse tam yoğunluk eldesi sağlanmış, mikroyapıda herhangi bir gözeneğe rastlanmamıştır. Üretim sonrası elde edilen farklı bileşimlerin tüm yoğunluk değerleri devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde belirtilecektir.



Şekil 6.1. Sıcak pres ile üretilen saf magnezyumun SEM görüntüsü, (a) 100X, (b) 250X

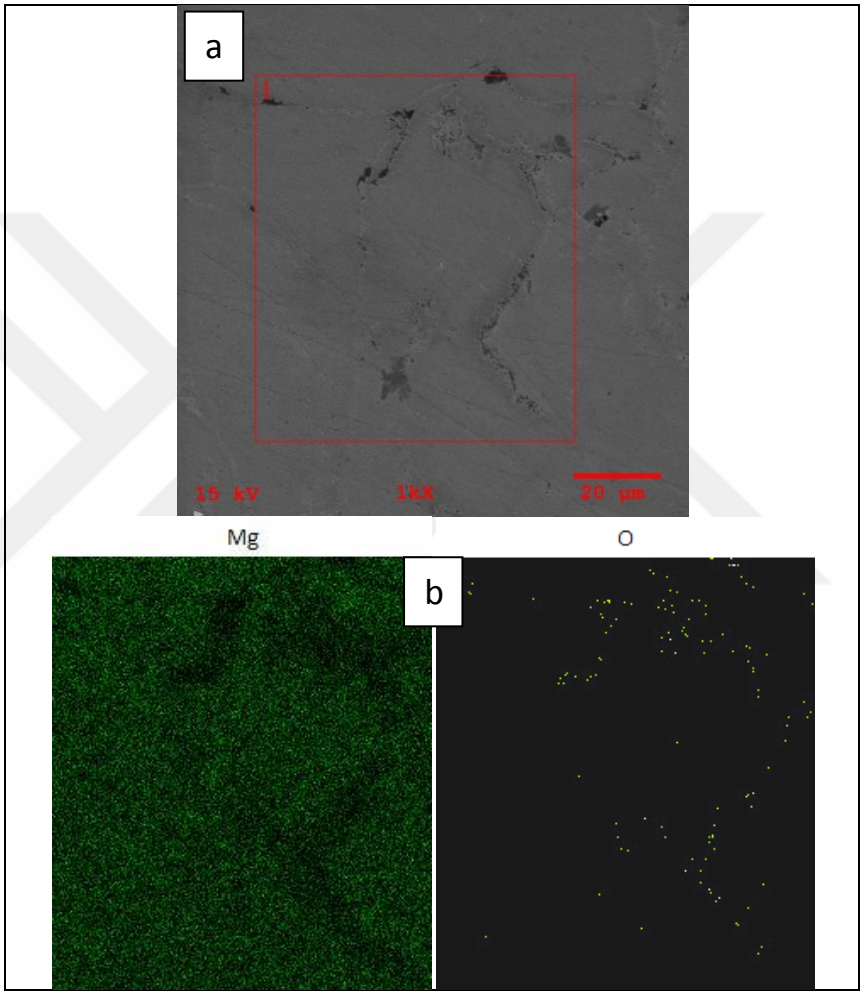
Sıcak pres ile üretilen magnezyumun mikroyapısı incelendiğinde tam yoğunluğa sahip gözeneksiz bir yapı elde edildiği görülmüştür. Mikroyapıda ayrıca partikül sınırlarında SEM ile görüntülemede beyaz kontrastlı, optik mikroskop ile görüntüleme de ise koyu kontrastlı bölgeler dikkati çekmektedir (Şekil 6.2). Daha önce de belirtildiği gibi magnezyumun oksijene ilgisi çok fazladır. Dolayısıyla malzeme üretimi her ne kadar vakum altında gerçekleşmiş olsa da partiküllerin gerek üretim süreçlerinden gerekse de depolanmaları sürecinde zamanla oksitlenmeleri nedeniyle magnezyum esaslı malzemelerin üretimi sonucunda yapıda oksit bileşenlerinin görülmesi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur.



Şekil 6.2. Sıcak pres ile sinterlenmiş magnezyumun mikroyapı görüntüleri, (a) SEM, (b) optik mikroskop görüntüsü

Bu doğrultuda elektron mikroskobu ile inceleme sırasında EDX analizi ile yapılan alansal analiz sonucu Şekil 6.3'de verilmiştir. Görüldüğü gibi partikül içerisindeki oksijen, partikül sınırlarında yoğunlaşmaktadır. Böyle bir durum sinterleme açısından istenmez. Sinterleme partiküllerin temas noktalarında difüzyon ile boyun oluşumu ve bu boyunun büyüyerek tüm malzemede yoğunlaşmanın tamamlanması

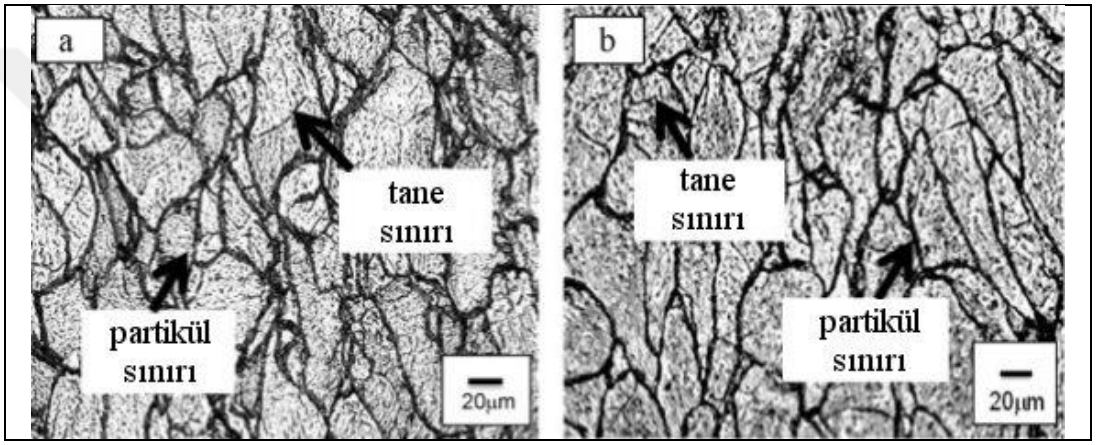
işlemidir. Partiküllerin yüzeylerinin oksitli olması difüzyonun engellenmesine, partiküllerin metalik yapıdan ziyade seramik davranış göstermesine neden olacağından seçilen üretim sürecinde beklenen performansa sahip malzeme üretimi zorlaşacaktır [101]. Fakat yukarıda sıcak presin avantajları bölümünde değinildiği gibi sinterleme sırasında uygulanan basınç sayesinde yüzeylerdeki oksitler kırılabilmekte ve yoğunlaşmaya ekstra bir katkı sağlanmaktadır [102].



Şekil 6.3. Mg partikülleri arasında oksitlenmenin gösterildiği (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX haritalama analizi

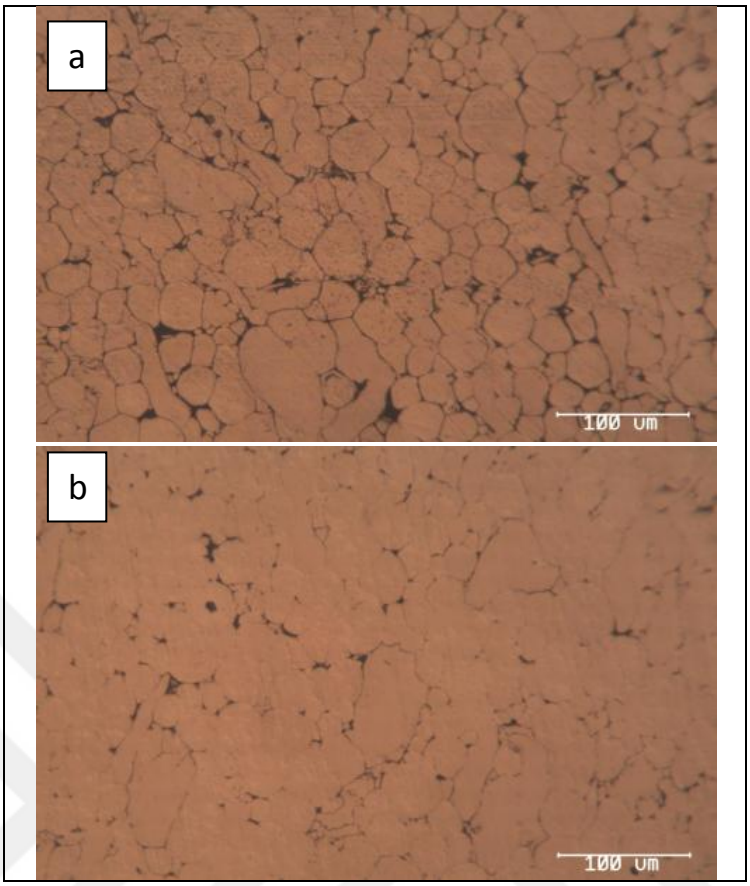
Partikül formunda yola çıkarak yapılan üretim sonrasında yapıda bu tarz oksitlerin görülmesi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Benzer sonuçlar Muhammad vd. yaptığı çalışma da belirlenmiştir. Muhammad vd. SiC takviyeli AZ31 alaşımını kıvılcım plazma sinterleme yöntemi ile farklı sıcaklıklarda başarılı bir şekilde üretmişlerdir. Üretim için bileşimler bilyalı değirmende karıştırılmış, tez kapsamında kullandığımız nihai ölçülere benzer (20 mm çapında 7 mm kalınlığında) numuneler elde ederek

numunelerin mikroyapısını incelemişlerdir. Şekil 6.4'de kıvılcım plazma sinterleme yöntemi ile üretilen SiC takviyeli Mg matrisli kompozitin ışık mikroskobu ile çekilen görüntüleri verilmiştir. Çalışmada öncelikle gözeneksiz bir yapı elde edildiği belirtilmiş, başlangıç partikül sınırlarının da görülmeye devam ettiği ortaya konmuştur. Bunun sebebi olarak da kullanılan tozların yüzeylerinin oksitlenmiş olduğu gösterilmiştir. Fakat daha önce belirtildiği gibi Muhammad vd. bu oksit filmlerinin uygulanan basınç ve yüksek sinterleme sıcaklıkları ile elimine edilebileceğini ortaya çıkabilecek dezavantajların önüne geçilebileceğini ifade etmişlerdir [103].



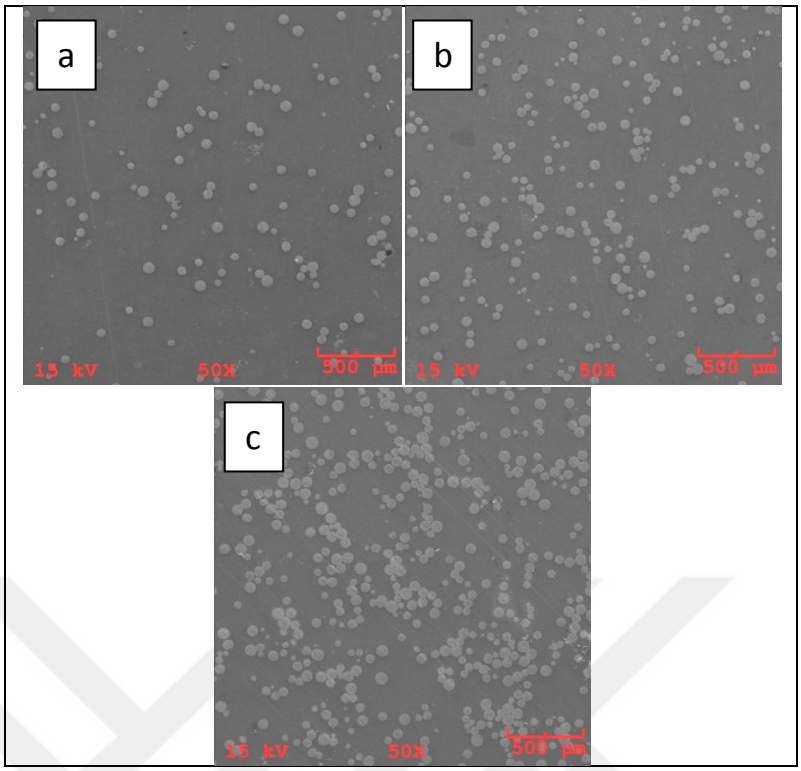
Şekil 6.4. SPS yöntem ile üretilmiş SiC takviyeli Mg kompozitin iç yapısında görünen oksitli partikül sınırlarının optik mikroskop görüntüleri [103]

Basınç desteğinin yanında artan sinterleme sıcaklıkları ve süreleri ile de yoğunluk değerleri geliştirilebilir. Şekil 6.5' de atomize magnezyum tozlarının 500 MPa basınç ile şekillendirilmesini takiben 600 °C de sinterlenmesi sonucu elde edilen mikroyapılar verilmiştir. Sinterleme süresi 40 dakikadan 360 dakikaya çıktığında mikroyapıdaki değişim partikül bağlantılarının gelişmesi dikkat çekmektedir. Her ne kadar yoğunluk açısından önemli bir fark oluşmasa da sinterleme süresinin 40 dakikadan 360 dakikaya çıkması ile sertlik, çekme mukavemeti ve uzama değerlerinde gelişme görülmüştür [104].

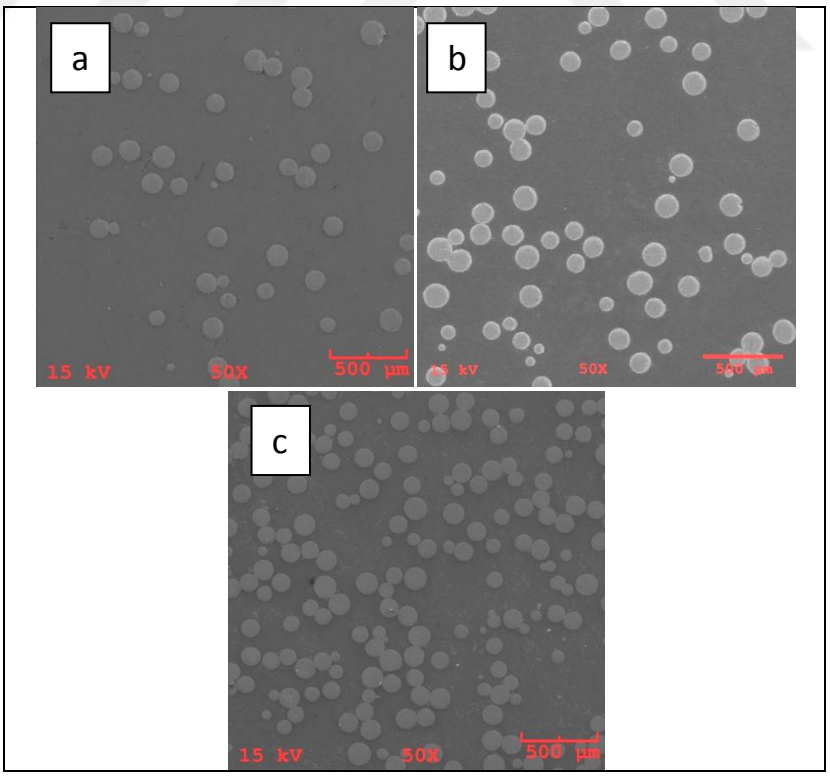


Şekil 6.5. 600 °C de farklı sürelerde sinterlenen Mg, (a) 40 dak, (b) 360 dak.

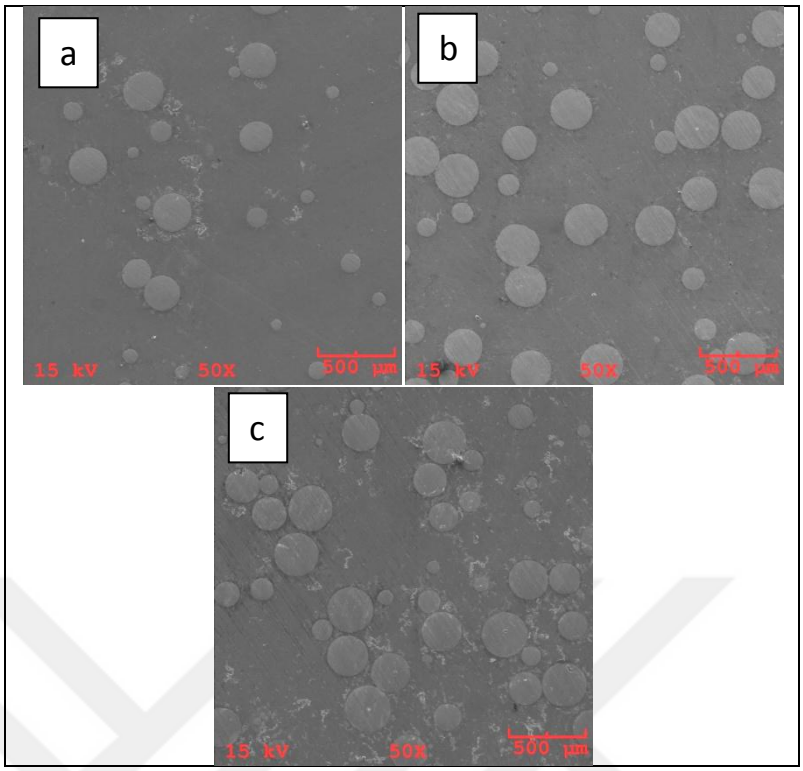
Saf magnezyum için sıcak pres ile üretim parametrelerinin tanımlanıp başarılı bir şekilde malzeme elde edildikten sonra tezin amacına yönelik ilaveler yapılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi farklı bileşenlerden oluşan bir ürün elde edilmesi sürecinde beklenen en önemli olumsuzluk homojen dağılım sağlanamamasıdır. Fakat seramik bilyalar yardımı ile bilyalı değirmende yapılan karıştırma ile bu kritik nokta çözülmüştür. Elde edilen farklı titanyum içeriklerine sahip magnezyum esaslı malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8' de verilmiştir. Titanyum partiküllerinin magnezyum içerisinde homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Tezin bazı bölümlerinde de bahsedilen kompozitlere benzer bir yapının elde edildiğini ortaya koymak açısından bu taramalı elektron mikroskobu görüntüleri önem arz etmektedir. SEM görüntülerinden aynı zamanda özellikle %15 partikül ilave oranlarında partiküllerin topaklanmaya başladıkları görülmektedir. Ayrıca numunelerin metalografik olarak hazırlanmaları sonrasında da yapılan incelemelerde titanyum partiküllerinin matristen çıkmadığı yani sağlam bir bağlantıya sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 6.6. Farklı oranlarda ince saf Ti partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti

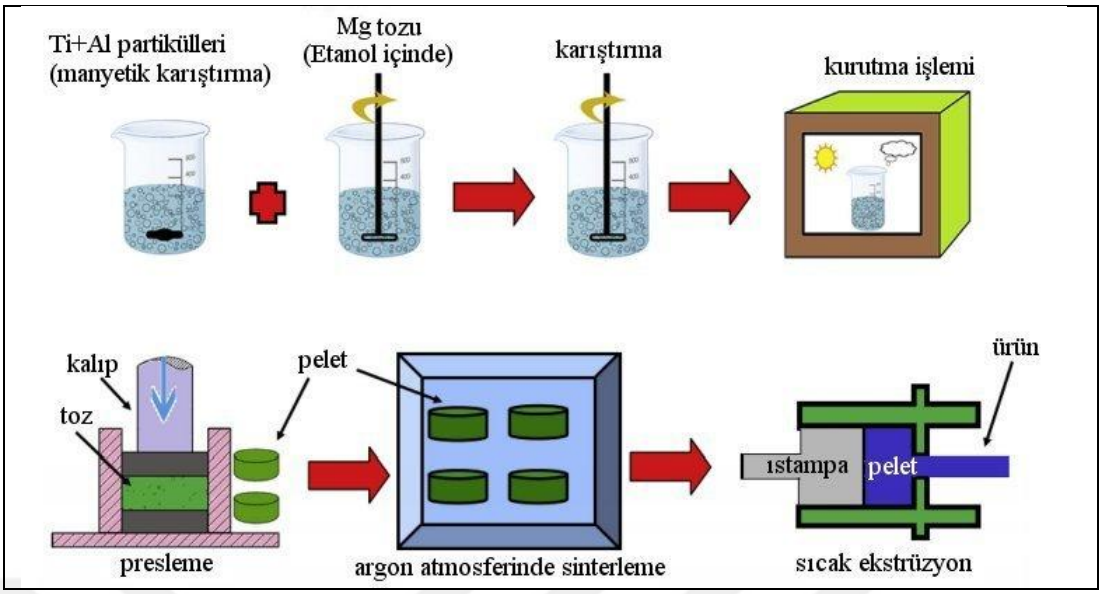


Şekil 6.7. Farklı oranlarda kaba Ti partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti



Şekil 6.8. Farklı oranlarda Ti6Al4V alaşım partikülleri içeren Mg numuneleri, (a) 5, (b) 10 ve (c) %15 Ti

Titanyumun, magnezyum içine dayanım artırımı için ilave edilmesine yönelik literatür de mevcut örnek çalışmalar bulunmaktadır. En önemlilerden birisi Rashad vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Magnezyum ve titanyum arasında katı çözelti oluşmaması sebebiyle özellikle magnetron sputterlama ve mekanik alaşımlama ile malzeme üretimi gerçekleştirilmektedir. Özellikle mekanik alaşımlama sırasında oluşan reaksiyonlar ve ulaşılan yüksek sıcaklıklar nedeniyle magnezyum için ortaya çıkacak olumsuzlukların önlenmesi amacıyla Rashad vd. yine toz metalurjik bir proses ile Mg-10Ti esaslı malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları yöntemi de sıcak ekstrüzyonun takip ettiği bir yarı toz metalurjisi prosesi olarak ifade etmişlerdir. Yöntemin şematik çizimi Şekil 6.9'da verilmiştir [105].

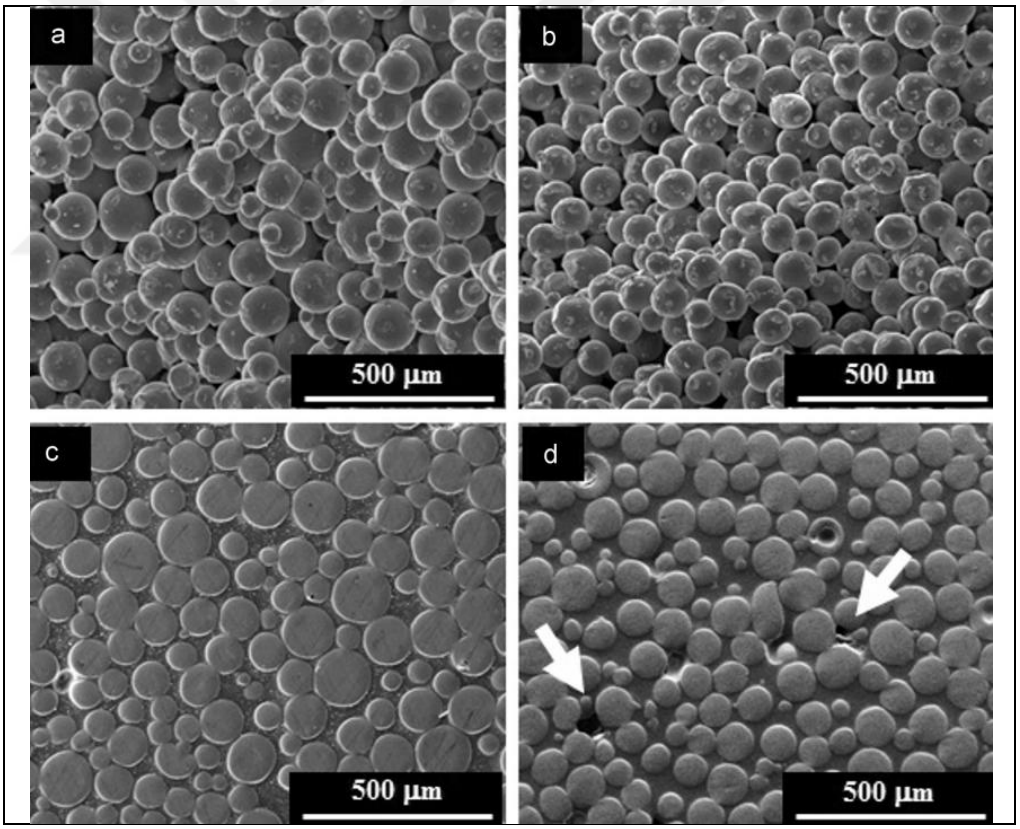


Şekil 6.9. Yarı toz metalurjik proses ile Ti partikül katkılı Mg üretim yöntemi [105]

Rashad vd. kullandıkları bu kısmi toz metalurjisi prosesi ile başarılı bir şekilde mekanik alaşımlamaya gerek kalmadan ve dolayısıyla mekanik alaşımlamanın Mg gibi reaktif malzemeler için dezavantajlarını elimine ederek üretmeyi başarmışlardır. Elde ettikleri titanyum katkılı magnezyum numuneler saf magnezyuma göre daha yüksek sertlik, elastisite modülü, akma dayanımı ve daha yüksek uzama değerleri sergilemişlerdir. Bahsedilen bu çalışmada titanyum ile birlikte aluminyum da kullanılmış ve tek başına titanyum ile magnezyum arasındaki etkileşim üzerindeki rolü tanımlanmıştır. Özellikle kopma uzaması değerlerinde etkili artış gözlemlemişlerdir. Mg matris ile titanyum partikülleri arasında alaşım elementi olarak aluminyum bulunması sayesinde daha iyi bir uyum elde edilmiştir. Bu sonuç çalışmamızda da yapılan Ti6Al4V partikül ilavesinde desteklenmiştir. Saf titanyum partikül takviyesine göre içerdiği alüminyum sayesinde magnezyum matris ile Ti6Al4V partikülleri arasında daha üstün bir uyum ile karşılaşılmıştır.

Titanyumun magnezyuma partikül şeklinde dağıtılması ile biyomalzeme amacıyla kullanımına yönelik çalışmalarda mevcuttur. Esen vd. saf Ti ve Ti6Al4V alaşım partikülleri içeren Mg bileşimlerinin mekanik özelliklerini ve vücut sıvıları içindeki davranışlarını incelemişlerdir. Saf titanyum partikül içeren malzeme, Ti6Al4V içeren magnezyuma göre in vitro testlerde dayanımlarını koruyamamalarına rağmen farklı uygulama amaçları için üretim yöntemi ile farklılıklar ortaya konması açısından çalışmaları önem taşımaktadır. Esen vd. ürettikleri bu malzemeler için Mg matrisli

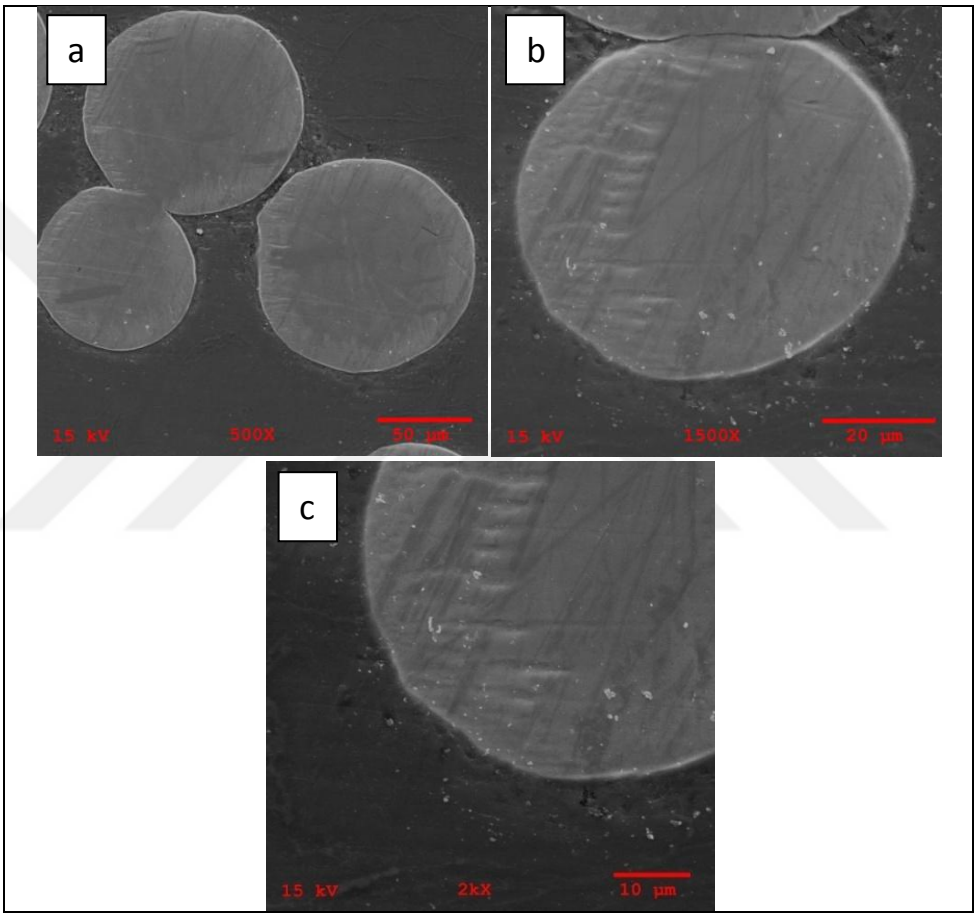
kompozit yaklaşımını kullanmışlardır. Ürettikleri malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Bahsedilen bu çalışmada, saf titanyum ve Ti6Al4V tozlarından gevşek durumda yani basınç uygulamadan sinterleme yapılarak iskelet yapı elde edilmiştir. Ardından Mg ergitilerek bu gözenekli yapı içine infiltre ettirilmiştir. Bu tarz bir yapı üretimi titanyum tozları arasındaki boşluklar üzerinden gerçekleştiğinden istenen bileşime sahip Ti ve Mg elde edilmesi sınırlı olmaktadır. Çünkü gevşek durumda sinterleme ile elde edilebilen gözenek oranı yani infiltre ettirilecek Mg için boşluk oranı yaklaşık %36 olarak verilmiştir. Dolayısıyla daha düşük titanyum içeren sistemler için bu yöntem pratikte pek mümkün görülmemektedir. Fakat yine de magnezyum matrisli Ti partikül takviyeli kompozitlerin farklı üretim yöntemleri ile elde edilmesine verilecek bir örnek olması açısından önem taşımaktadır [106].



Şekil 6.10. İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen Mg matrisli Ti ve Ti6Al4V takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri, (a) gözenekli saf Ti, (b) gözenekli Ti6Al4V alaşımı, (c) Ti-Mg, (d) Ti6Al4V-Mg [106]

Aralarında çözünürlüğün ihmal edilebilecek düzeyde olduğu sistemler ile bir kompozit benzeri yapı oluşturulmak istendiğinde matris ile dayanımı arttırması

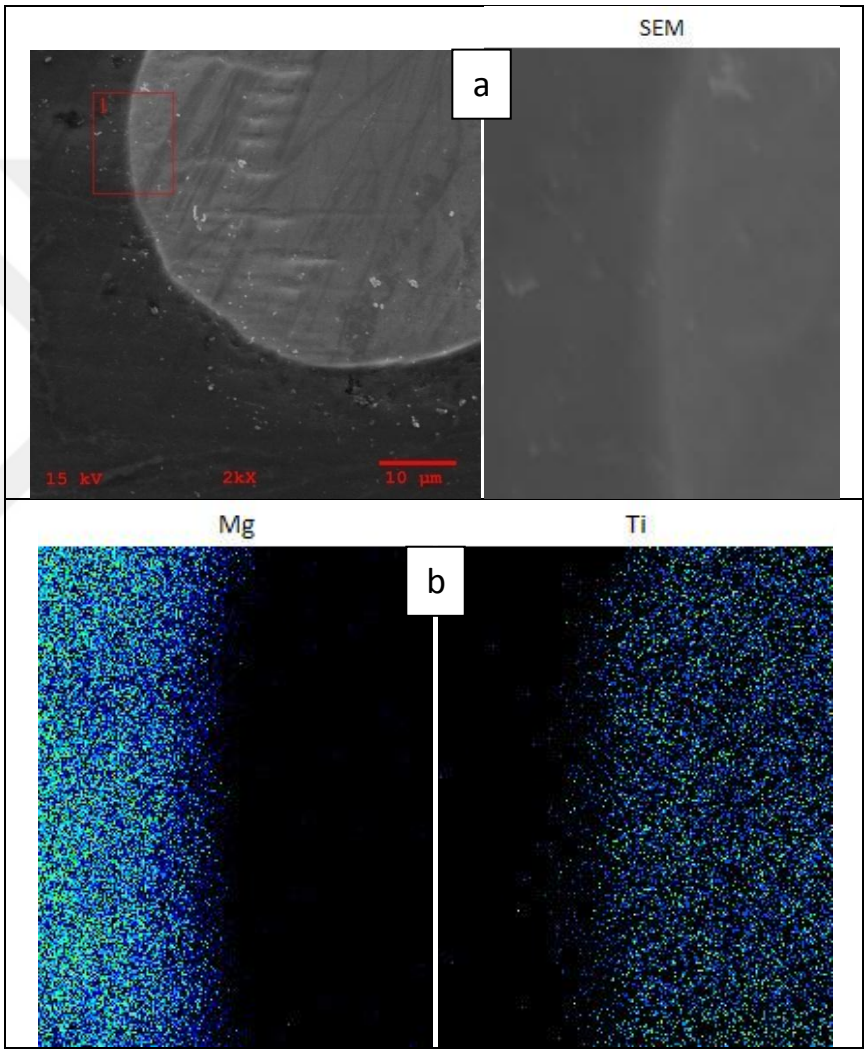
beklenen takviye elemanları arasında iyi bir uyum olması beklenir. Şekil 6.11'de saf titanyum partikülleri ile güçlendirilmiş magnezyumun düşük ve yüksek büyütmelerde arayüzey bağlantısını gösteren SEM görüntüleri bulunmaktadır. Görüntülerden yola çıkarak partiküller ile matris arasındaki bağlantının zayıf olduğu gösteren bir işaret bulunmamaktadır. Üretim sonrası numunelerin kesilmesi, zımparalanması ve parlatılması süreçlerinden geçen numunelerde matristen ayrılan herhangi bir titanyum partikülü ile karşılaşılmamıştır.



Şekil 6.11. Mg ile Ti arasında oluşan arayüzeyin SEM görüntüleri, (a) 500x, (b) 1500x ve (c) 2000x

Magnezyum matris ile titanyum partikülleri arasındaki arayüzey bağlantısının daha detaylı incelemesi arayüzeyde yapılan EDX haritalama analiz ile ortaya konmaya çalışılmıştır (Şekil 6.12). Takviye ile matris arasındaki uyumun kalitesi nihai ürünün özelliklerini doğrudan belirleyen bir kavramdır. Peki aralarında ihmal edilebilecek düzeyde çözünürlük bulunan bu sistemde bağlantının bu uyumunun sebepleri nelerdir? Öncelikle ihmal edilebilecek düzeyde olan çözünürlük değerleri bile

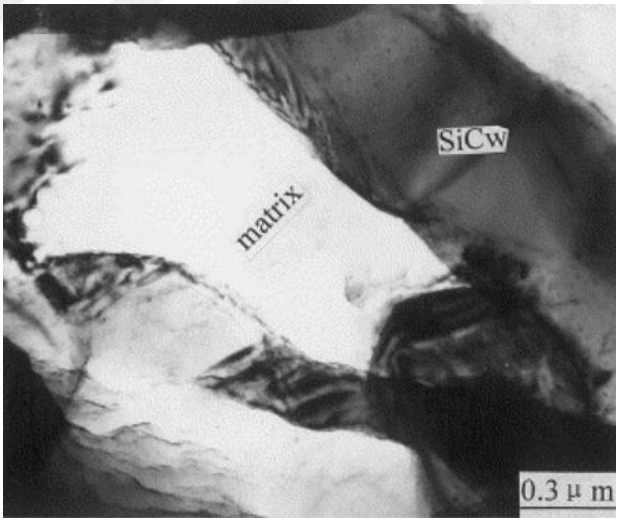
arayüzeyde bağlantı dayanımına katkı sağlamaktadır. EDX görüntüleri incelendiğinde keskin bir geçişten ziyade nispeten daha yumuşak bir arayüzey sınırı ile karşılaşılmıştır. İlave olarak Mg ile Ti elementlerinin sahip oldukları aynı kristal yapısı, bu sistemlerin dahil olduğu tasarımlarda arayüzeyde uyumlu bir etkileşim olmasına imkan tanımaktadır. Bu iki unsura ilave olarak magnezyumun yüksek ıslatma yeteneği böyle bir bağlantının kaynağını açıklamak için mutlaka ortaya konması gereken bir kavramdır.



Şekil 6.12. Mg matris ile Ti partiküller arasında arayüzey bağlantısı, (a) SEM görüntüsü, (b) Mg ve Ti elementleri için EDX haritalama

Matris ile dayanım arttırmada kullanılan partikül takviyeleri arasındaki uyumun incelenmesinin en önemli sebeplerinden birisi malzemenin kullanımı sırasından maruz kaldığı yükün matristen takviye elemanlarına başarılı bir şekilde

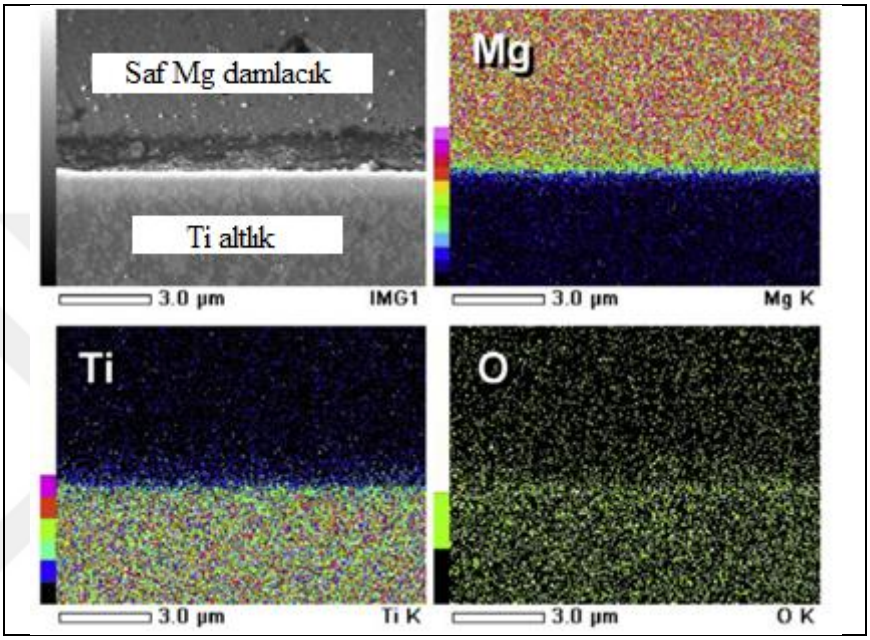
iletilebilmesidir. Lianxi vd. magnezyum alaşımlarına SiC takviyesi ile özeliklerin geliştirilmesi için seçtikleri sıkıştırmalı döküm yönteminin ortaya koyduğu 100 MPa basınç değerleri ile bahsedilen matris partikül takviyesi arasında arayüzey uyumu geliştirmeye çalışmışlardır. Uyguladıkları yüksek sıkıştırma basıncı sayesinde büzülmeleri engelleyerek oluşabilecek arayüzey bağlantı zayıflıklarından uzaklaşmaya çalışmışlardır. SiC takviyesi ile elde ettikleri magnezyum kompozitin TEM görüntüsü Şekil 6.13'da verilmiştir. Tez kapsamına benzer bir yaklaşımla SiC takviyesi ile magnezyumun herhangi bir karbür bileşiği oluşturmaması ifade edilmiş, TEM incelemesi ile SiC partikülleri ile Mg arayüzeyinin temiz net bir şekilde ayırt edilebildiği yani proses süresince herhangi bir arayüzey reaksiyonunun oluşmadığı bildirilmiştir. Buna rağmen takviye içermeyen alaşımın mekanik özeliklerinden daha üstün özellikli bir kompozit üretimi başarılı bir şekilde üretildiğini çalışmalarında ortaya koymuşlardır. Buradan yola çıkarak tez kapsamında kullanılan titanyum partikülleri mevcut seramik esaslı takviyelerle karşılaştırıldığında yeterli arayüzey uyumu sergilemesi açısından doğru bir takviye elemanı olarak seçilebileceği oraya konmuştur [107].



Şekil 6.13. SiC takviyeli Mg matrisli kompozitin arayüzey görüntüsü [107]

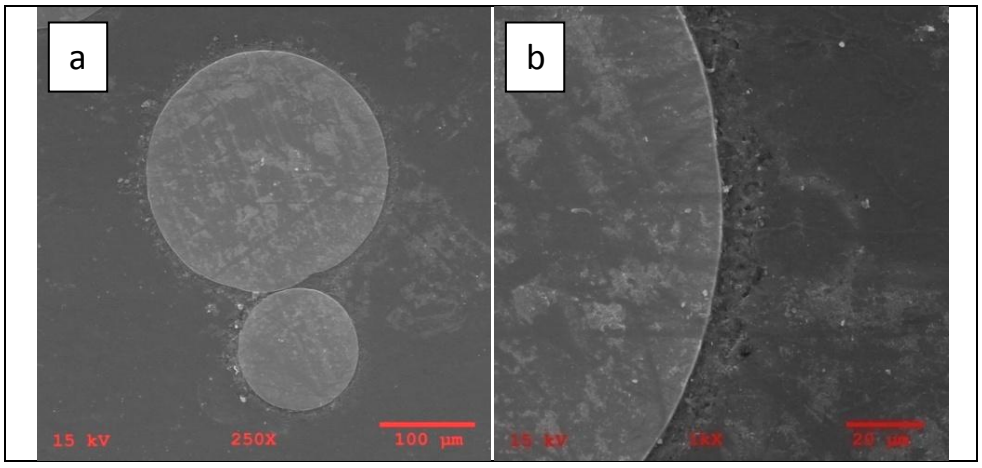
Tez kapsamında Mg-Ti arayüzeyinin bağlantısının kuvvetli olmasın da diğer önemli bir etkenin magnezyumun ıslatma yeteneği olduğu ifade edilmiştir. Bu ilişkiyi destekler nitelikte literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Kondoh vd. Mg ile Ti arasındaki ıslatma özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın çıkış noktasını ise titanyum partikülleri ile takviye edilmiş magnezyum esaslı kompozitler için dizayn

açısından kritik olduğunu göstermişlerdir. Gerçekleştirdikleri ıslatma testleri sonrasında elde ettikleri SEM görüntüsü ve EDX analizi Şekil 6.14'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar magnezyumun tam olarak titanyum yüzeyine penetre olduğunu göstermiştir. Çalışmanın bir diğer önemli sonucu ise, elde edilen veriler değerlendirildiğinde Mg ve Ti arasındaki ıslanma özelliklerinin TiC ve SiC gibi seramikler ile karşılaştırıldığında çok daha iyi olduğu ortaya konmuştur [108].

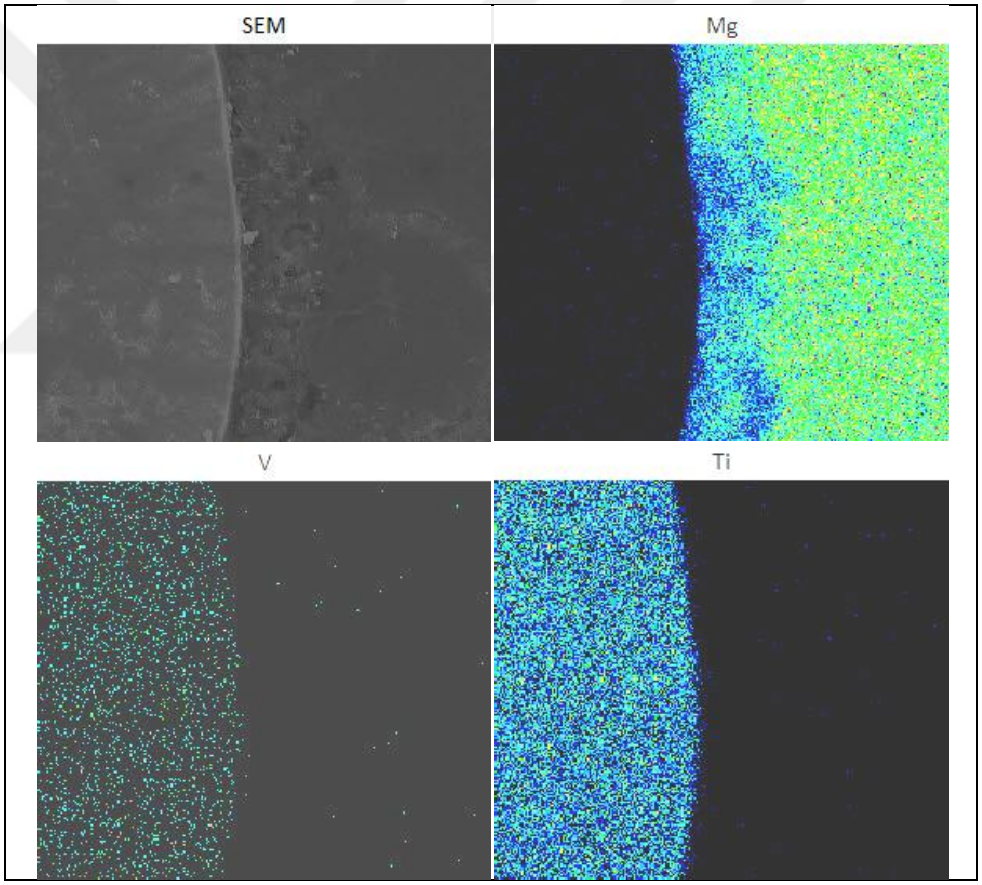


Şekil 6.14. Mg ile Ti arayüzeyinin SEM ve EDX analizi [108]

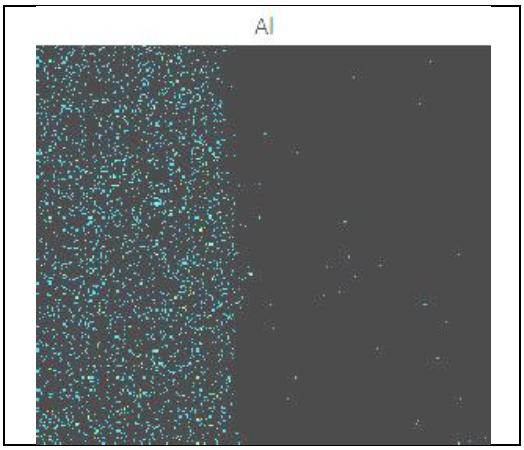
Saf titanyuma nazaran içerdiği alüminyum nedeniyle Ti6Al4V partikülleri ile Mg arasında geniş bir arayüzey etkileşimi görülmüştür. Şekil 6.15'de Ti6Al4V partikülü içeren Mg numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Arayüzeydeki geçiş bölgesi saf titanyuma nazaran oldukça fazla dikkat çekmektedir. Geçiş bölgesinin elementel analizi ise Şekil 6.16'da verilmiştir. Elde edilen EDX haritalaması üzerinden elementlerin dağılımları dikkat çekmektedir.



Şekil 6.15. Mg+Ti6Al4V numunesinin SEM görüntüsü, (a) 250X, (b) 1000X

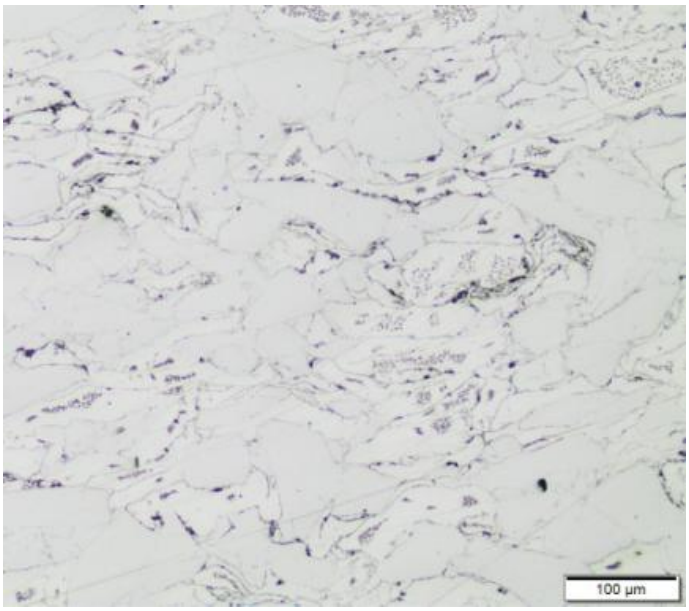


Şekil 6.16. Mg+Ti6Al4V numunesinin EDX haritalama analizi



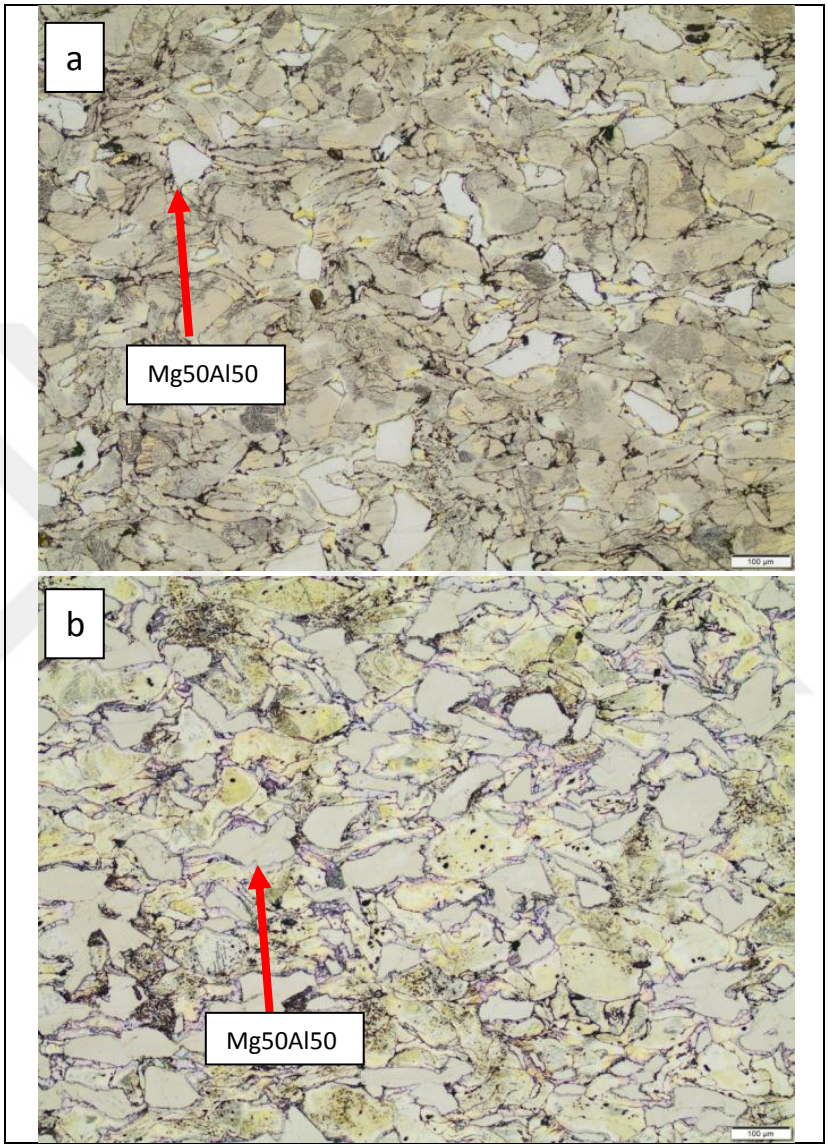
Şekil 6.16. (Devam) Mg+Ti6Al4V numunesinin EDX haritalama analizi

Magnezyuma titanyum partikül ilavesinin ardından üretim süreci Mg+XMg50Al50 (X: %12, 30 ve 50) kompozisyonunu üretimi üzerinden devam etmiştir. Beklendiği gibi titanyuma nazaran çözünürlük sorunun yaşanmayacağı böyle bir takviye süreci ile özelliklerdeki değişimin belirlenmesi önem taşımaktadır. %50 Mg50Al50 içeren magnezyum esaslı malzemenin parlatılmış konumdaki örnek görüntüsü Şekil 6.17'de verilmiştir. Daha önceki üretim süreçlerinde verilen şekilde bu kompozisyonların üretimi sonrasında da mikroyapıdan görüldüğü gibi nerdeyse tam yoğunluğa sahip bir iç yapı elde edilmiştir.



Şekil 6.17. %50 Mg50Al50 içeren numunenin parlatılmış konumda optik mikroskop görüntüsü

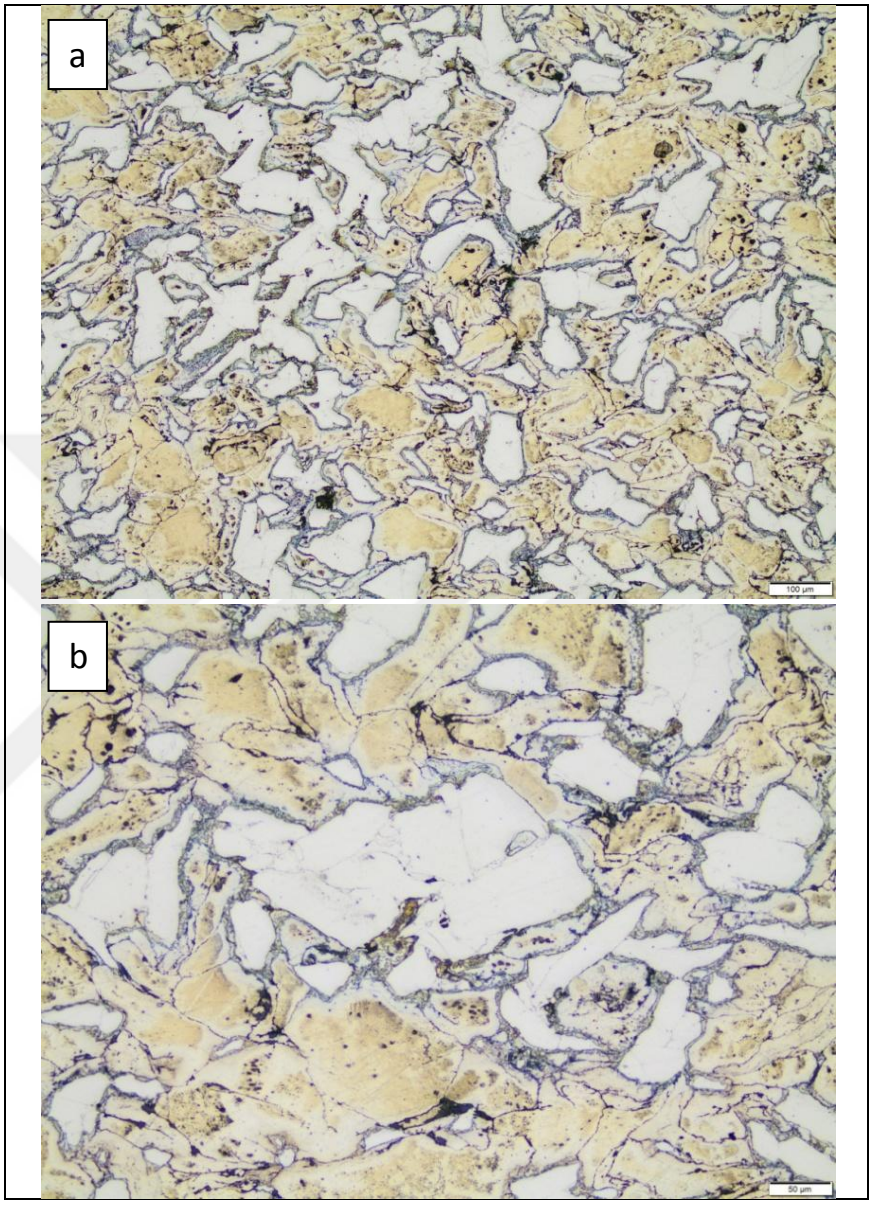
Karşılaştırma amaçlı olarak %12 ve %50 Mg50Al50 partikülleri içeren numunelerin dağlanmış görüntüleri ise Şekil 6.18'de verilmiştir. Titanyum partiküllerine benzer şekilde homojen bir dağılıma sahip olacak şekilde numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.18. Mg50Al50 partikülleri içeren Mg numunelerinin dağlanmış konumda optik mikroskop görüntüleri, (a) %12, (b) %50

Mg50Al50 partiküllerinin magnezyum matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını gösteren optik mikroskop görüntülerinin ardından Şekil 6.19'da takviye partikülleri ile matris arasındaki etkileşimleri arayüzey açısından daha detaylı gösteren yine optik mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Titanyum partikül takviyeli numunelerin aksine Mg50Al50 partikülleri ile Mg matris arasındaki reaksiyon bölgeleri net bir

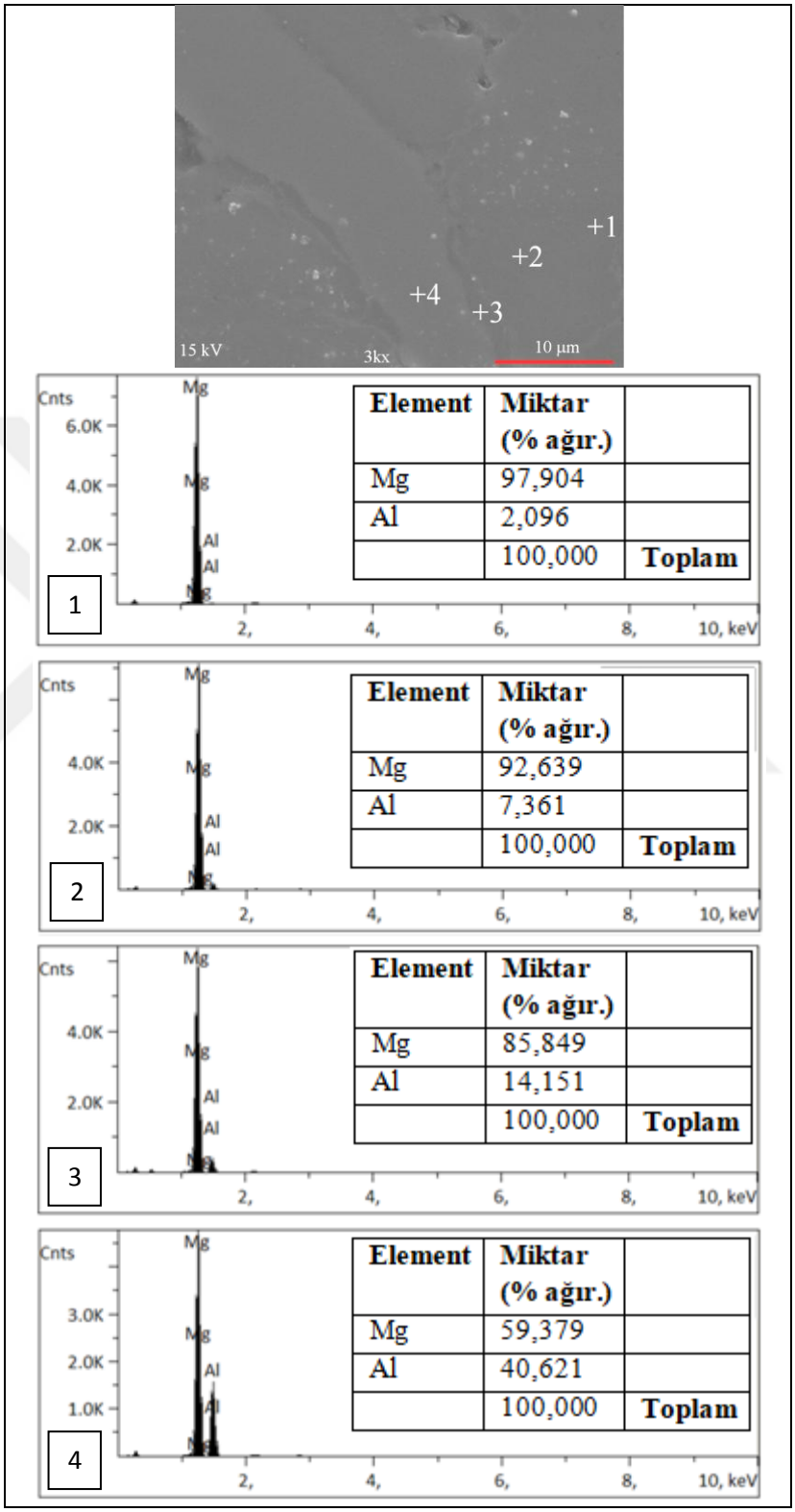
şekilde görülebilmektedir. Özellikle Mg ile Al arasındaki önemli çözünürlük miktarları bu durum üzerinde etkili rol oynamaktadır.



Şekil 6.19. Mg50Al50 partikülleri ile Mg matris arasında etkileşimin net bir şekilde ortaya konduğu dağlanmış konumda optik mikroskop görüntüleri, (a) 10X, (b) 20X büyütme

Mg50Al50 partikülleri ile Mg matris arasındaki etkileşimin incelenmesi amacıyla EDX analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.20'de verilmiştir. Analizlerden de görüldüğü gibi takviye fazından matrise Al difüzyonu gerçekleşmiştir. Partiküllerden uzak noktada Al içeriği %2 seviyelerinde tespit edilmiştir. Arayüzeyde ise Al oranı yaklaşık %15 değerlerine ulaşmıştır. Dolayısıyla kompozit bir yapı üzerinden

partikül takviye etkisinin yanında Al difüzyonu ile matris dayanımında da artışa ekstra bir katkı sağlayacak durum oluşmuştur.



Element	Miktar (% ağır.)	
Mg	97,904	
Al	2,096	
	100,000	Toplam

Element	Miktar (% ağır.)	
Mg	92,639	
Al	7,361	
	100,000	Toplam

Element	Miktar (% ağır.)	
Mg	85,849	
Al	14,151	
	100,000	Toplam

Element	Miktar (% ağır.)	
Mg	59,379	
Al	40,621	
	100,000	Toplam

Şekil 6.20. Mg matris ile Mg50Al50 partikülleri arasında oluşan bölgelerin EDX analizi sonuçları

6.2. Yoğunluk Sonuçları

Magnezyum endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulanan en düşük yoğunluklu metalik yapısal malzeme olarak kabul edilir. Bu nedenle magnezyum esaslı bir malzemenin dizaynı sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisinin yoğunluk olduğu söylenebilir. Dolayısıyla başarılı bir şekilde farklı bileşime sahip magnezyum malzemelerinin üretiminin ardından ilk yapılması gereken testlerden birisi de yoğunlukların belirlenmesidir. Doğaldır ki magnezyuma ilave edilecek tüm metalik elementler ile yoğunluk değerlerinde bir artış olacaktır. Tez kapsamında elde ettiğimiz kompozisyonlara göre ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

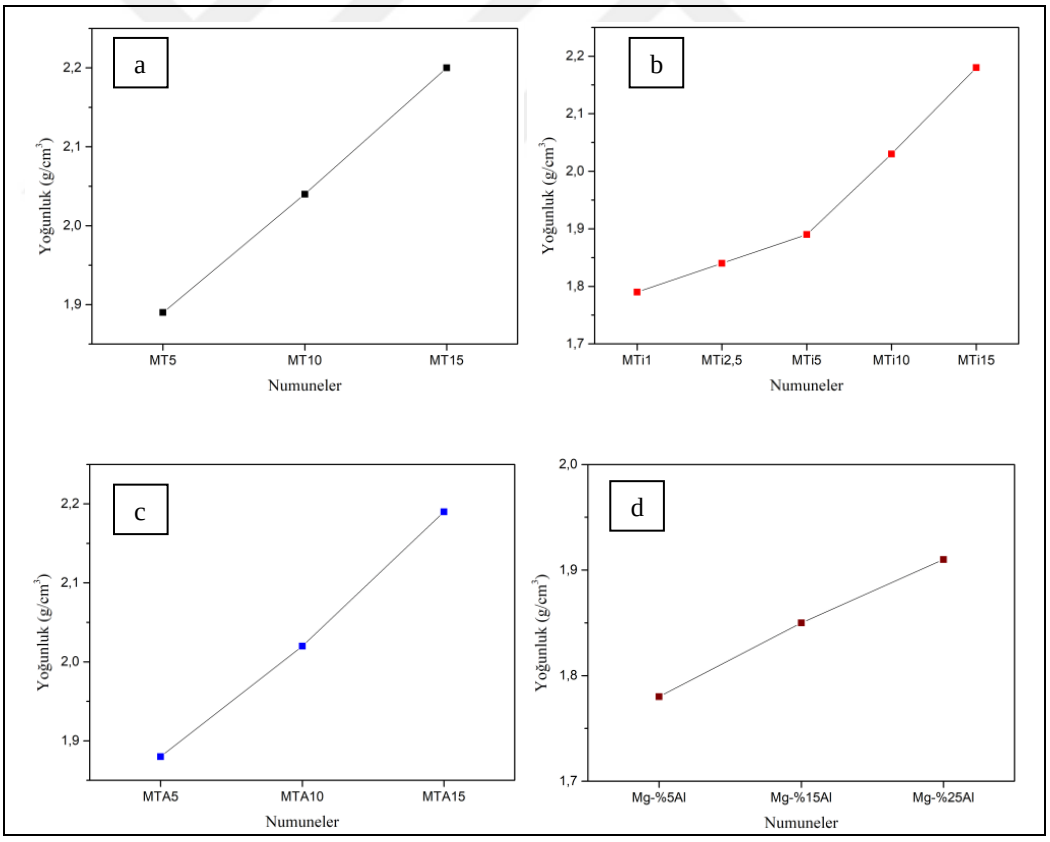
Yoğunluklarda meydana gelen artışın daha net izlenebilmesi içinde değerler grafik üzerinden Şekil 6.21'de verilmiştir. Karşılaştırma sırasında önem arz etmesi açısından teorik yoğunlukların bilinmesinde fayda vardır. Saf Mg'nin yoğunluğu 1,74 g/cm^3, saf titanyum 4,50 g/cm^3, Ti6Al4V alaşımı 4,42 g/cm^3 ve Mg50Al50 alaşımı 2.22 g/cm^3 teorik yoğunluk değerine sahiptir. Bu değerler ile yola çıkılarak üretilen malzemelerin Ti, Ti6Al4V ve Mg50Al50 oranındaki artışıyla birlikte numunelerin yoğunluğunun da arttığı gözlemlenmiştir. Magnezyum üzerinde yapılan benzer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kawamori vd. yaptığı çalışmada magnezyum matris içerisine 5, 10 ve 15 oranlarında (% kütlece) yapılan SiC ilavesi ile alaşım yoğunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir [109]. Yoğunluk sonuçlarından göze çarpan bir nokta, tüm bileşimler sonucunda elde edilen yoğunluk değeri saf alüminyumun yoğunluğundan düşük çıkmıştır. Verilen bu değer dayanımı yüksek yeni bileşime sahip magnezyumun mevcut diğer düşük yoğunluklu malzemeler ile karşılaştırma açısından değer taşımaktadır. Tablodan ayrıca daha düşük yoğunluğa sahip olan Ti6Al4V alaşımı ilavesi ile elde edilen yoğunluk değerlerinin saf titanyum ilavesine göre az da olsa daha düşük olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir durum olarak kabul edilmektedir.

Tablo 6.1. Üretilen kompozit malzemelerin kompozisyonu ve yoğunlukları

Numune	Kompozisyon	Yoğunluk g/cm^3
Saf Mg	-	1,74
MTi1	Mg-1%Ti (145 μm)	1,79

Tablo 6.1. (Devam) Üretilen kompozit malzemelerin kompozisyonu ve yoğunlukları

MTi2,5	Mg-2,5%Ti (145 µm)	1,84
MTi5	Mg-5%Ti (145 µm)	1,89
MTi10	Mg-10%Ti (145 µm)	2,03
MTi15	Mg-15%Ti (145 µm)	2,18
MT5	Mg-5%Ti (60 µm)	1,89
MT10	Mg-10%Ti (60 µm)	2,04
MT15	Mg-15%Ti (60 µm)	2,20
MTA5	Mg-5%Ti6Al4V (140 µm)	1,88
MTA10	Mg-10%Ti6Al4V (140 µm)	2,02
MTA15	Mg-15%Ti6Al4V (140 µm)	2,19
MgAl 5	Mg-5%Al	1,78
MgAl 15	Mg-15%Al	1,85
MgAl 25	Mg-25%Al	1,91



Şekil 6.21. Yoğunluk ölçümü sonucu elde edilen değerler (a) ince boyutlu Titanyum ilavesi, (b) kaba boyutlu Titanyum ilavesi, (c) Ti6Al4V alaşımı ilavesi ve (d) $Mg_{50}Al_{50}$ alaşımı ilavesi.

6.3. Sertlik Testi Sonuçları

Saf magnezyumun dayanımının arttırılmasına yönelik yapılan titanyum partikül takviyesi ve Mg50Al50 alaşımı ilavesi ile elde edilen malzemelerin sertlik değerlerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Saf titanyum ve Ti6Al4V alaşımının saf magnezyuma göre sahip oldukları yüksek sertlik değeri ile elde edilen numunelerde sertlik artışı gözlenmiştir. Partikül şeklinde yapıya ilave edilen saf titanyum tozları, Ti6Al4V alaşım tozlarının sertliğe katkılarını daha sağlıklı belirlemek amacıyla sertlik testi olarak Brinell yöntemi seçilmiştir. Mg50Al50 alaşım tozu takviyeli magnezyumlarda ise Vickers sertlik yöntemi seçilmiştir. Saf magnezyum için 40 HB olarak belirlenen sertlik değerleri artan partikül takviyesi ile etkili bir şekilde artış göstermiştir. Elde edilen Brinell sertlik değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Mg50Al50 ön alaşımlı partiküller içeren magnezyum numunenin sertlikleri Vickers sertlik testi ile belirlenmiş ve tabloya ilave edilmiştir. Sonuçlardan değişen partikül boyutu ile sertlikte etkili bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Artan partikül boyutu ile takviye elemanı gibi hareket eden titanyum partiküllerden sertliğe daha fazla katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen farklı bileşimler ile literatürdeki farklı çalışmalar karşılaştırılmış ve sertlikteki etkili artış özellikle Mg/Al ön alaşımlı toz ilavesi sonrası net bir şekilde gözlenmiştir.

Tablo 6.2. Elde edilen kompozit malzemelerin Brinell sertlik sonuçları

Numune	HB	Toz Boyutu
Saf Mg	40	
MTi 1	45	145 µm
MTi 2,5	46	
MTi 5	47	
MTi 10	51	
MTi 15	62	
MT 5	48	60 µm
MT 10	53	
MT 15	58	
MTA 5	48	Ti6Al 140 µm
MTA 10	52	
MTA 15	60	
Numune	HV	
MgAl 5	54	60 µm
MgAl 15	88	
MgAl 25	95	

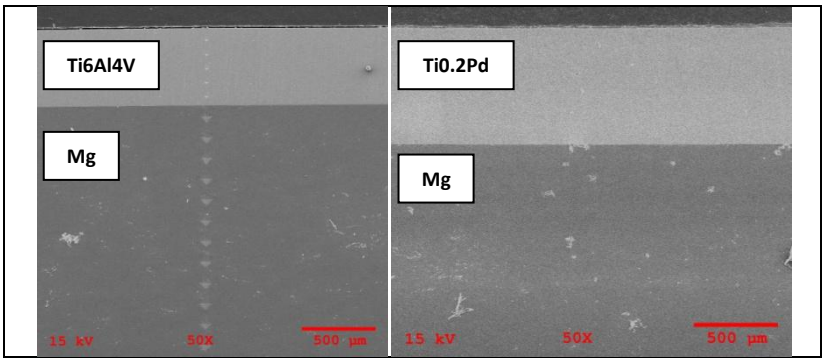
Lei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada saf magnezyumu sıcak pres cihazında, 550°C'de 30 MPa basınçta ve 4 saat sürede sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Yüzeyden ölçtükleri sertlik sonucu 49,6 HB değeri elde etmişlerdir [110]. Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sinterleme parametreleri olarak 5 MPa basınçta 620°C'de ve 10 dakika seçmişler ve sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Döküm saflığındaki magnezyumdan 32 HB sertlik değeri elde etmişlerdir [111].

Tablo 6.3. Literatürdeki sertlik değerleri

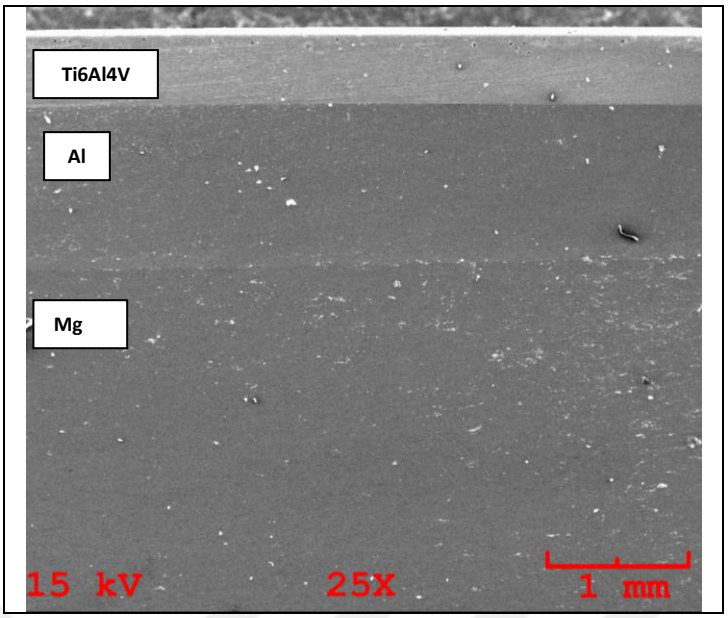
Sertlik	Sonuçlar	Açıklama
Aniruddha Das[78]	45	Microhardness (HV)
Shigehiro Kawamori[109]	38	HV
H.Y. Wang[111]	32	HB
Güleryüz F.[112]	38	HB
YizaoWan[113]	37	HV
Yamanoğlu R.[114]	35	HV
ZHENG Wei-chao[115]	37,5	Microhardness (HV)

6.4. Sıcak Pres ile Kaplama İşlemleri

Saf magnezyumun yine saf titanyum, Ti6Al4V alaşımı ve $Mg_{50}Al_{50}$ intermetalik partikül takviyesi ile dayanım değerlerinin arttırılmasının ardından aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yine titanyum esaslı kaplamalar yapılmıştır. Titanyum esaslı kaplamalar için Ti6Al4V alaşımı ve Ti0.2Pd alaşımı seçilmiştir. İlave olarak yapılan kaplama işlemlerinde titanyum ile magnezyum arasındaki bağlantı mukavemetini arttırmak için titanyum ile magnezyum arasında alüminyum ara katman ilave edilerek kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan farklı kaplamalara ait görüntüler Şekil 6.22'de verilmiştir.

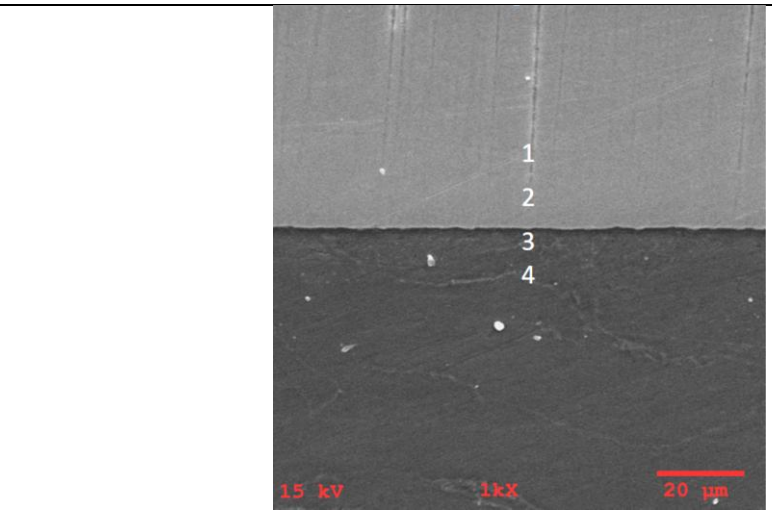


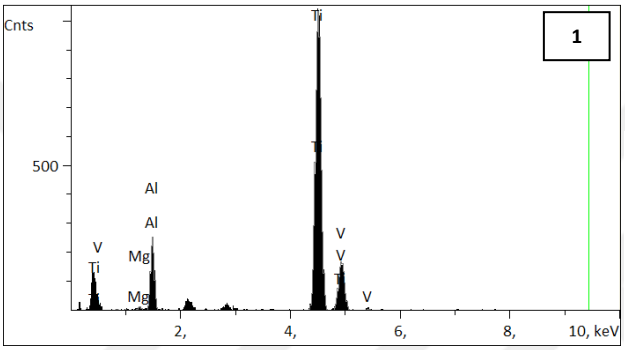
Şekil 6.22. Tez kapsamında uygulanan kaplamaların SEM görüntüleri



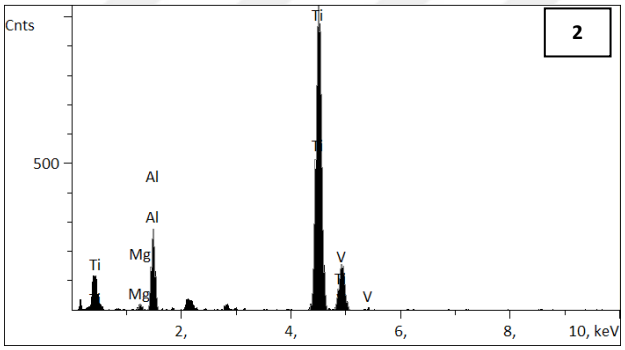
Şekil 6.22. (Devam) Tez kapsamında uygulanan kaplamaların SEM görüntüleri

Sıcak pres ile kaplama işleminin ardından kaplama malzemeleri ile altlık arasındaki etkileşimler taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş yapılan haritalama ve çizgi analizleri ile desteklenmiştir. Şekil 6.23'te magnezyum üzerine yapılan Ti6Al4V alaşımı kaplaması sonrasında elde edilen arayüzeyin SEM görüntüsü ve arayüzey boyunca farklı noktalardan alınan EDX nokta analiz sonuçları verilmiştir. EDX analizlerinden magnezyumun titanyum kaplama tarafında da bir miktar çözündüğü görülmektedir. Saf titanyum arasındaki çözünürlüğün çok az olmasına rağmen arayüzeye yakın ve biraz daha uzak olan bölgeden alınan nokta analizleri göstermiştir ki Mg Ti6Al4V alaşımı içinde bulunan alüminyum üzerinden titanyum içinde kısa mesafede difüze olmuştur. Arayüzeyden yapılan haritalama ve çizgi analizlerinde bu ilişkiyi destekler niteliktedir. Yakın bir bölgeden alına SEM görüntüsü üzerinde yapılan haritalama ve çizgi analizi sonuçları Şekil 6.24'te gösterilmiştir. 1. Durumda alüminyum titanyum içersine difüze olmuştur. 2. Durumda Ti_3Al intermetaliği 3. Durumda $TiAl_3$ intermetaliği görülmektedir. 4. Durumda Al kafesi içerisinde Ti çözündüğü belirlenmiştir. Tüm yapının içerisinde V atomları kısmi olarak çözülmüştür.

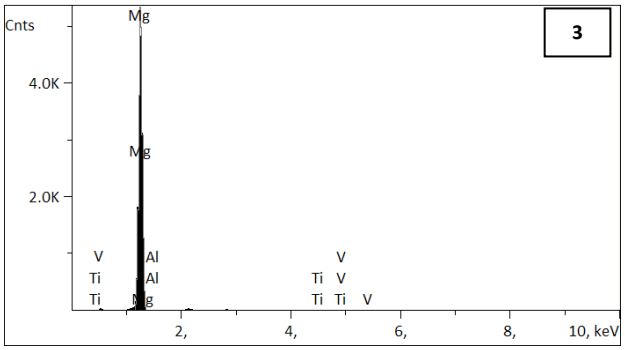




Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Mg	0,888	0,479	
Al	12,893	7,722	
Ti	83,441	88,658	
V	2,777	3,140	
	100,000	100,000	**Toplam**

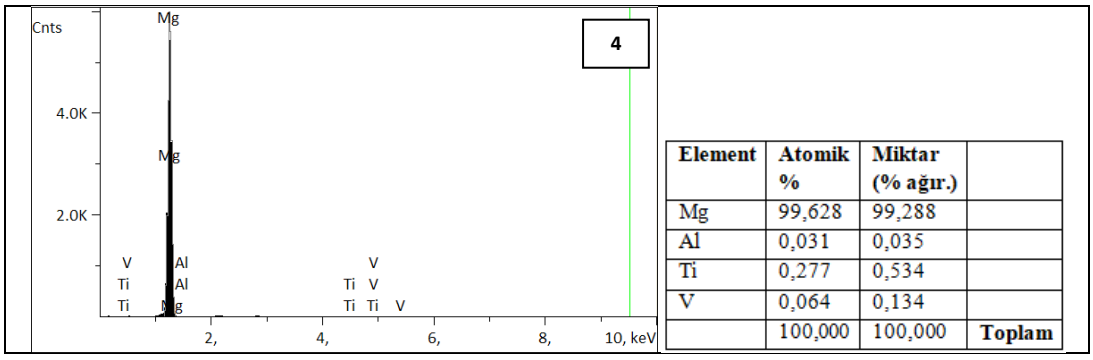


Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Mg	1,304	0,709	
Al	13,907	8,394	
Ti	83,219	89,108	
V	1,570	1,789	
	100,000	100,000	**Toplam**



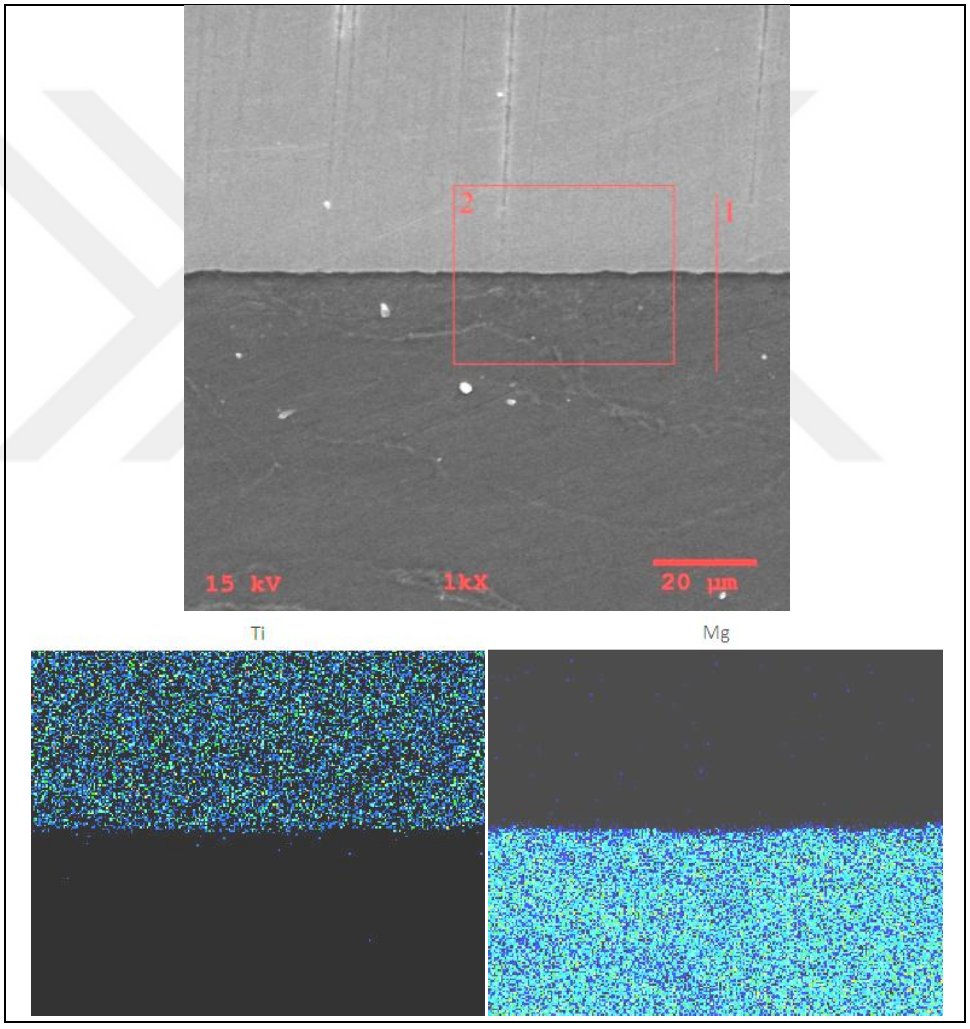
Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Mg	99,474	99,029	
Al	0,069	0,077	
Ti	0,456	0,895	
V	0,000	0,000	
	100,000	100,000	**Toplam**

Şekil 6.23. Mg üzerine Ti6Al4V kaplanması, SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDX analizleri

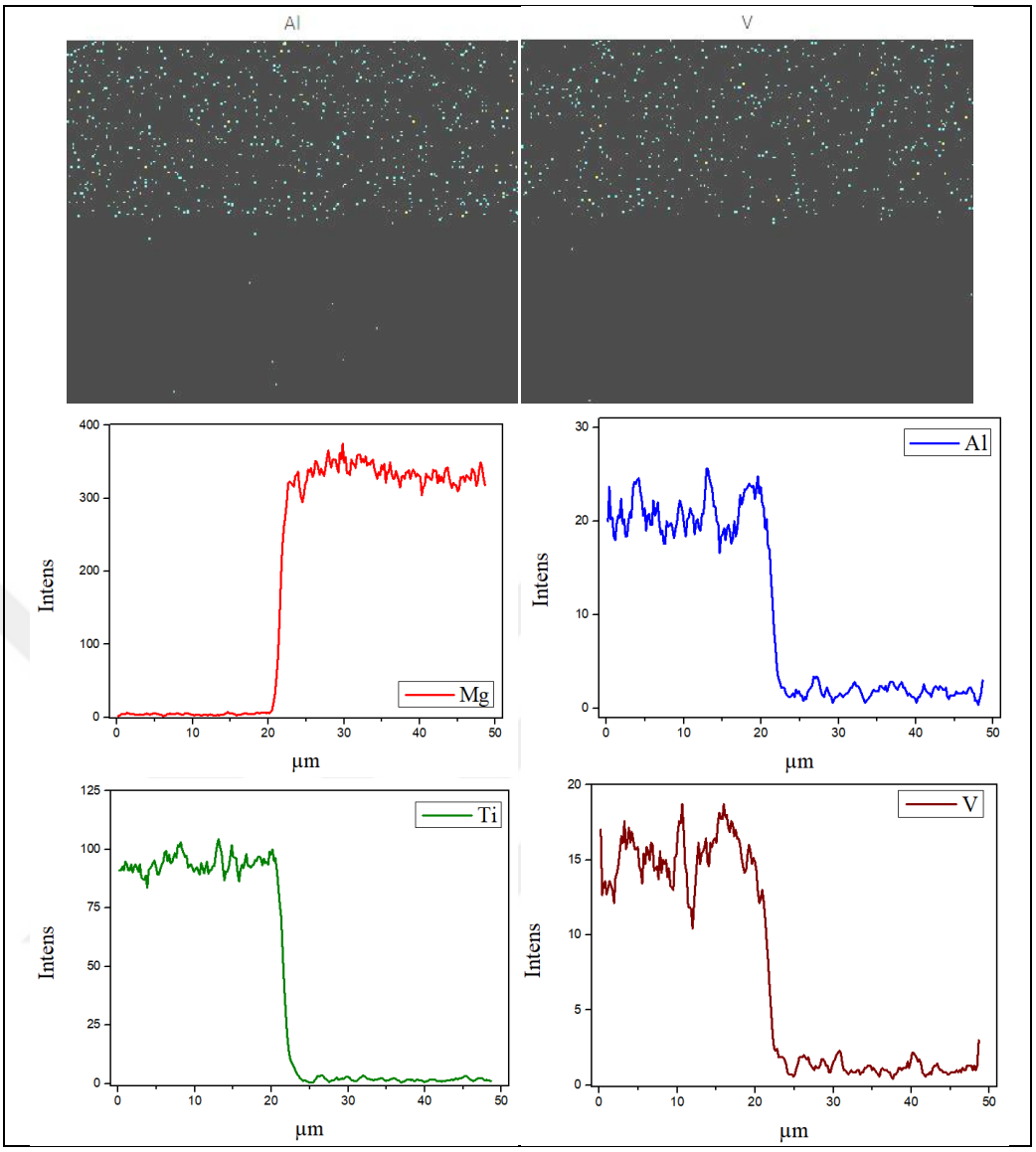


Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Mg	99,628	99,288	
Al	0,031	0,035	
Ti	0,277	0,534	
V	0,064	0,134	
	100,000	100,000	**Toplam**

Şekil 6.23. (Devam) Mg üzerine Ti6Al4V kaplanması, SEM görüntüsü ve farklı noktalardan alınan EDX analizleri

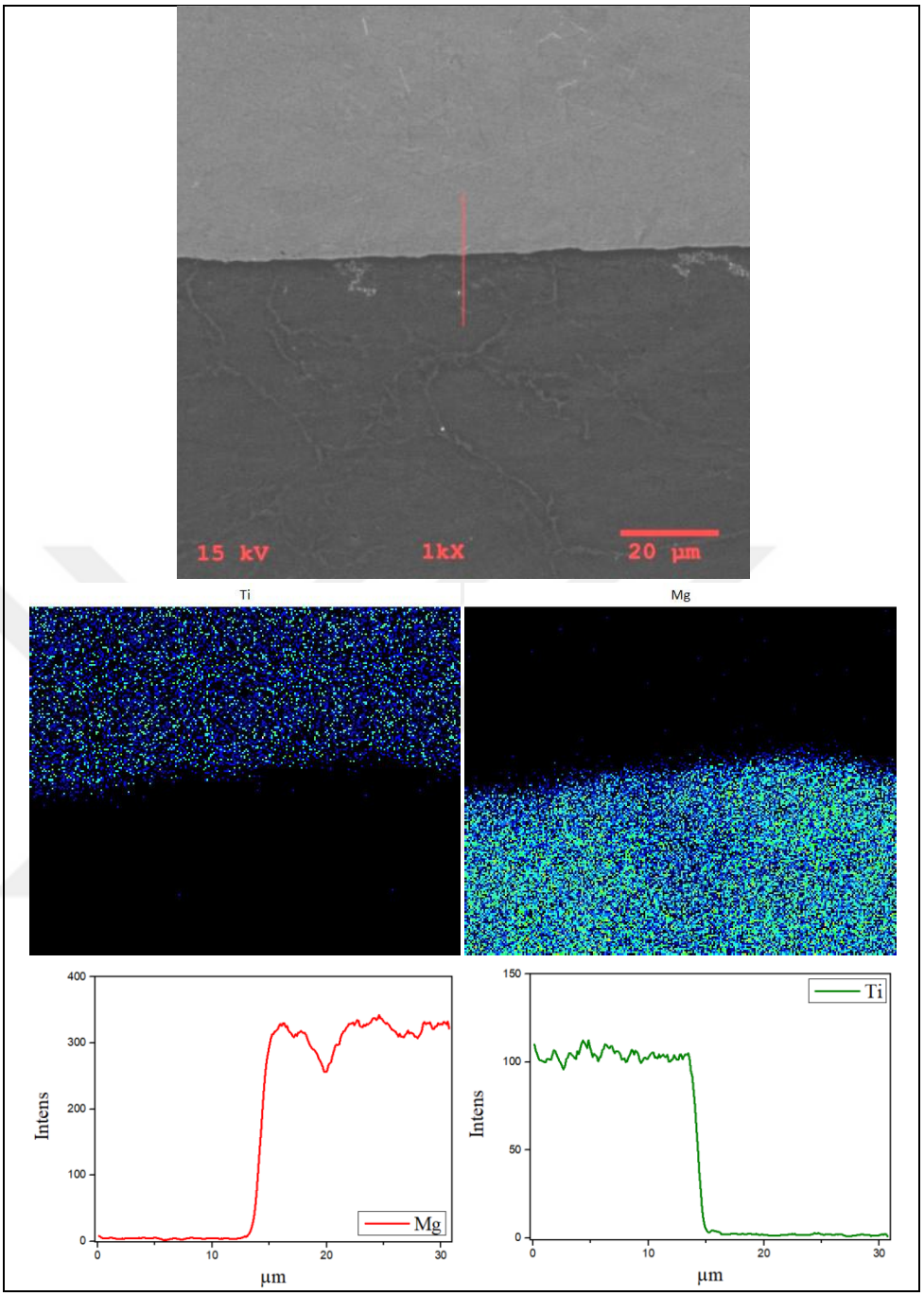


Şekil 6.24. Ti6Al4V–Mg arayüzeyinde yapılan haritalama ve çizgi EDX analizi



Şekil 6.24. (Devam) Ti6Al4V–Mg arayüzeyinde yapılan haritalama ve çizgi EDX analizi

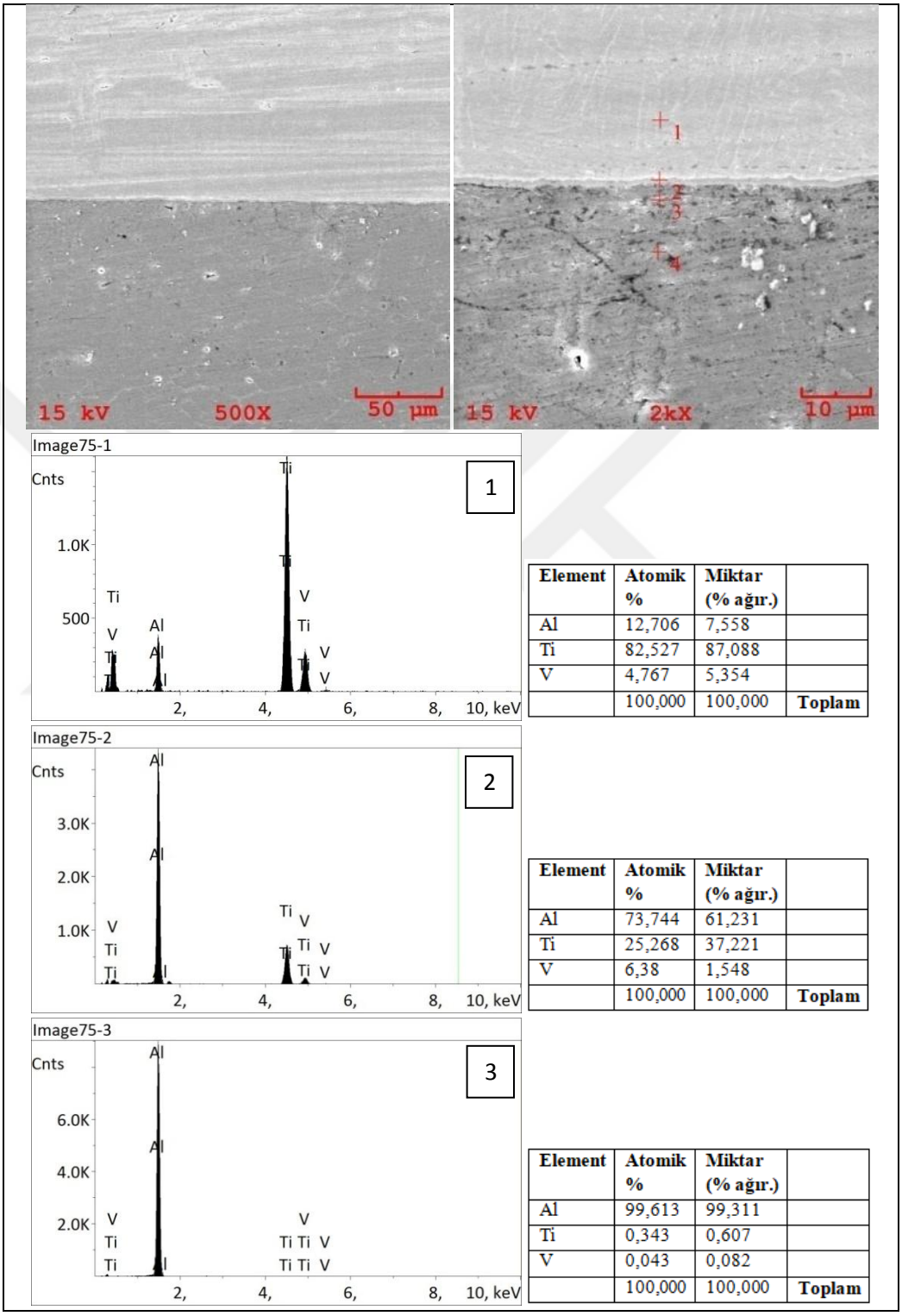
Ti0.2Pd alaşımı ile saf magnezyumun kaplanması sürecinde de arayüzeyde bir ayrılma görülmemiştir. Ti6Al4V alaşımı ile elde edilen arayüzey etkileşimi bu kaplamada görülmemiştir. Arayüzeyde hem yapılan haritalama hem de çizgi analizi ile keskin bir geçiş olduğu görülmektedir (Şekil 6.25).



Şekil 6.25. Ti0.2Pd–Mg arayüzeyinde yapılan haritalama ve çizgi EDX analizi

Ti0.2Pd alaşımının aksine Ti6Al4V alaşımı ile elde edilen daha geniş bir arayüzey bölgesi elde edilmesinin ardından Ti6Al4V alaşımı ile Mg arasına bir geçiş bölgesi oluşturacak ve arayüzeyde daha sağlam bir etkileşim oluşturması açısından alüminyum katman ilave edilmiştir. Şekil 6.26'da verilen SEM görüntüsünde Ti6Al4V alaşımı ile alüminyum arasında oluşan arayüzey bölgesi net bir şekilde

görülmektedir. Yapılan EDX nokta analizleri de 1 ve 4 bölgeleri için artan Al içeriğini göstermektedir.

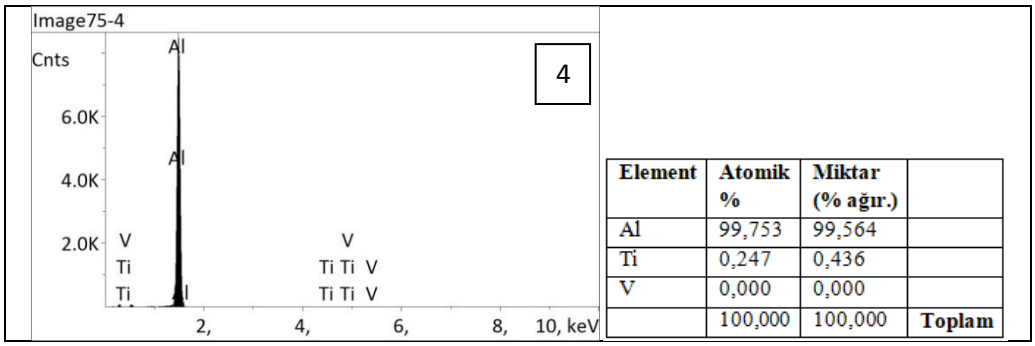


Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Al	12,706	7,558	
Ti	82,527	87,088	
V	4,767	5,354	
	100,000	100,000	**Toplam**

Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Al	73,744	61,231	
Ti	25,268	37,221	
V	6,38	1,548	
	100,000	100,000	**Toplam**

Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Al	99,613	99,311	
Ti	0,343	0,607	
V	0,043	0,082	
	100,000	100,000	**Toplam**

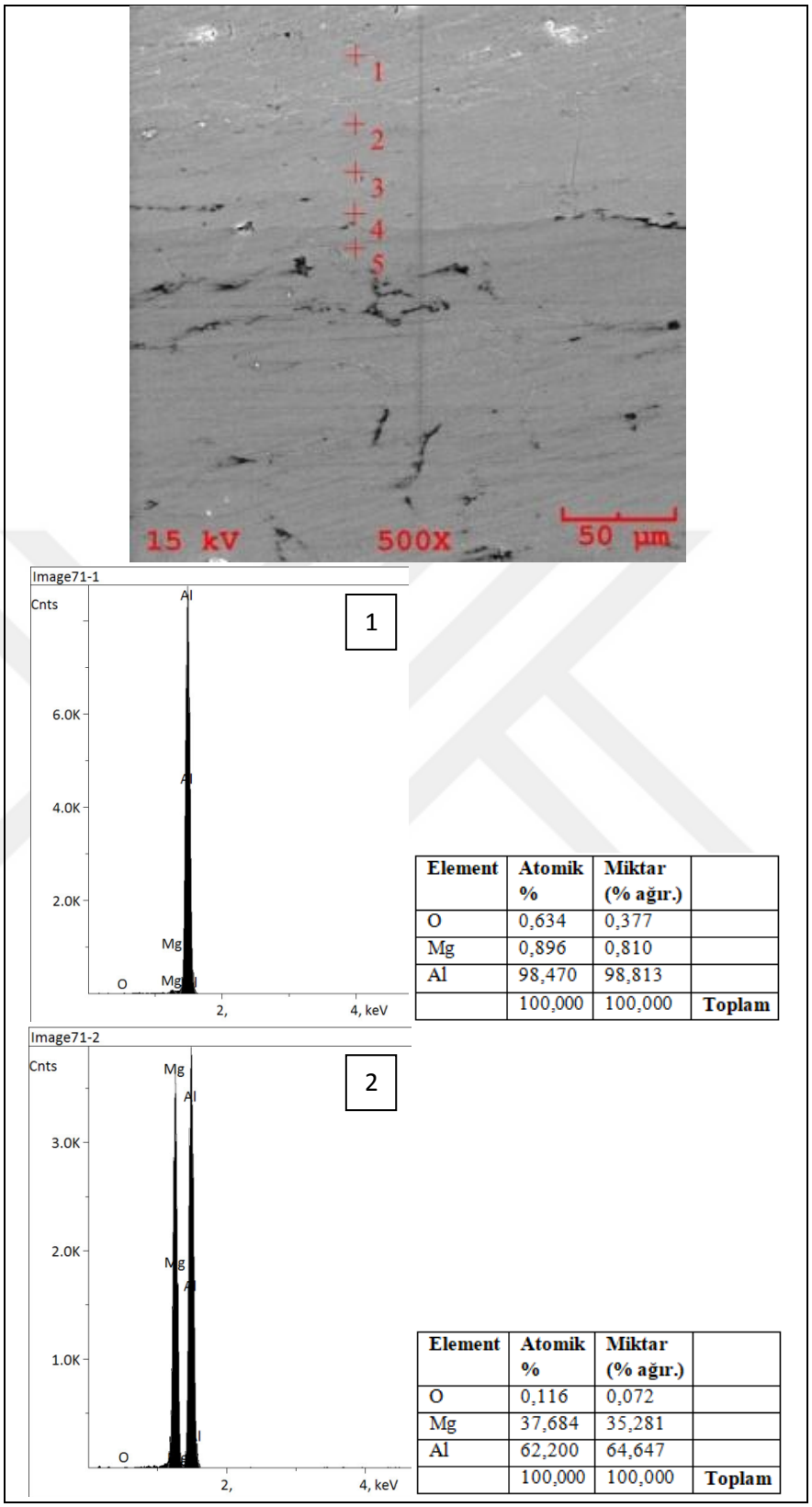
Şekil 6.26. Ti6Al4V-Al-Mg katmanlı yapısı üzerinde Ti6Al4V-Al arayüzeyi SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri



Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
Al	99,753	99,564	
Ti	0,247	0,436	
V	0,000	0,000	
	100,000	100,000	Toplam

Şekil 6.26. (Devam) Ti6Al4V-Al-Mg katmanlı yapısı üzerinde Ti6Al4V-Al arayüzeyi SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri

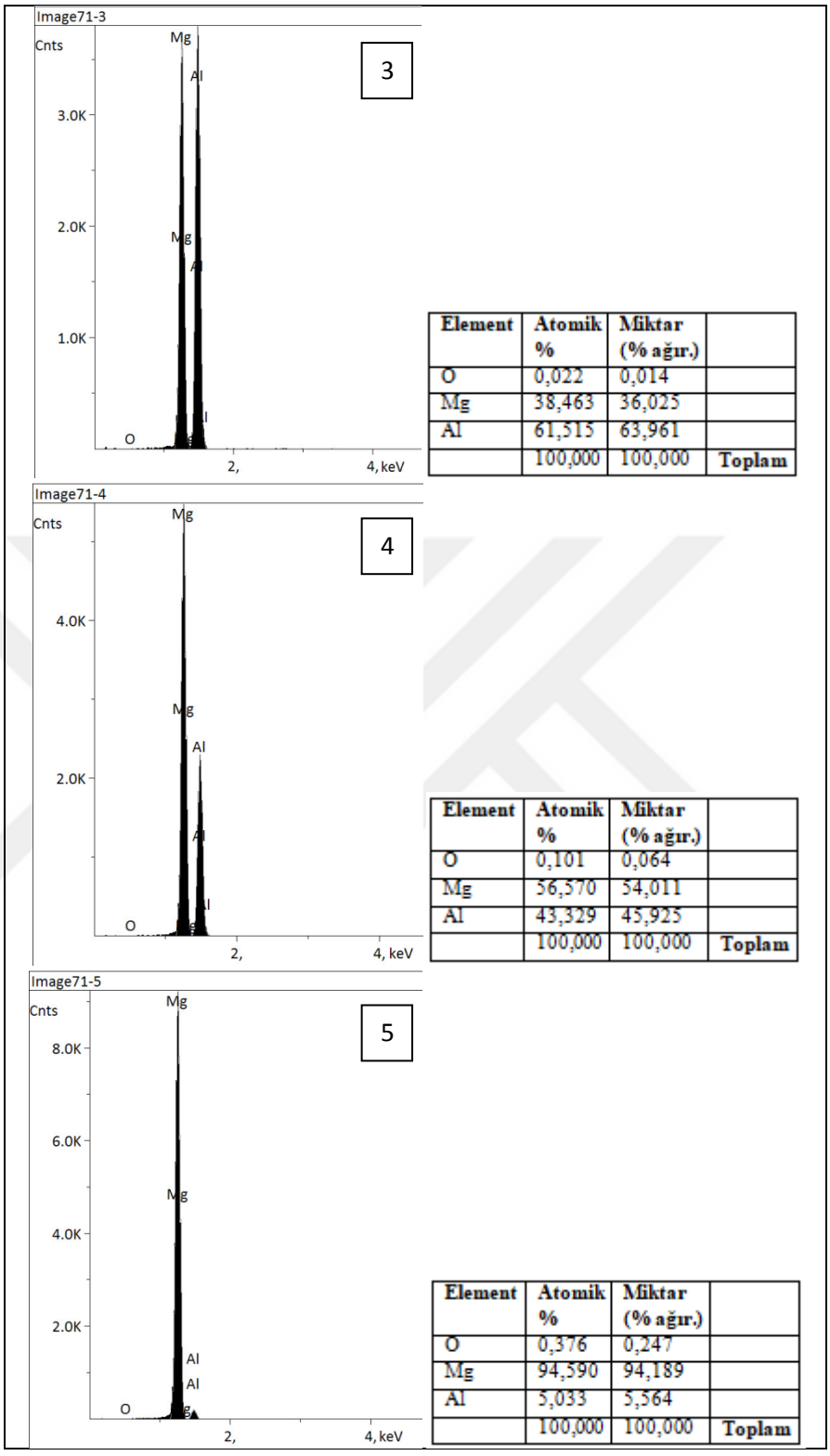
Ti6Al4V alaşımı ile alüminyum arasında bulunan çözünürlük üzerinden elde edilen arayüzey bölgesinin benzeri alüminyum ile magnezyum arasında da elde edilmiştir. Benzer şekilde arayüzeyden alınan SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları Şekil 6.27'de verilmiştir. Saf alüminyum bölgesinden magnezyum bölgesine geçişte elementel oranlardaki değişim net bir şekilde EDX analizi sayesinde ortaya konmuştur. 1 ve 5 nolu bölgelerden alınan analizler magnezyum ile alüminyum arasında oluşan katı çözeltileri simgelemektedir. 2 ve 3 nolu bölgelerden alınan EDX analizleri ile elde edilen atomik oranlardan bu bölgedeki geçiş fazlarının Al_3Mg_2 intermetaliği olduğun göstermektedir. 4 nolu bölge ise yüksek miktarda Mg ve Al içeren alaşımların sahip olduğu en sıklıkla karşılaşılan Mg-Al intermetaliklerden olan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğini temsil etmektedir [116]. Bu doğrultuda Mg ile Al arasında etkili bir reaksiyon sonrası arayüzeyde farklı bileşimler oluşmuş ve EDX analizleri ile bu fazlar tanımlanmıştır.



Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
O	0,634	0,377	
Mg	0,896	0,810	
Al	98,470	98,813	
	100,000	100,000	**Toplam**

Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
O	0,116	0,072	
Mg	37,684	35,281	
Al	62,200	64,647	
	100,000	100,000	**Toplam**

Şekil 6.27. Al-Mg arayüzeyinin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX nokta analizleri



Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
O	0,022	0,014	
Mg	38,463	36,025	
Al	61,515	63,961	
	100,000	100,000	Toplam

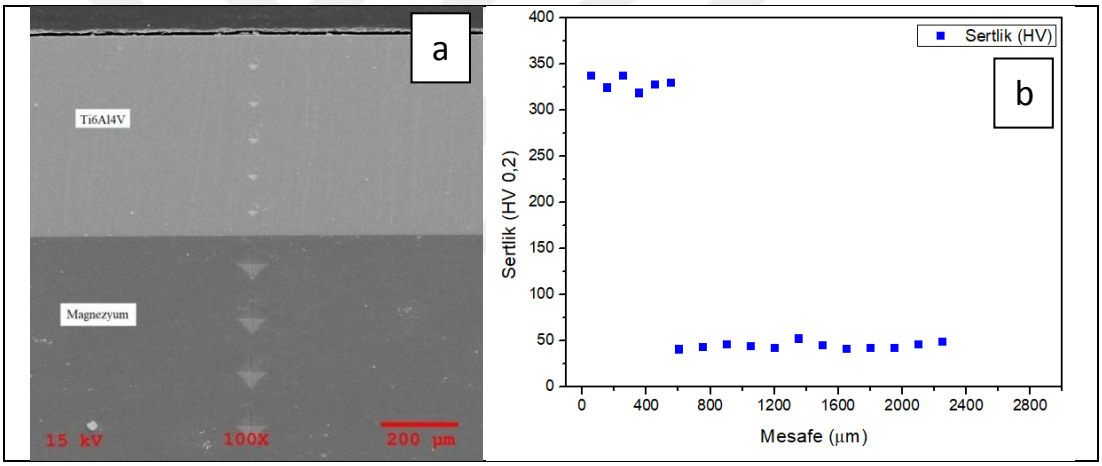
Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
O	0,101	0,064	
Mg	56,570	54,011	
Al	43,329	45,925	
	100,000	100,000	Toplam

Element	Atomik %	Miktar (% ağır.)	
O	0,376	0,247	
Mg	94,590	94,189	
Al	5,033	5,564	
	100,000	100,000	Toplam

Şekil 6.27. (Devam) Al-Mg arayüzeyinin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX nokta analizleri

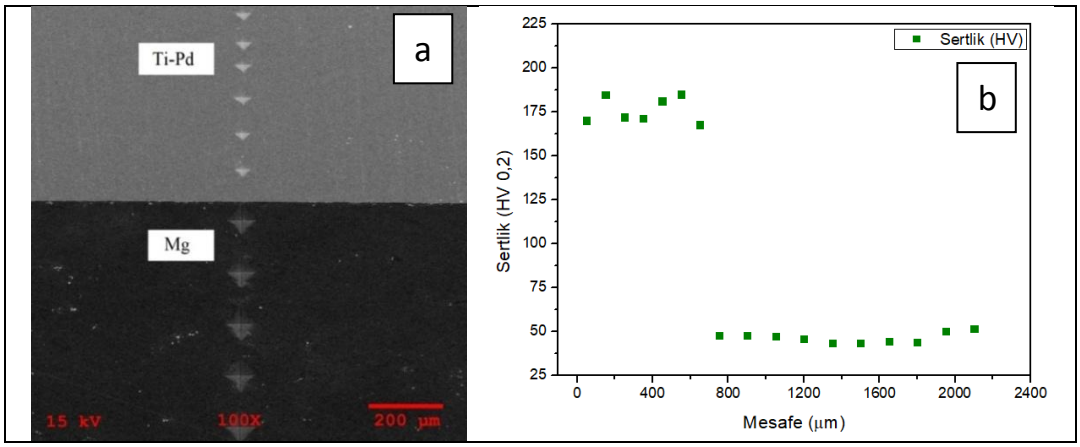
Tez kapsamında farklı malzemeler ile üretilen başarılı kaplamaların bu aşamadan sonra sertlik ve aşınma testleri sonrasında özellikleri belirlenmiştir. İlk olarak

kaplamaların sertlik değerleri belirlenmiştir. Kaplamaların sertlik ölçümleri Vickers testi ile 0,2 kg yük uygulayarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.28'de ilk olarak Ti6Al4V alaşımı ile kaplanmış magnezyumun sertlik testi sonuçları SEM görüntüsü ile birlikte verilmiştir. SEM görüntüsünden kaplama ile altlık malzeme arsındaki sertlik izleri de görülebilmektedir. Ti6Al4V alaşımından oluşan kaplamanın sertliği ortalama 330 HV iken saf magnezyumun sertliği ise 44,7 HV olarak tespit edilmiştir. Hem kaplama malzemesinde hem de altlık malzemesinde homojen bir yapının sonucu olarak sertlik testleri de benzer değerler ortaya koymuştur. Rocha vd. yaptığı çalışmada döküm Ti6Al4V alaşımının ve ticari saflıktaki Ti'nin ısıl işlem ile Vickers sertliğindeki değişimler incelemişlerdir. Isıl işlem öncesi Ti6Al4V numunesinden aldıkları deney sonucunda ortalama 340,51 Vickers sertlik değeri elde etmişlerdir [117].



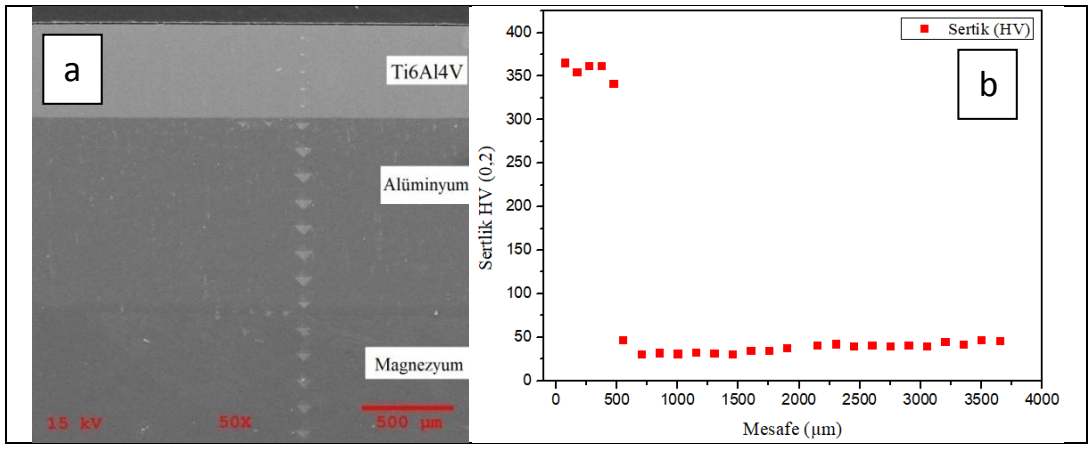
Şekil 6.28. (a) Saf Mg üzerinde Ti6Al4V kaplamanın SEM görüntüsü (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim

İkinci olarak titanyum esaslı kaplamanın (Ti0.2Pd) SEM görüntüsü ve elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.29'da sunulmuştur. Ti6Al4V alaşımındaki gibi sertlik ölçümünde 0,2 kg yük kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımına göre daha zayıf mekanik özelliklere sahip olan bu kaplamanın sertliği ortalama 176 HV olarak tespit edilirken, saf magnezyumun sertliğinde kayda değer bir değişim meydana gelmemiştir. Hem Ti6Al4V hem de TiPd alaşımı ile magnezyum arasındaki sınırlı çözünürlük nedeniyle sertlikte meydana gelen değişimlerde keskin bir geçişe sahip olmuştur.



Şekil 6.29. (a) Saf Mg üzerinde Ti0.2Pd kaplamanın SEM görüntüsü (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim

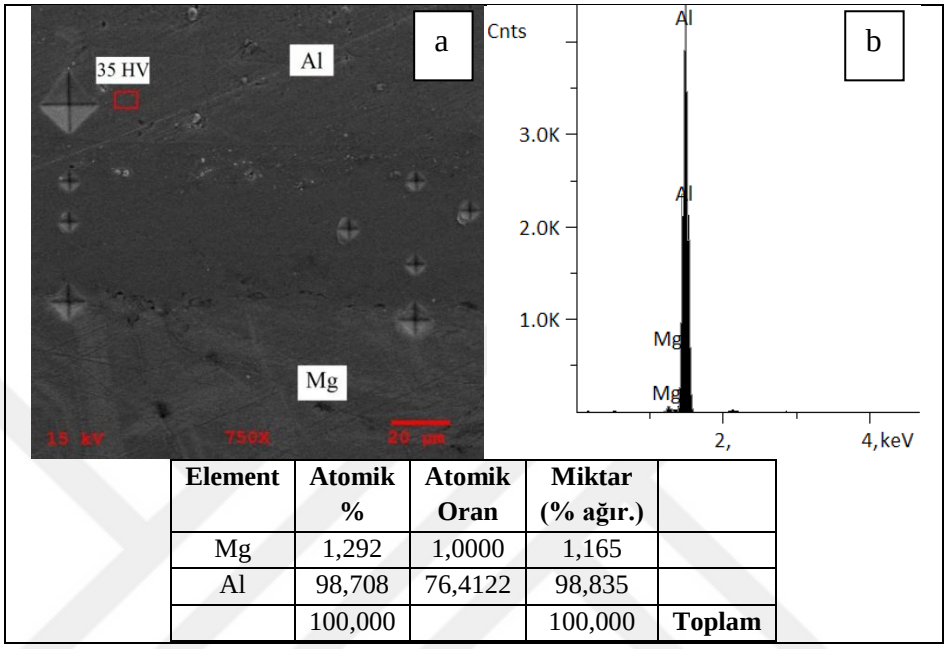
Geçiş bölgelerinde farklı reaksiyonların oluştuğu alüminyum ara katmanla ile elde edilen kaplamanın sertlik değerleri ve SEM görüntüsü Şekil 6.30'da verilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri alüminyum katman kullanılmadan elde edilen sertlik değerleri ile örtüşmektedir. Döküm Ti6Al4V sertlik sonuçları ortalama 357 HV, Alüminyum ortalama sertlik değeri 32 HV ve saf magnezyum ortalama 42,3 HV sertlik değerine sahiptir. Alüminyum daha düşük sertlik elde edilmesi, katmanlı üretim sürecinde alüminyum tozların daha fazla sıcaklığa maruz kalarak tane kabalaşmasına uğramasına bağlanmıştır [118].



Şekil 6.30. (a) Ti6Al4V-Al-Mg numunenin SEM görüntüsü ve (b) Mesafeye bağlı olarak sertlikteki değişim

Yine de katman geçişleri arasında farklı sertlik değerleri ölçülmüş ve sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir. İlk olarak alüminyum bölgesine yakın bölgeden alınan sertliklerin hangi bileşime ait olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.31'de alüminyum tarafından alınan bir sertlik testi sonrası elde edilen SEM görüntüsü ve EDX analizi

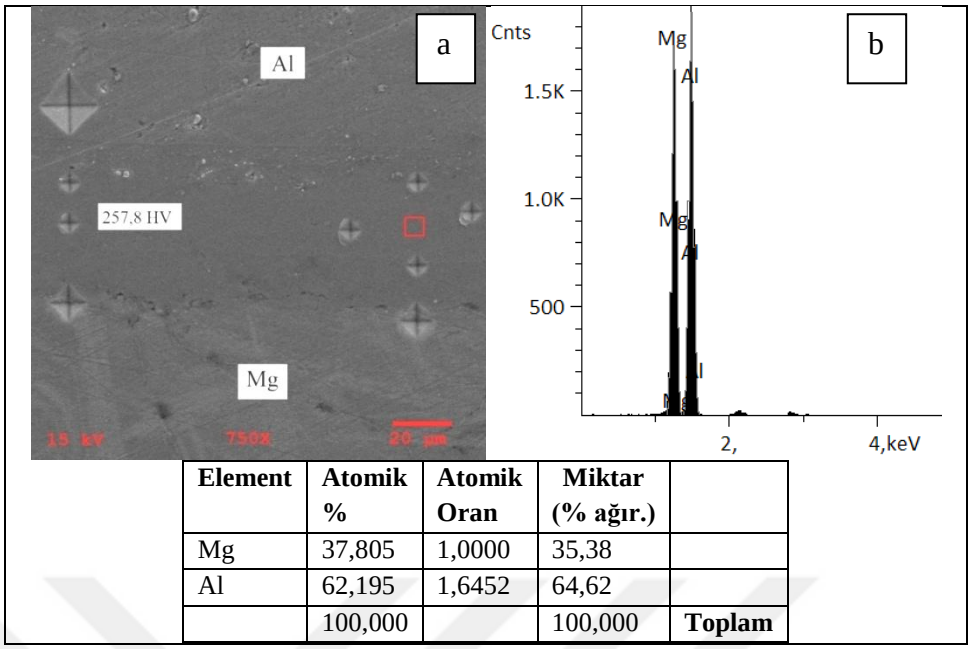
veriliştir. Al kafesi içerisine kısmi olarak Mg çözünmesiyle birlikte oluşan α-Al fazının 35 HV sertlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu noktadan alınan EDX analizine göre alaşımın kompozisyonu %98,8 Al ve %1,2 Mg olarak belirlenmiştir.



Element	Atomik %	Atomik Oran	Miktar (% ağır.)	
Mg	1,292	1,0000	1,165	
Al	98,708	76,4122	98,835	
	100,000		100,000	**Toplam**

Şekil 6.31. (a) Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri

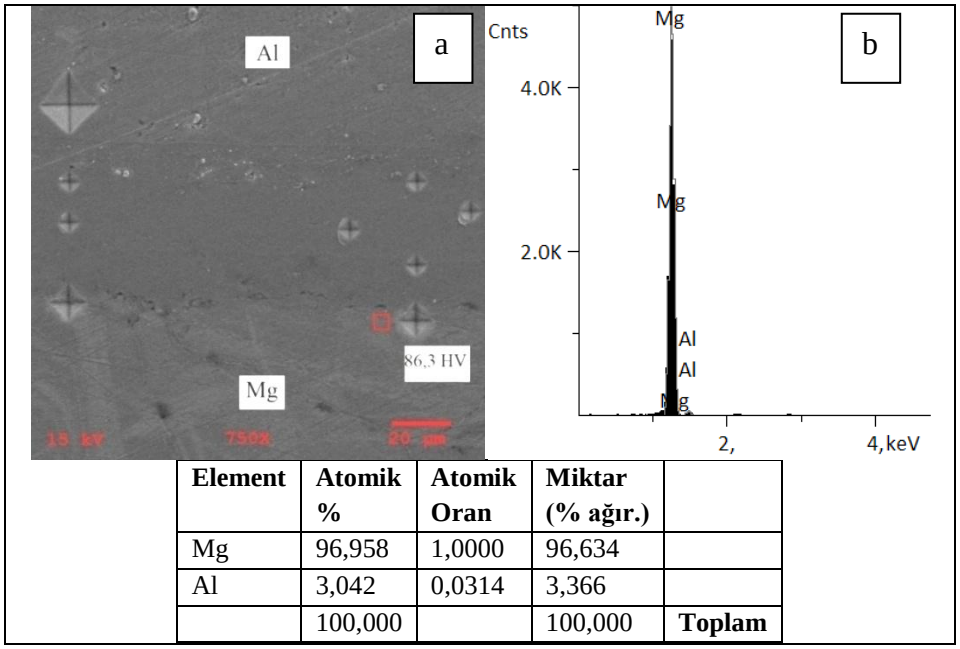
Sertlik ölçümlerinde bazı değerler Mg ve Al ara geçiş bölgelerinde oldukça yüksek değerler ortaya koymuştur. 257,8 HV olarak belirlenen sertliğin elde edildiği bölgenin SEM görüntüsü ve bu noktadan alınan EDX analizi sonuçları Şekil 6.32'da verilmiştir. Al-Mg diyagramının ötektiğin sol tarafından gelen ve β fazı olarak adlandırılan Al_3Mg_2 yapısı ile birlikte sertlikte yüksek bir artış gözlenmiştir. Oluşan faz % ağırlıkça 64,62 Al ve 35,38 Mg içerdiği belirlenmiştir (Şekil 6.32). Al-Mg faz diyagramına bakıldığında bu oranın β fazına denk geldiği görülmektedir. Faz ortalama 257,8 HV sertlik değerine sahiptir. Das vd. yaptığı çalışmada Al-Mg arasındaki oluşan fazı belirlemek için geniş bir aralıkta β fazını (Al_3Mg_2) ve ona kıyasla dar bir aralıkta ϒ fazını ($Al_{12}Mg_{17}$) elde etmişlerdir [119].



Element	Atomik %	Atomik Oran	Miktar (% ağır.)	
Mg	37,805	1,0000	35,38	
Al	62,195	1,6452	64,62	
	100,000		100,000	**Toplam**

Şekil 6.32. Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri

Yine farklı bir sertlik değeri magnezyum tarafında elde edilmiştir. Alüminyumun magnezyum içerisinde yaklaşık %3,5 oranında çözünmesiyle sertlik değeri geçiş bölgesinde 88,3 HV değerine yükselmiştir (Şekil 6.33).



Element	Atomik %	Atomik Oran	Miktar (% ağır.)	
Mg	96,958	1,0000	96,634	
Al	3,042	0,0314	3,366	
	100,000		100,000	**Toplam**

Şekil 6.33. Al ile Mg arasında farklı sertlik bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ve (b) bileşim tayini için EDX analizleri

6.5. Aşınma Test Sonuçları

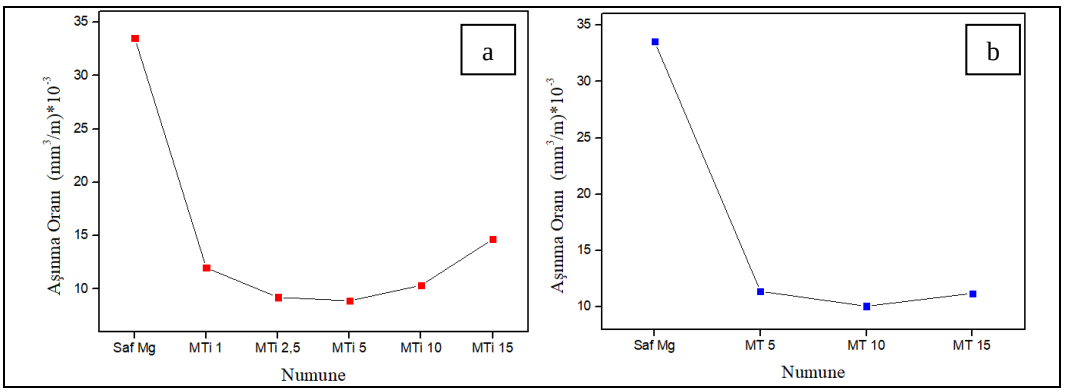
Tez kapsamında hem partikül takviyeli hem de yüzeyleri kaplanmış magnezyumun aşınma özellikleri incelenmiştir. Aşınma testleri ilk olarak titanyum partikül takviyeli magnezyum numunelerine uygulanmıştır. Tablo 6.4'de farklı titanyum ve Mg50Al50 partikül ilavesine bağlı olarak aşınma testlerinde elde edilen değerler verilmiştir. Aşınma sonrası elde edilen aşınma oranı sonuçları değerlendirildiğinde aşınma dirençlerinde belli bir titanyum partikül takviyesi oranına kadar artış olduğu gözlenmiştir. Saf magnezyum için 33,53 $(mm^3/m)x10^{-3}$ olan aşınma oranı Mg-5Ti (145 µm) içeriğinde 8,9 $(mm^3/m)x10^{-3}$ değerine düşmüştür. 60 µm Ti partikül boyutu ile takviye edildiğinde de aşınma direncinde artış görülmüştür (Şekil 6.34). Fakat kaba boyutlu titanyum partiküllerine göre daha az bir direnç artışı kaydedilmiştir. Genel olarak bakıldığında titanyum aşınma özellikleri zayıf olan bir malzemedir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi titanyumun üzerinde oluşan oksit tabakası ile ilgilidir. Oksit tabakası altlık malzemeye sıkı bir şekilde bağlanamamakta ve sürtünme sırasında aşınma özelliklerini zayıflatarak malzeme kaybını arttırmaktadır. Sonuçlara baktığımızda aşınma oranındaki artışın sebebi, azalan partikül boyutuna benzer şekilde ince boyutlu partiküllerin kaba boyutlu partiküllere kıyasla yüksek yüzey enerjilerine sahip olmasından dolayı daha fazla oksit içermesidir. Bu da aşıma sırasında daha önce bahsedilen sebeplerden dolayı aşınma direncinde olumsuz etki oluşturacaktır. Ti6Al4V alaşımı partikülleri içeren malzemede ise aşınma oranları en düşük seviyede ölçülmüştür. Ti6Al4V partiküllerinin diğer saf titanyum partiküllerine göre kaba boyutları ve bu sayede içerdikleri oksijen seviyelerinin daha az olması ve ayrıca daha önemlisi Ti6Al4V alaşımının saf titanyuma göre daha yüksek sertlikte olması aşınma direncindeki artışın en önemli sebepleri olarak gösterilebilmektedir.

Son olarak Mg50Al50 alaşımı partikülleri içeren malzemede aşınma oranları belirlenmiştir. Ti ve Ti6Al4V takviyesi kadar etkili bir aşınma direnci ortaya konmamıştır. Ancak saf magnezyumun aşınma oranına göre 33,53 $(mm^3/m)x10^{-3}$ Mg50Al50 partikül takviyesinin artması ile bir aşınma direnci oluşmaya başlamıştır. Mg50Al50 intermetalik partikülleri takviye fazı şeklinde dayanımı arttırarak kompozit benzeri bir yapı oluşumu sağlamışlardır. Ayrıca bu intermetalik partiküller ile saf magnezyum matris arasındaki etkileşim ile oluşan yeni fazlar ile matris

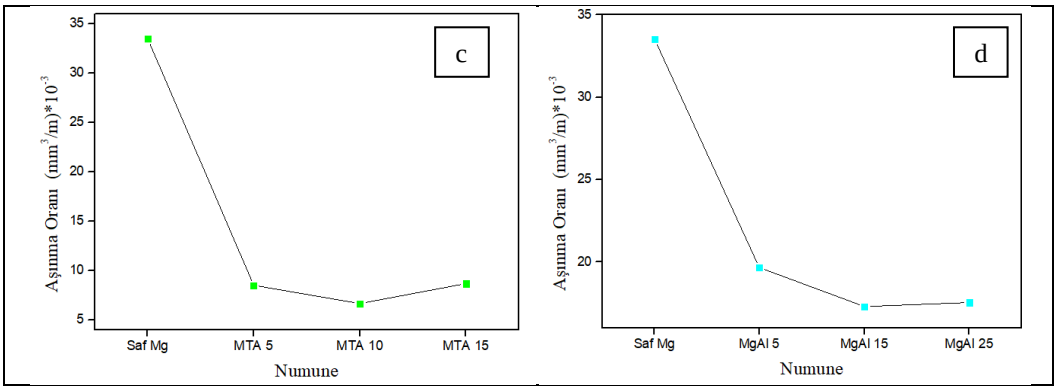
dayanımı da arttırılmıştır. Bu da aşınma direncinde gelişmeye sebep olmuştur. Şekil 6.34' te numune aşınma oranı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.4. Titanyum partikül takviyeli magnezyum esaslı malzemelerin aşınma sonuçları

Numune	Kompozisyon	Aşınma Oranı $(mm^3/m)*10^{-3}$
Saf Mg	Mg	33,53
MTi 1	Mg-1%Ti	11,99
MTi 2,5	Mg-2,5%Ti	9,23
MTi 5	Mg-5%Ti	8,90
MTi 10	Mg-10%Ti	10,35
MTi 15	Mg-15%Ti	14,66
MT 5	Mg-5%Ti	11,38
MT 10	Mg-10%Ti	10,07
MT 15	Mg-15%Ti	11,20
MTA 5	Mg-5%Ti6AL4V	8,51
MTA 10	Mg-10%Ti6AL4V	6,66
MTA 15	Mg-15%Ti6AL4V	8,68
MgAl 5	Mg-5%Al	19,66
MgAl 15	Mg-15%Al	17,30
MgAl 25	Mg-25%Al	17,54



Şekil 6.34. Numune - Aşınma oranı grafikleri a) kaba Ti partikül takviyeli b) ince Ti partikül takviyeli c) Ti6Al4V partikül takviyeli d) MgAl takviyeli

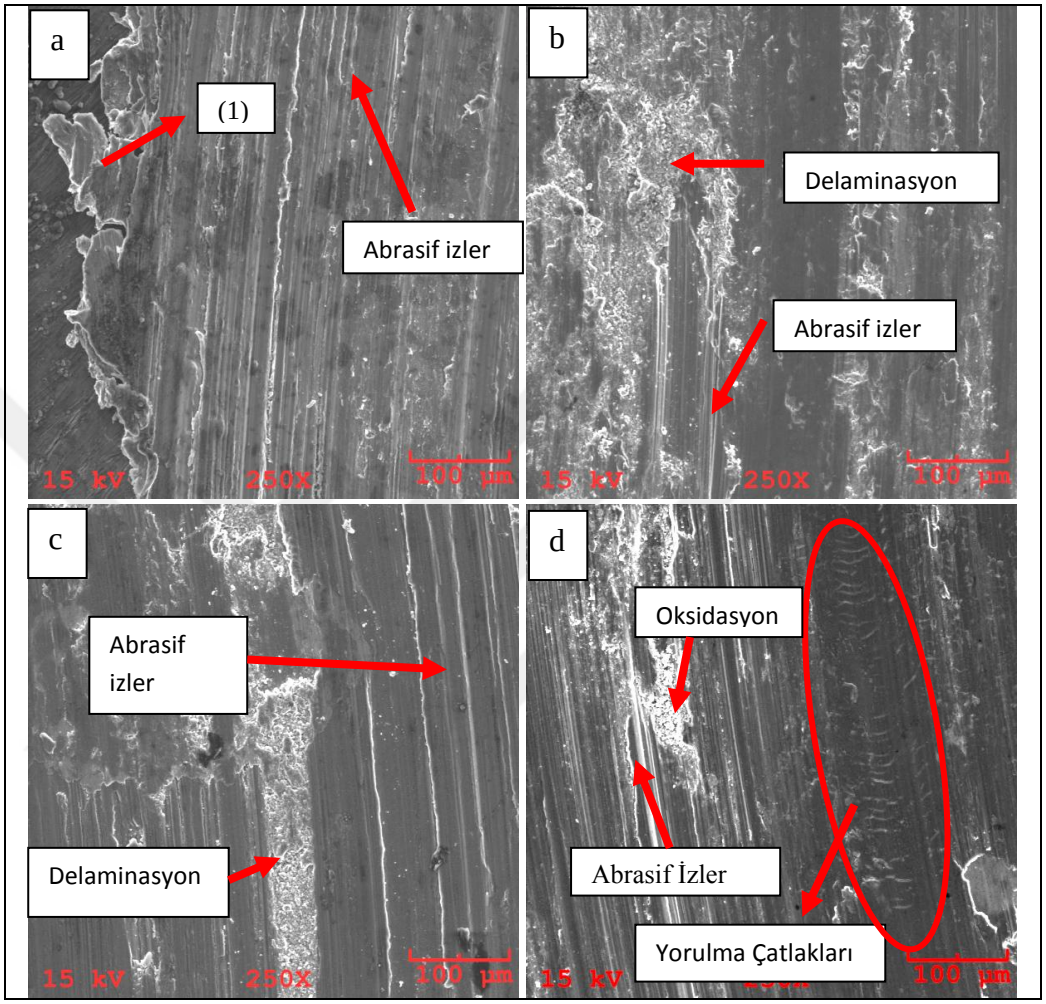


Şekil 6.34. (Devam) Numune - Aşınma oranı grafikleri a) kaba Ti partikül takviyeli b) ince Ti partikül takviyeli c) Ti6Al4V partikül takviyeli d) MgAl takviyeli

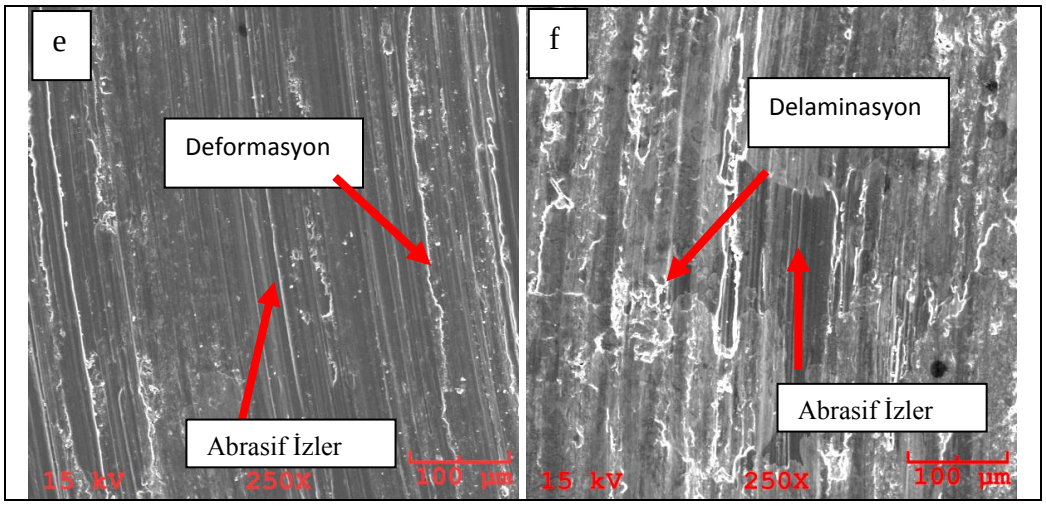
Magnezyumun yüksek oksijen afinitesi nedeniyle magnezyumun aşınma sonuçlarından yapıda oksidasyon görülmektedir. Aşınma sırasında bilya ile numune arasındaki sürtünmeden dolayı malzemede sıcaklık artışı olmakta ve bu da oksidasyona neden olmaktadır. Ball on disk ile yapılan deneylerde tek noktada yapılan temastan yapıda abrasif izler görülmektedir. Bu abrasif izler dönme yönü ile paralel şekilde olmaktadır. Abrasif izlere ek olarak yorulma gerilmesinden dolayı yapıda çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlarlar aşınma izine dik olacak şekilde görülmektedir. Çatlakların ilerlemesi ile birlikte yani aşınmanın devam ettiği sırada yapıda delaminasyon adı verilen mekanizma oluşmaktadır. Bu mekanizma yorulma çatlaklarının büyümesi ile birlikte aşınma sırasında yüzeyde parça kopmasına neden olmaktadır. Parçaların kopması malzeme kaybına neden olmaktadır. Saf magnezyum malzeme kaybının yüksek miktarda olduğu (11,4 g) Tablo 6.5' te görülmektedir. Lim vd. yaptıkları SiC partikül takviyeli magnezyum matrisli kompozit malzemelerde abrasif, oksidasyon, delaminasyon, adhezif ve termal yumuşama ergime olarak 5 farklı aşınma türünün olduğunu belirtmişlerdir. Bu aşınma türleri tek şekilde veya aynı anda birden fazla mekanizmanın var olduğunu göstermişlerdir [120].

Kaba boyutlu Ti takviyeli kompozit malzeme ve saf Mg'nin SEM görüntüsü Şekil 6.35' te verilmiştir. Saf Mg'nin görüntüsü incelendiğinde abrazif izler açıkça görülmektedir. Buna ek olarak aşınma izi sınırlarında yoğun deformasyona bağlı olarak yığılmalar görülmektedir (Şekil 6.35 (a) (1)). Bu yığılmalar oksidasyona uğrayarak yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu da malzeme kaybına neden olmaktadır. Şekil

6.35 (d)' de açık bir şekilde yorulma gerilmeleri görülmektedir. Yine aynı şekilde beyaz olan bölgenin oksidasyon bölgesi olduğu belirlenmiştir. Şekiller üzerinde aşınma mekanizmaları belirtilmiştir.

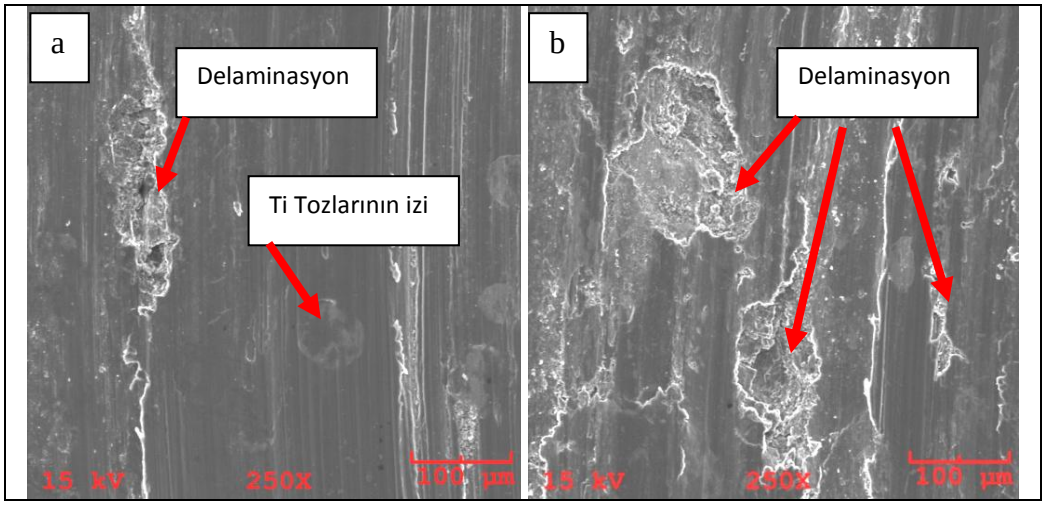


Şekil 6.35. SEM Görüntüleri (a) saf Mg'nin aşınma yüzeyi, (b) MTi 1'in aşınma yüzeyi, (c) MTi 2,5'in aşınma yüzeyi, (d) MTi 5'in aşınma yüzeyi, (e) MTi 10'un aşınma yüzeyi ve (f) MTi 15'in aşınma yüzeyi

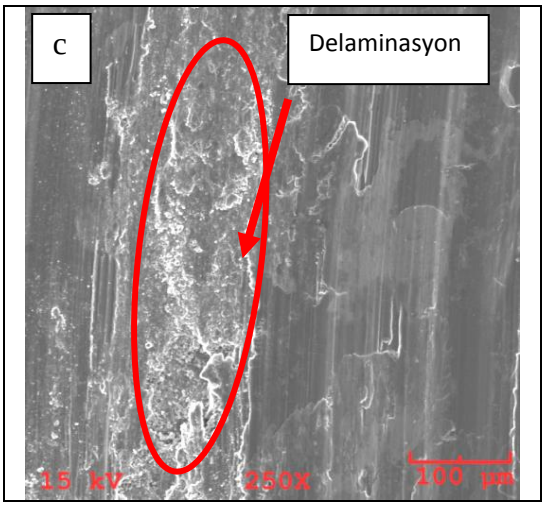


Şekil 6.35. (Devam) SEM Görüntüleri (a) saf Mg'nin aşınma yüzeyi, (b) MTi 1'in aşınma yüzeyi, (c) MTi 2,5'in aşınma yüzeyi, (d) MTi 5'in aşınma yüzeyi, (e) MTi 10'un aşınma yüzeyi ve (f) MTi 15'in aşınma yüzeyi.

İnce boyut Ti takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri Şekil 6.36' da verilmiştir. İnce boyut Ti takviyeli malzeme kaba ile benzer görüntüler elde edilmiştir. Ti partiküller ile magnezyum arasında bir bağlantı olmadığından dolayı yapıdan uzaklaşan partiküllerin izi açıkça belli olmaktadır (Şekil 3.36 (a)). Şekil üzerinden aşınma mekanizmaları belirtilmiştir.

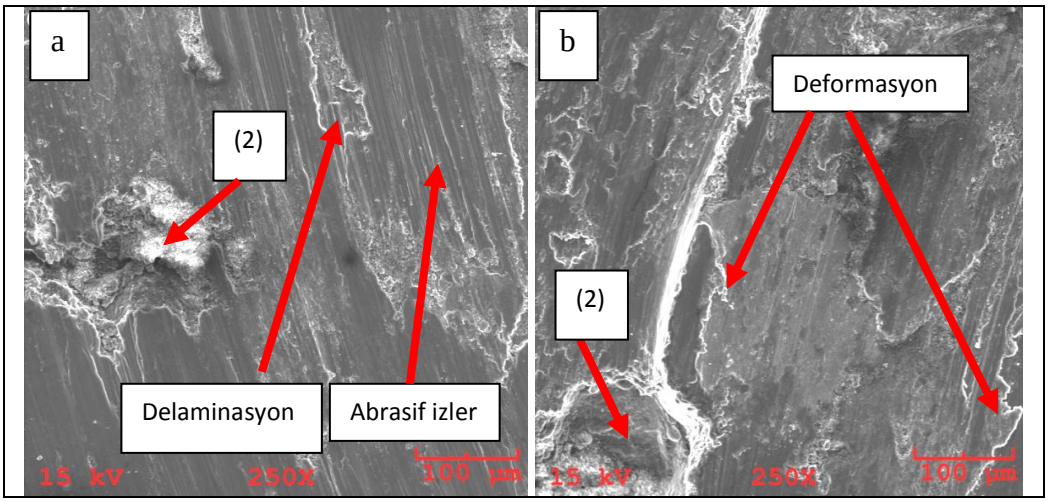


Şekil 6.36. SEM Görüntüleri (a) MT 5'in aşınma yüzeyi, (b) MT 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MT 15'in aşınma yüzeyi

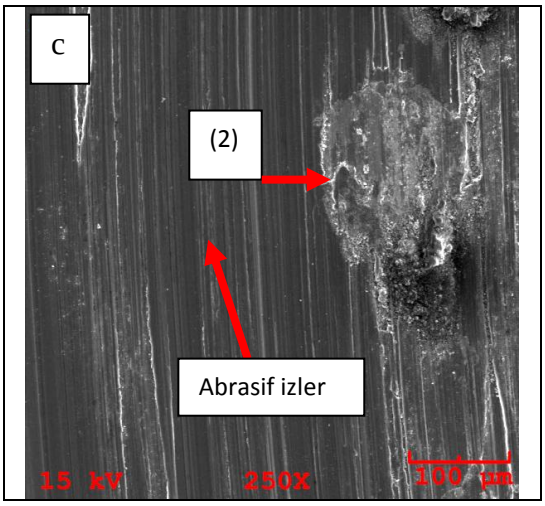


Şekil 6.36. (Devam) SEM Görüntüleri (a) MT 5'in aşınma yüzeyi, (b) MT 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MT 15'in aşınma yüzeyi

Ti6Al4V (MTA) takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri Şekil 6.37' de verilmiştir. Ti6Al4V ve Mg arasında oluşan kısmî geçişten dolayı partiküller yapıdan ayrılırken kopma şeklinde gerçekleşmiştir. Bu durum 3 mikroyapıda da açık şekilde görülmektedir. Abrasif izler ve deformasyon yöreleri de oldukça belirgindir. Deformasyon yöreleri oksidasyona uğrayarak yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu da malzeme kaybına neden olmaktadır. Şekiller üzerinde aşınma bölgeleri belirtilmiştir.

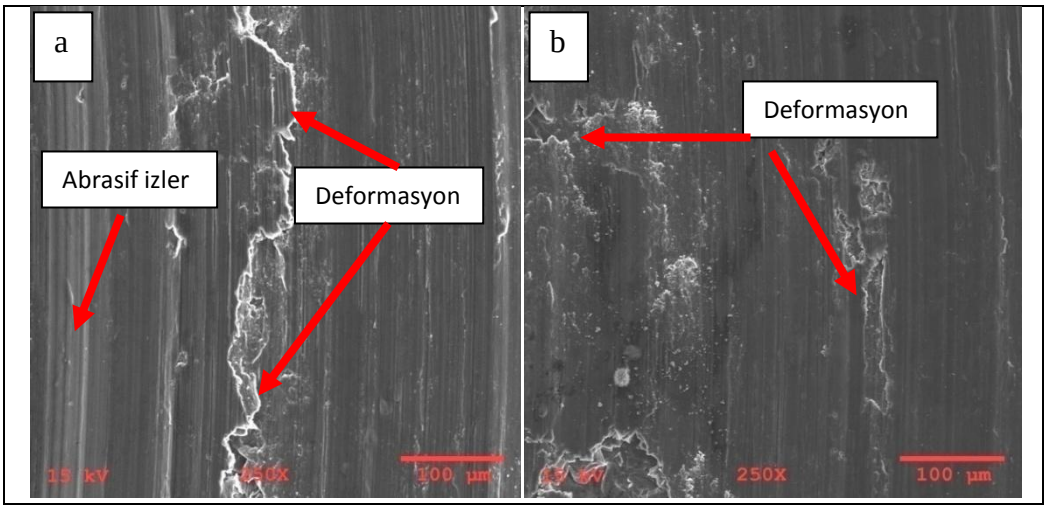


Şekil 6.37. SEM Görüntüleri (a) MTA 5'in aşınma yüzeyi, (b) MTA 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MTA 15'in aşınma yüzeyi

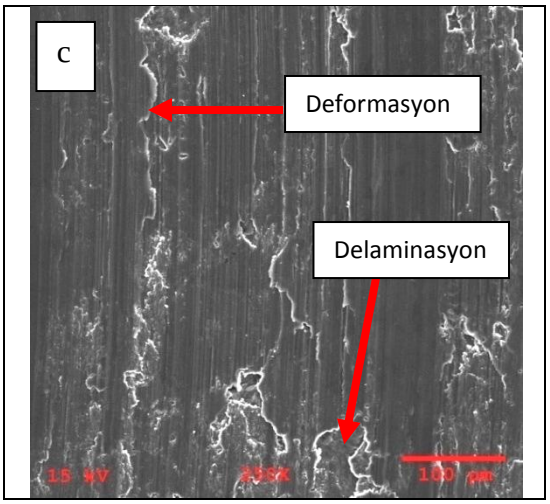


Şekil 6.37. (Devam) SEM Görüntüleri (a) MTA 5'in aşınma yüzeyi, (b) MTA 10'un aşınma yüzeyi ve (c) MTA 15'in aşınma yüzeyi

MgAl malzemenin SEM görüntüsü Şekil 6.38' de verilmiştir. Abrasif izler ve deformasyon yöreleri de oldukça belirgindir. Görüntülerden de görüleceği üzere sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan deformasyon yöreleri oksidasyona uğrayarak yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu da malzeme kaybına neden olmaktadır. Şekiller üzerinde aşınma bölgeleri belirtilmiştir. Mg50Al50 takviyesi ile birlikte titanyum partikül takviyesi kadar yüksek aşınma direnci kaydedilmemiş olsa da titanyum takviyesine göre düşük yoğunluk eldesi gibi etkenler göz önüne alındığı zaman aşınma direnci başarılı bir şekilde geliştirilmiştir.



Şekil 6.38. SEM Görüntüleri (a) MgAl 5'in aşınma yüzeyi, (b) MgAl 15'in aşınma yüzeyi ve (c) MgAl 25'in aşınma yüzeyi



Şekil 6.38. (Devam) SEM Görüntüleri (a) MgAl 5'in aşınma yüzeyi, (b) MgAl 15'in aşınma yüzeyi ve (c) MgAl 25'in aşınma yüzeyi

Kullanılan takviye elemanları ile birlikte ağırlık kaybının büyük oranda düştüğü görülmektedir. Bu da ilave edilen takviye elemanları ile birlikte magnezyumun aşınma özelliğinin geliştiği gözlemlenmiş ve başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

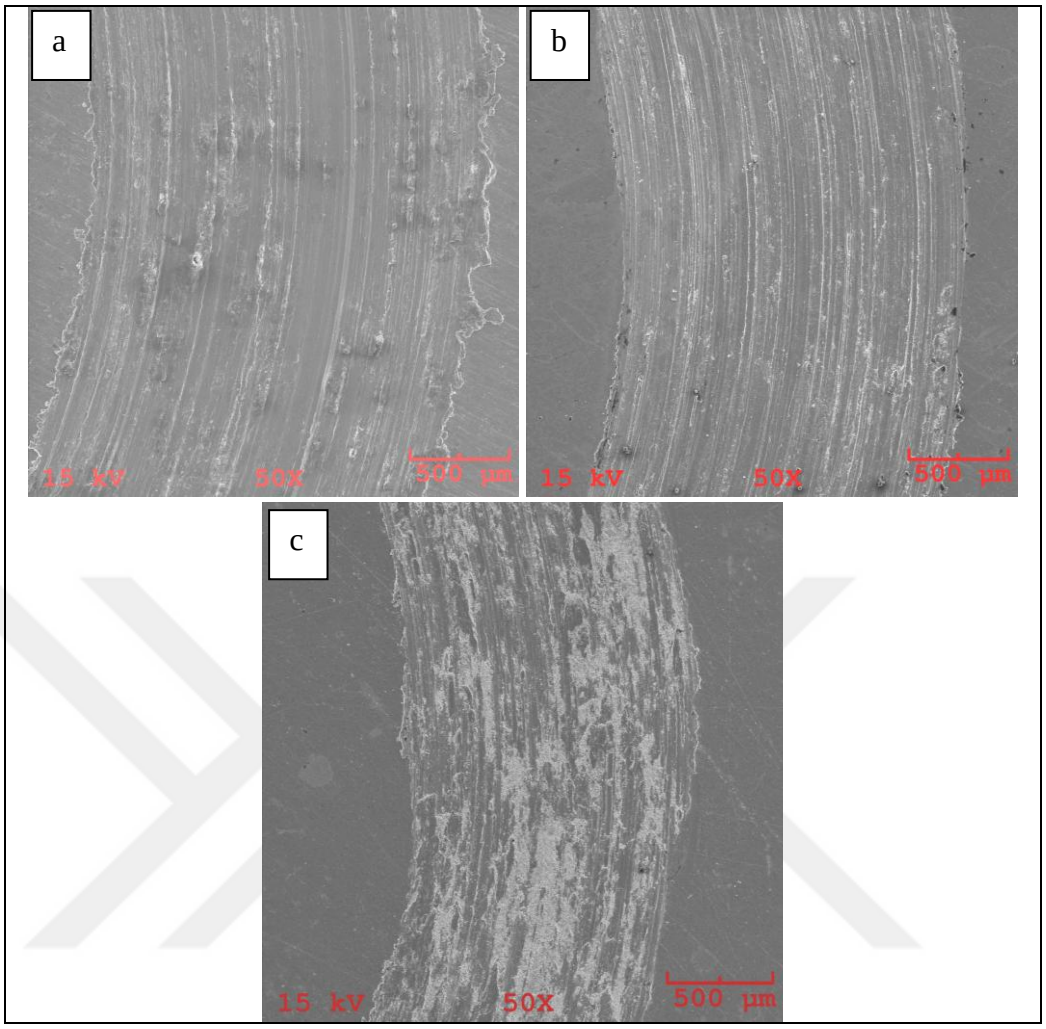
Partikül takviyeli magnezyum esaslı numunelerin ardından aşınma testleri farklı titanyum esaslı kaplamalar içinde gerçekleştirilmiştir. Saf Mg ve kaplama numunelerinin aşınma sonuçları ile ilgili hesaplamalar Tablo 6.5' de verilmiştir. Matris malzemesi için seçilen bileşimlerin aksine kaplama malzemesi olarak Ti6Al4V alaşımı ve Ti0.2Pd alaşımı seçilmiştir. Bu seçimin yapılmasında matris malzemesinin dayanımının arttırılması sırasında elde edilen sonuçlar etkili olmuştur. Özellikle titanyum alaşımlarında daha önce bahsedilen oksidasyon nedenli aşınma direncindeki azalmanın ön planda tutularak Ti6Al4V ve Ti0.2Pd alaşımı seçilmiştir. Paladyum içeren titanyum alaşımlarının korozyon direnci tüm titanyum alaşımları içerisinde en yüksek dirence sahip alaşımlardan birisidir. Bu doğrultuda aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 6.5' de verilmiştir. Ön görüldüğü gibi titanyum esaslı kaplamalar ile magnezyumun aşınma direncinde önemli kazanımlar elde edilmiştir. Daha öncede de vurgulandığı gibi saf magnezyumun aşınma oranı $33{,}53 \times 10^{-3}$ mm^3/m değerinden Ti6Al4V alaşımı kaplamasıyla $9{,}17 \times 10^{-3}$ mm^3/m değerine, Ti0.2Pd alaşımı kaplanması ile de $7{,}61 \times 10^{-3}$ mm^3/m değerine düşerek aşınma direncinde artış ortaya konmuştur.

Tablo 6.5. Kaplama malzemelerinin aşınma sonuçları

Numuneler	Yoğunluk	Ağırlık Kaybı (mg)	Hacimsel Kayıp (mm^3)	Aşınma Oranı (mm^3/m)
Mg	1,70	11,4	6,71	$33,53x10^{-3}$
Ti6Al4V	4,47	8,2	1,83	$9,17x10^{-3}$
Ti-Pd	4,47	6,8	1,52	$7,61x10^{-3}$

Jun Qu vd. yaptığı çalışmada Ti6Al4V metali için farklı bilyalar kullanılarak ve farklı hızlarda yaptıkları çalışmalarda aşınma oranı için benzer sonuçlar elde etmişlerdir [121].

Şekil 6.39'de iki farklı titanyum alaşımı ile kaplanan magnezyumun aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma oranında elde edilen değerler aşınma yüzey incelemeleri ile de desteklenerek aşınma direncindeki artış ortaya konmuştur. Saf magnezyum aşınma izi genişliği Ti6Al4V alaşımı için karşılaştırıldığında iz genişliğindeki azalma dikkati çekmektedir. Dahası en az aşınma oranına sahip Ti0.2Pd alaşımını aşınma yüzeyindeki aşınma iz genişliği ise göze çarpan derecede azalmıştır. Saf magnezyumun aşınma testi sırasında sıcaklık artışı ile partiküllerin kolayca oksidasyona uğraması sonucu malzeme kayıpları çok yüksek değerlere çıkmaktadır. Ayrıca saf magnezyum düşük sertliği nedeniyle iz kenarlarındaki yoğun deformasyon izleri de dikkat çekmektedir. Titanyum alaşımların ortaya koyduğu oksidasyona karşı direnç ve sertlik artışı ile aşınma sırasındaki deformasyon etkisi azalmış bu da aşınma yüzeylerine etkili bir şekilde yansımıştır.



Şekil 6.39. Saf mg ve kaplamaların aşınma SEM görüntüleri (a) Mg, (b) Ti6Al4V ve (c) Ti0.2Pd

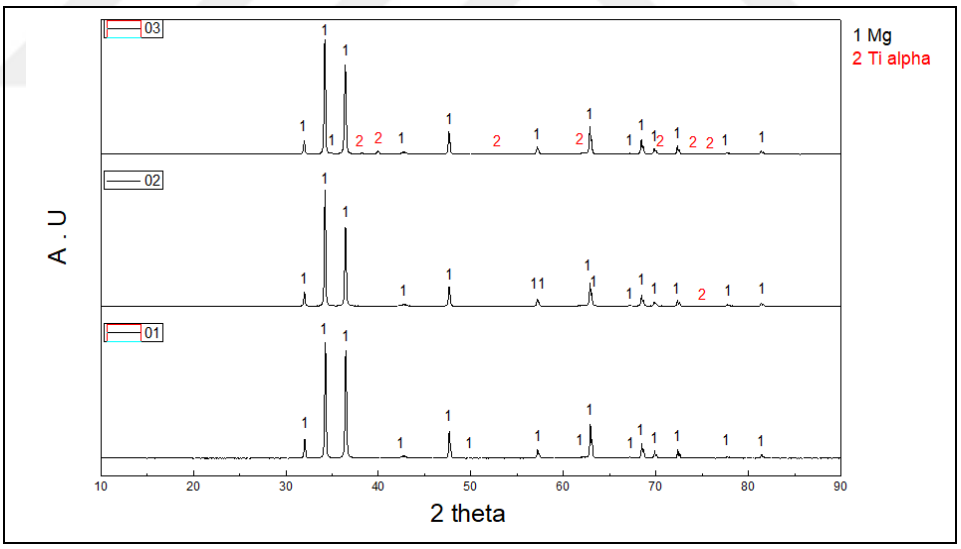
6.6. XRD Sonuçları

Kompozit malzemelerin XRD sonuçları Şekil 6.40' da verilmiştir. 01 nolu numune saf magnezyum, 02 nolu numune %1 kaba boyutlu titanyum partikül takviyeli magnezyum, 03 nolu numune %15 kaba boyutlu titanyum partikül takviyeli magnezyum, 04 nolu numune %5 ince boyutlu titanyum partikül takviyeli magnezyum, 05 nolu numune %15 ince boyutlu titanyum partikül takviyeli magnezyum olarak belirtilmiştir. Tablo 6.6' da numuneler ve içerikleri verilmiştir. Yukarıdaki bölümlerde de anlatıldığı üzere Mg ve Ti arasında çözünürlük bulunmamaktadır. Bunu doğrulama açısından XRD deneyleri gerçekleştirilmiştir. %1 Ti içeren Mg numunesinden alınan sonuçlarda sadece 1 adet Ti piki elde edilmiştir. Ti miktarı arttıkça elde edilen Ti pikleri artmaktadır. Sonuçlardan da görüleceği

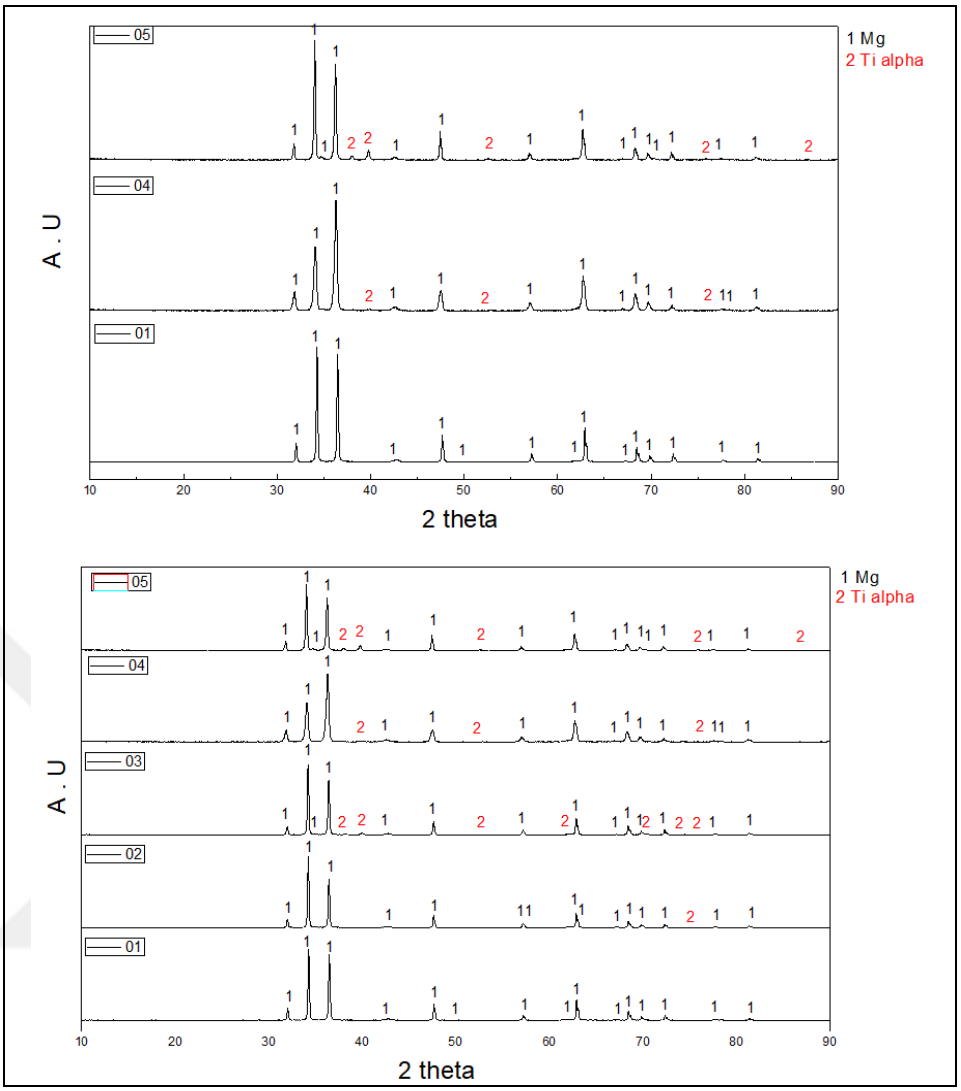
üzere magnezyum ve titanyum kendi içerisinde çözünmemektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında saf mg ve α-Ti pikleri elde edilmiştir. Birbiri içerinde çözünmeyen Mg ve Ti, magnezyum matrisli titanyum takviyeli kompozit malzeme eldesine olanak sağlamıştır. Perez vd. yaptıkları çalışmalarda saf Mg içerisine %10 Ti ilavesi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan XRD sonuçlarında Mg ve Ti pikleri elde edilmiş ve bu pikler doğrultusunda Mg ile Ti arasında hiçbir faz veya intermetalik olmadığı gözlemlemişlerdir. Saf Ti ve saf Mg piklerini ayrı ayrı şekilde gözlemlemişlerdir [62].

Tablo 6.6. Numuneler ve içerikleri

Numunelere verilen kodlar	Kompozisyon
Saf Mg (01)	-
MTi 1 (02)	Mg-1%Ti (145 µm)
MTi 15 (03)	Mg-15%Ti (145 µm)
MT 5 (04)	Mg-5%Ti (60 µm)
MT 15 (05)	Mg-15%Ti (60 µm)



Şekil 6.40. Saf Ti partikül taviyeli numunelerin XRD sonuçları



Şekil 6.40. (Devam) Saf Ti partikül taviyeli numunelerin XRD sonuçları

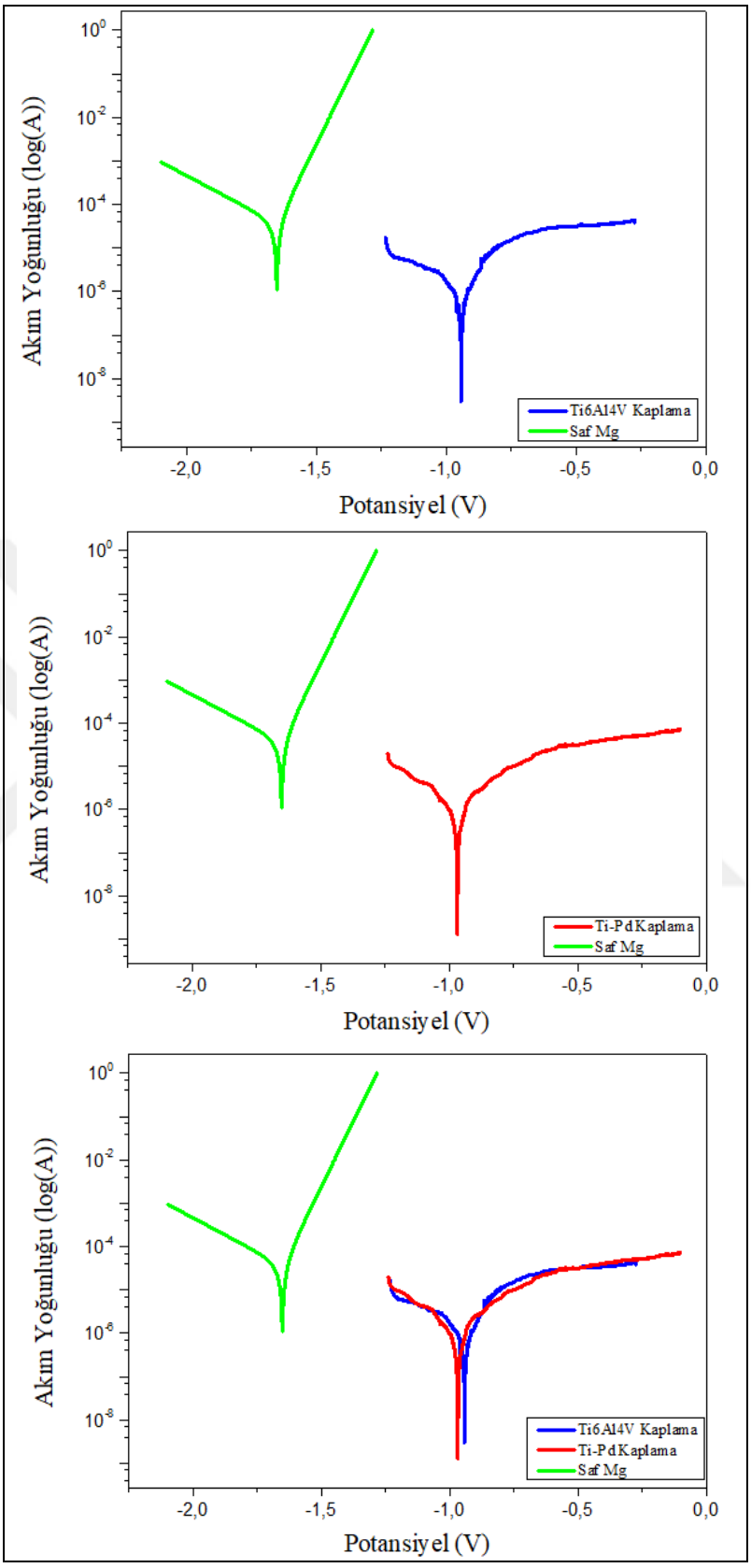
6.7. Korozyon Sonuçları

Magnezyumun zayıf korozyon dayanımı, aşınma özellikleri, sürünme direnci ve yüksek kimyasal aktifliği pek çok alanda kullanımına engel olmaktadır. Özellikle dış ortamlardaki magnezyumun kullanımındaki temel engellerden biri zayıf korozyon direncidir. Tezin bu aşamasında Mg üzerine kaplanan Ti6Al4V ve Ti0.2Pd alaşımları ile korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir.

Mg-8Li-3Zn-Al alaşımının korozyon davranışını belirlemek için yaptığı çalışmada %3,5 NaCl çözeltisi kullanmışlardır [124]. Candan vd. 'nin AZ91 magnezyum alaşımına titanyum metali ilavesinin mekanik ve korozyon davranışına etkisini araştırmak adına yaptığı çalışmada %3,5 NaCl solüsyonu ile korozyon testlerini

gerçekleştirmişlerdir [125]. Zeng vd. yaptığı çalışmada magnezyum alaşımlarının korozyonunu belirleme açısından yaptıkları araştırmada %3 NaCl çözeltisi içersindeki Mg metalinin elektrot potansiyeli -1,63 V (vs SCE) olduğunu belirtmişlerdir [126]. Literatürden yola çıkılarak yapılan korozyon deneyinde çözeltinin saf su + %3,5 NaCl olarak belirlenmiştir.

Tuzlu su çözeltisinde gerçekleştirilen deneyde, saf magnezyumun korozyon potansiyeli daha negatif yönde olduğu Şekil 6.41' de görülmektedir. Korozyon deneyinde saf Magnezyumun E_{corr} değerinin -1,65 V olduğu belirlenmiştir (Tablo 6.7). Turan vd. yaptıkları çalışmada toz metalurjisi ile üretilen saf magnezyumun E_{corr} değerinin -1,63 V olduğu gözlemlemişlerdir [127]. Buna bağlı olarak yapılan deneyden alınan korozyon oranı sonuçlarıda saf Mg'nin bir yılda 32,67 mil korozyona uğrayacağı belirlenmiştir. Yapılan kaplama ile gerçekleştirilen deneyde E_{corr} değerinin neredeyse yarı yarı düştüğü (Ti6Al4V için: -0,942 V ve Ti0.2Pd için: -0,967 V) ve bu sonuçlara ek olarak bir yılda mil cinsinden olan korozyon oranın çok yüksek oranda düştüğü bulgulanmıştır. Ti6Al4V için bu değer 1,06 mil/yıl ve Ti0.2Pd için 1,558 mil/yıl olarak bulunmuştur. Ti6Al4V ve Ti0.2Pd kaplama malzemesi seçiminin başarısı korozyon testleri ile bir kez daha kanıtlanmıştır. Özellikle denizcilik sektörü açısından önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında yapılan kaplama işleminin magnezyumun korozyon direncini başarılı bir şekilde arttırılarak iyi bir sonuç ortaya konulduğu görülmektedir.



Şekil 6.41. Kaplamalı numunelerin Tafel eğrileri

Tablo 6.7. Numunelerin korozyon deneyi sonuçları

İçerik	**Kaplama**	**Ecorr**	**Korozyon Oranı**
Saf Mg	-	-1650 mV	32,67 mpy
Saf Mg	Ti6Al4V	-942,0 mV	1,064 mpy
Saf Mg	Ti0.2Pd	-967,0 mV	1,558 mpy

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Endüstriyel uygulamalarda (uzay, havacılık, otomotiv, spor ekipmanları, biyomalzemeler vb.) magnezyum esaslı malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu ilginin en önemli sebebi endüstriyel malzemeler arasında sahip olduğu en düşük yoğunluk değeri ve bu doğrultuda yüksek spesifik mukavemet değeridir. Buna rağmen diğer alternatif malzemeler ile karşılaştırıldığında sahip olduğu zayıf mekanik özellikler ve hegzagonal sıkı paket kristal kafes yapısı nedeniyle düşük süneklik ve tokluk özelliklerine sahiptirler. Bu dezavantajların önüne geçilmesi amacıyla partikül ve fiber formunda farklı bir çok bileşen ilavesiyle mekanik özellikler geliştirilmeye çalışılır. Bunlardan bazıları SiC, TiC, TiB_2, Al_2O_3, Y_2O_3, TiO_2, Mg_2Si takviyeleridir. Her ne kadar özelliklerde gelişme olsa da bu seramik ve intermetalik karakterde ilavelerin, kırılgan doğaları nedeniyle magnezyum esaslı malzemelerden elde edilen süneklilik değerleri sınırlıdır. Bu tarz problemlerinde önüne geçmek için nano partikül takviyeli magnezyum kompozitler dizayn edilmektedir. Bu durumda da nano partiküllerin homojen dağılımlarının sağlanmasındaki zorluklar pratikteki uygulamalar için kullanımı pek mümkün kılmamaktadır.

İlave olarak son yıllarda üretilen daha farklı magnezyum esaslı malzemelerden de bahsetmek gerekir. Magnezyumun endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini arttırmak için Mg-Zn-Zr, Mg-Al-Zn ve farklı Mg-Re alaşımları dizayn edilmiştir. Bu doğrultuda üretilen Mg-15Gd-0.5Zr alaşımı ve birçok nadir toprak elementleri ile elde edilen ticari magnezyum alaşımlarına göre (Y ve Nd içeren) mükemmel mekanik özellikler ve yüksek sürünme direnci gösterdiği bildirilmiştir. Dizayn edilen bu alaşımın ısıl işlemler ile 250 °C sıcaklıklara kullanıma dayanabildiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde Mg-8Gd-4Y-1Nd-0.5Zr alaşımın ekstrüzyon sonrası 428 MPa çekme gerilmesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bahsedilen bu önemli gelişmelere rağmen nadir toprak elementleri ile elde edilen magnezyum alaşımları için bazı problemler bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar yeterli dayanım artışı elde

edebilmek için nadir toprak elementi içeriğinin %10'nun altında olmaması gerektiğini ortaya koymuştur. Fakat bu da alaşımın yoğunluğunda artışa ve yüksek üretim maliyetlerine neden olacaktır.

Farklı takviyeler ve karşılaşılan bu zorluklardan sonra titanyumun önemi daha iyi ortaya konabilmektedir. Titanyumun sahip olduğu dayanım, sertlik ve elastisite modülü değerleri metalik malzemeler içinde en dikkat çekici özelliklerdir. Birçok durumda aralarında çözünürlüğün olmaması dezavantaj gibi gösterilse de Mg ve Ti arasında oluşturulan sistemlerde temas bölgelerinde kırılgan intermetaliklerin oluşmaması önemli bir avantaj olarak sayılabilir. Ayrıca nadir toprak elementleri ile karşılaştırıldığında doğada daha fazla bulunmaktadır ve daha ucuzdur. Aynı zamanda relatif atomik ağırlık açısından da daha hafiftir. Belki de en önemlilerden birisi aynı kristal yapıya sahip olmalarıdır (hsp). Böyle bir benzerlik ararlarında çözünürlüğün olmadığı sistemler için daha büyük önem taşır. Mg-Ti arasındaki arayüzeyde bu sayede uyumlu bir latis ilişkisi sağlanır [105,128].

Bu aşamaya kadar titanyumun magnezyum için ne kadar önemli bir alternatif element olduğu ortaya konmaya çalışıldı. Bu tez kapsamında bu avantaj ve dezavantajları dikkate alarak magnezyumun özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

Özelliklerin geliştirilmesi için malzeme seçimi kadar kullanılacak üretim yöntemi de önem arz etmektedir. Magnezyum esaslı titanyum içeren alaşımların üretimi için ergitme tekniklerinin kullanılması magnezyumun kaynama noktasının titanyumun ergime noktasından düşük olması nedeniyle oldukça zordur. Bu doğrultuda farklı üretim tekniklerinin dizaynı üzerine epey çalışma yapılmaktadır. Bu noktada en sık karşılaşılan metot mekanik alaşımlamadır. Nanokristalin mikroyapıları, homojen bir dağılım sağlaması açısından, özgün bileşimlerin üretimi için belki de ilk sırada yer alan bu teknik üzerine oldukça fazla yoğunlaşma bulunmaktadır. Fakat bu teknikte proses sırasında ortaya çıkan sıcaklık artışları için magnezyum gibi reaktif malzemelerin kontrolü zor hale getirmektedir. Dolayısıyla aralarında iyi bir arayüzey uyumu ile üretime izin verecek bir üretim tekniği açısından, bu tez tercih ettiği toz metalurjik prosesler ile bu noktada literatüre önemli veriler sunacaktır [128].

Tez kapsamında bu doğrultuda yapılan farklı ilaveler ile magnezyumun özelliklerinde gelişme sağlanmıştır. Aşağıda elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Aralarındaki çözünürlük değerlerinin ihmal edilebilecek düzeyde olmasına rağmen bu çalışma, hem saf hem de alaşım şeklinde ilave edilen titanyum partikülleri ile dayanımının uyumlu bir arayüzey bağlantısı oluşturacak şekilde üretilmesi en önemli sonuçlardan birisidir. Arayüzey bağlantınsın kuvvetli olmasına sebep olabilecek unsurlar 3 kavram üzerinden açıklanmıştır.

1. İhmal edilebilecek düzeyde dahi olan çözünürlük değerleri arayüzeyde keskin bir geçiş olmasını engellemiştir.
2. Magnezyum ve Titanyum'un aynı kristal yapısı, arayüzeyde uyumlu bir ilişki ortaya koymuştur.
3. Magnezyumun ıslatma özelliklerinin etkisi temas noktalarında etkisini önemli derecede göstermiştir.

Dolayısıyla bir Mg-Ti esaslı malzeme üretimi açısından bu tez ile yeni bir üretim yöntemi ortaya konmuştur.

Magnezyuma titanyum partikül ilavesinin ardından devam eden üretim sürecinde Mg+Mg50Al50 ile çalışılmaya dahil edilmiştir. Numunelerin beklendiği gibi titanyuma göre çözünürlük ile ilgili sorun yaşanmaması ve böyle bir takviye süreci ile özelliklerdeki değişimin belirlenmesi önem taşımaktadır. Mg-Al numunelerinde homojen dağılım da Mg ile Al arasındaki çözünürlük önemli rol oynamıştır.

Yoğunluk sonuçlarından göze çarpan bir nokta, tüm bileşimler sonucunda elde edilen yoğunluk değeri saf alüminyumun yoğunluğundan düşük çıkmıştır. Verilen bu değer dayanımı yüksek yeni bileşime sahip magnezyumun mevcut diğer düşük yoğunluklu malzemeler ile karşılaştırma açısından değer taşımaktadır.

Sertlik sonuçlarda değişen Ti partikül boyutu ile sertlik değerlerinde etkili bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Artan partikül miktarı ile takviye elemanı gibi hareket eden titanyum partiküller sertliğe daha fazla katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

Titanyum ve magnezyum arasındaki çözünürlüğün çok az olmasına rağmen arayüzeye yakın ve biraz daha uzak olan bölgeden alınan nokta analizleri göstermiştir ki; Mg-Ti6Al4V alaşımı içinde bulunan alüminyum üzerinden titanyum

içinde kısa mesafede difüze olmuştur. Ti0.2Pd alaşımı ile saf magnezyumun kaplanması sürecinde de arayüzeyde bir ayrılma görülmemiştir.

Ti6Al4V alaşımı ile alüminyum arasında oluşan arayüzey bölgesi net bir şekilde görülmektedir. Ti6Al4V alaşımı ile alüminyum arasında bulunan çözünürlük üzerinden elde edilen arayüzey bölgesinin benzeri alüminyum ile magnezyum arasında da elde edilmiştir. Saf alüminyum bölgesinden magnezyum bölgesine geçişte elementel oranlardaki değişim net bir şekilde EDX analizi sayesinde ortaya konmuştur.

Kaplamalardaki sertlik sonucu dikkate alındığında, Ti6Al4V ve Ti0.2Pd alaşımlarının sertliklerinin saf Mg'ye göre çok yüksek olması ile Magnezyumun yüzey özelliklerinin sertlik tarafında başarılı şekilde geliştiği gözlemlenmiştir. Mg ve Al arasında bulunan bölgede ise; Mg ve Al'nin oluşturduğu intermetaliklerin sertlikler sonuçları çok yüksek değerde olduğu görülmüştür. Hem altlık malzeme hem de kaplama numunelerinde sertlik sonuçları açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Aşınma sonuçları ele alındığında; Kullanılan takviye elemanları ile birlikte ağırlık kaybının büyük oranda düştüğü görülmüştür. Bu da ilave edilen takviye elemanları ile birlikte magnezyumun aşınma özelliğinin geliştiği gözlemlenmiş ve başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Ön görüldüğü gibi titanyum esaslı kaplamalar ile magnezyumun aşınma direncinde önemli kazanımlar elde edilmiştir. Ayrıca saf magnezyum düşük sertliği nedeniyle iz kenarlarındaki yoğun deformasyon izleri de dikkat çekmiştir. Titanyum alaşımların ortaya koyduğu sertlik artışı ile aşınma sırasındaki deformasyon etkisi azalmış bu da aşınma yüzeylerine etkili bir şekilde yansımıştır.

XRD sonuçları ele alındığında magnezyum ve saf titanyum birbiri içerisinde çözünmemektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında saf mg ve α-Ti pikleri elde edilmiştir. Birbiri içerinde çözünmeyen Mg ve saf Ti, magnezyum matrisli titanyum takviyeli kompozit malzeme eldesine olanak sağlamıştır.

Magnezyumun kullanımındaki temel değişimlerden biri zayıf korozyon direncidir. Tezin bu aşamasında Mg üzerine kaplanan Ti6Al4V ve Ti0.2Pd alaşımları ile korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında yapılan kaplama işleminin magnezyumun korozyon direncini arttırması açısından çok iyi bir sonuç elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Ashby M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd ed., Elsevier, Oxford, 2005.

[2] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tuts_Tomb_Opened.JPG (Ziyaret tarihi: 5 Haziran 2018).

[3] http://www.bbc.com/turkce/haberler/2016/06/160602_tutankamon_hancer (Ziyaret tarihi: 5 Haziran 2018).

[4] Lahiri A. K., *Applied Metallurgy and Corrosion Control*, 1st ed., Springer, Singapore, 2017.

[5] Kakani S. L., Kakani A., *Material Science*, 1st ed., New Age International, New Delhi, 2004.

[6] Mridha S., An Introduction: Metallic Materials, Editor: Hashmi M. S. J., *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1st ed., Elsevier, Dublin, 1-7, 2016.

[7] Kalemtas A., Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış, *Putech & Composites Magazine*, 2014, **Ekim-Kasım-Aralık**, 18-30.

[8] Dey A., Pandey K. M., Magnesium Metal Matrix Composite – A Review, *Reviews On Advanced Materials Science*, 2015, **42**(1), 58-67.

[9] Sridhar V., Ratnam C., Chakravarthy M. A., Synthesis and Mechanical Characterization of Magnesium Reinforced With Nano Alumina Composites, *Materials Today: Proceedings*, 2017, **4**(2), 3131-3140.

[10] http://www.metalsolutionsart.com/images/products/handle/o4.jpg (Ziyaret tarihi: 4 Şubat 2018).

[11] Czichos H., Saito T., Smith L., *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, 1st ed., Springer-Verlag, Berlin, 2006.

[12] http://www.oifl.co.uk/images/BROC-2.jpg (Ziyaret tarihi: 4 Şubat 2018).

[13] Campo E. A., *Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties From Different Standards*, 1st ed., William Andrew, New York, 2008.

[14] http://tersfonksiyon.com/polimer-malzemeler-uretim-yontemleri/ (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2018).

[15] http://polymertek.com/wp-content/uploads/2016/10/polymer-materials@2x.jpg (Ziyaret tarihi: 5 Şubat 2018).

[16] Abramovich H., *Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures*. Woodhead Publishing, 1st ed., Woodhead Publishing, Duxford, 2017.

[17] Vinson J. R., Sierakowski R. L., *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

[18] Ashby M., Shercliff H., Cebon D., *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2007.

[19] Herakovich C. T., Mechanics of Composites: a Historical Review, *Mechanics Research Communications*, 2012, **41**, 1-20.

[20] Daniel B., Donaldson L. S., Introduction to Composites, Editor: Moosbrugger C., *ASM Handbook Volume 21 Composite*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2001.

[21] Rawal S. P., Metal-matrix Composites for Space Applications, *Jom*, 2001, **53**(4), 14-17.

[22] https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/images/history/October1957_2.html (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).

[23] https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51v2FMnTRAL._SX425_.jpg (Ziyaret tarihi: 9 Şubat 2018).

[24] https://www.enderspor.com/urun/babolat-pure-drive-team-unstrung-tenis-raketi-101238-146?brand=Babolat (Ziyaret tarihi: 9 Şubat 2018).

[25] https://popsci.com.tr/wp-content/uploads/2016/12/xr16golfclub.jpg (Ziyaret tarihi: 9 Şubat 2018).

[26] Yajima S., Hayashi J., Omori M., Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength, *Chemistry Letters*, 1975, **4**(9), 931-934.

[27] http://www.coiceramics.com/pdfs/Nicalon.pdf (Ziyaret tarihi: 9 Şubat 2018).

[28] Hooker A., Doorbar J., Metal Matrix Composites for Aeroengines, *Materials science and technology*, 2000, **16**(7-8), 725-731.

[29] https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880107.PDF (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2018).

[30] Kainer K. U., *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, 1st ed., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.

[31] https://bryantarchway.com/semiconductor-warfare/ (Ziyaret tarihi: 11 Şubat 2018).

[32] https://www.confident.net/wp-content/uploads/2017/10/implany.jpg (Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2018).

[33] Neelameggham R., Primary Production of Magnesium, Editors: Pekguleryuz M. O., Kainer K., Kaya A. A., *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1-32, 2013.

[34] Mathaudhu S. N., Nyberg, E. A., Magnesium Alloys in US Military Applications: Past, Current and Future Solutions, Editors: Mathaudhu S., Luo, A., Neelameggham N., Nyberg E., Sillekens W., *Essential Readings in Magnesium Technology*, Springer International Publishers, Switzerland, 71-76, 2016.

[35] Polmear I. J., Introduction: History, Production, Application and Marked, Editors: Michael M., Avedesion B., *ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*, 4rd ed., ASM International, Ohio, 3-11, 1999.

[36] Apelian D., Looking Beyond The Last 50 Years: The Future of Materials Science and Engineering, *JOM*, **59**(2), 65-73, 2007.

[37] Carpenter J. A., Jackman, J., Li N. Y., Osborne R. J., Powell B. R., Sklad P. S., Automotive Mg Research and Development in North America. Editors: Han Y., *Materials science forum Vol. 546*, Trans Tech Publications, Switzerland, 11-24, 2007.

[38] https://www.indiamart.com/hindustan-magnesium/products.html#aluminium-casting (Ziyaret tarihi: 15 Şubat 2018).

[39] Kulekci M. K., Magnesium and Its Alloys Applications in Automotive Industry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, **39**(9-10), 851-865.

[40] http://alliancemagnesium.com/magnesium/metal-future/ (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2018).

[41] http://www.householdappliancesworld.com/2014/02/05/present-and-future-of-magnesium/ (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2018).

[42] Ostrovsky I., Henn Y., Present State and Future of Magnesium Application in Aerospace Industry, *New challenges in aeronautics*, Moskova, Rusya, 19-22 Ağustos 2007.

[43] http://www.magnesium.com/w3/data-bank/index.php?mgw=250 (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2018).

[44] Kainer, K. U., Von Buch, F., The Current State of Technology and Potential for Further Development of Magnesium Applications, Editors: Kainer, K. U.,

Magnesium-Alloys and Technology, 1st ed., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 1-22, 2003.

[45] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metals_crystal_structure (Ziyaret tarihi: 21 Şubat 2018).

[46] http://www.mechanicalengineeringblog.com/ (Ziyaret tarihi: 21 Şubat 2018).

[47] https://www.lenntech.com/periodic/elements/mg.htm (Ziyaret tarihi: 22 Şubat 2018).

[48] https://geology.com/minerals/magnesite.shtml (Ziyaret tarihi: 22 Şubat 2018).

[49] https://digitalfire.com/4sight/material/dolomite_273.html (Ziyaret tarihi: 22 Şubat 2018).

[50] Friedrich H. E., Mordike B. L., *Magnesium Technology: Metallurgy, Design, Data, Applications*, 1st ed., Springer-Verlag, Berlin, 2006.

[51] Housh S., Mikucki B., Stevenson A., *Selection and application of magnesium and magnesium Alloys*, 10th ed., ASM International, Ohio, 1990.

[52] Zhang S., Zhang X., Zhao C., Li J., Song Y., Xie C., Bian Y., Research on an Mg–Zn alloy as a degradable biomaterial, *Acta biomaterialia*, 2010, **6**(2), 626-640.

[53] Wang M., Jia P., Lv D., Geng H., Study on the Microstructure and Liquid–Solid Correlation of Al–Mg Alloys, *Physics and Chemistry of Liquids*, 2016, **54**(4), 507-514.

[54] Liu Y., Chen Y., Yang C., A Study on Atomic Diffusion Behaviours in an Al-Mg Compound Casting Process, *AIP Advances*, 2015, **5**(8), 087147.

[55] Zheng C., Li S., Tang B., Zeng B., Microstructure and Properties of Mg-Al Binary Alloys, *China Foundry*, 2006, **3**(4), 270-274.

[56] http://d2vlcm61l7u1fs.cloudfront.net/media%2F36c%2F36c59390-214d-4512-bae7-98e1b405dfbc%2Fimage (Ziyaret tarihi: 26 Şubat 2018)

[57] Wei Y., Dunlop L., Westengen H., Precipitation hardening of Mg-Zn and Mg-Zn-RE Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, **26**(7), 1705-1716.

[58] Kammerer C., Behdad S., Zhou L., Betancor F., Gonzalez M., Boesl B., Sohn H., Diffusion Kinetics, Mechanical Properties, and Crystallographic Characterization of Intermetallic Compounds in the Mg–Zn Binary System, *Intermetallics*, 2015, **67**, 145-155.

[59] Nishiyama K., Magnesium-Titanium Type Alloy and Method for Producing the Same, 1990, U.S. Patent No 5,024,813., *U.S. Patent and Trademark Office*.

[60] Hoffmann I., Magnesium-Titanium Alloys for Biomedical Applications**,** Doctor of Philosophy, University of Kentucky, Kentucky, 2014.

[61] Perez P., Garces G., Adeva P., Mechanical Properties of a Mg–10 (vol.%) Ti Composite, *Composites science and technology*, 2004, **64**(1), 145-151.

[62] https://sites.google.com/site/eampotentials/MgTi (Ziyaret tarihi: 1 Mart 2018)

[63] Subramanian J., Loh Z., Seetharaman S., Hamouda S., Gupta M., Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5Nb Metal-Metal Composite Reinforced with Nano SiC Ceramic Particles, *Metals*, 2012, **2**(2), 178-194.

[64] Xiuqing Z., Haowei W., Lihua L., Xinying T., Naiheng M., The Mechanical Properties of Magnesium Matrix Composites Reinforced with (TiB2+ TiC) Ceramic Particulates, *Materials letters*, 2005, **59**(17), 2105-2109.

[65] Wang Y., Zhao T., Chen G., Zhang L., Cheng N., In Situ Fabrication and Properties of Mg2Si/AZ91D Magnesium Matrix Composites, *In Advanced Materials Research*, 2011, **150**, 1640-1643.

[66] Shin D., Microstructual Characteristics Of Magnesium Metal Matrix Composites, Master of Science**,** University of Central Florida, Florida, 2012.

[67] Gupta M., Ling, S. N. M., *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. 1st ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.

[68] Stuart M. L., *Handbook of composite reinforcements*. 1st ed., VCH Publisher, California, 1992.

[69] Körner C., Schäff W., Ottmüller M., Singer F., Carbon Long Fiber Reinforced Magnesium Alloys, *Advanced engineering materials*, 2000, **2**(6), 327-337.

[70] Deng K., Wang J., Wu W., Hu S., Wu K., Gan M., Effect of Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Composite, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **543**, 158-163.

[71] Feng Y., Zhou X., Min Z., Kun W., Superplasticity and Texture of SiC Whiskers in a Magnesium-Based Composite, *Scripta materialia*, 2005, **53**(3), 361-365.

[72] Zheng M., Wu K., Yao C., Characterization of Interfacial Reaction in Squeeze Cast SiCw/Mg Composites *Materials letters*, 2001, **47**(3), 118-124.

[73] Lim C. Y. H., Leo D. K., Ang J. J. S., Gupta M., Wear of Magnesium Composites Reinforced with Nano-Sized Alumina Particulates, *Wear*, 2005, **259**(1), 620-625.

[74] Hou L. G., Wu R. Z., Wang X. D., Zhang J. H., Zhang M. L., Dong A. P., Sun B. D., Microstructure, Mechanical Properties and Thermal Conductivity of the Short Carbon Fiber Reinforced Magnesium Matrix Composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **695**, 2820-2826.

[75] Jun T., Shi Z. Q., Creep Mechanism and Creep Constitutive Model of Aluminum Silicate Short-Fiber-Reinforced Magnesium Matrix Composite, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**(3), 632-640.

[76] Bakkar A., Neubert V., Corrosion Characterisation of Alumina–Magnesium Metal Matrix Composites, *Corrosion science*, 2007, **49**(3), 1110-1130.

[77] Das A., Spark Plasma Sintering of Magnesium Matrix Composites, Master of Science, Oklahoma State University, Oklahoma, 2012.

[78] Dieringa H., Kainer K. U., Magnesium Matrix Composites: State-of the-art and What's the Future, *In Advanced Materials Research*, 2012, **410**, 275-278.

[79] Jayakumar J., Raghunath B. K., Rao T. H., Recent Development and Challenges in Synthesis of Magnesium Matrix Nano Composites-A Review, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2012, **1**(2), 164-171.

[80] Pillai A. L., Jinu G. R., Review Of Recent Studies In Magnesium Matrix Composites, *IJMTER*, 2016, 279-290.

[81] Leon-Patino C. A., Infiltration Processing of Metal Matrix Composites Using Coated Ceramic Particulates, Doctor of Philosophy, McGill University, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Canada, 2000.

[82] Capus J. M., *Metal Powders: A Global Survey of Production, Applications and Markets 2001-2010*, 4th ed., Elsevier, New York, 2005.

[83] Upadhyaya G. S., *Powder metallurgy technology*, 1st ed., Cambridge Int Science Publishing, Cambridge, 2002.

[84] Karagöz Ş., Yamanoğlu R., Atapek Ş. H., Metalik Toz İşleme Teknolojisi Ve Prosesleme Kademeleri Açısından Parametrik İlişkiler, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 2009, **22**(3), 77-87.

[85] Danninger H., Gierl-Mayer C., Advanced Powder Metallurgy Steel Alloys, Editors: Chang I., Zhao Y., *In Advances in Powder Metallurgy Properties, Processing and Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambiridge, 149-201, 2013.

[86] Jiang Q. C., Wang H. Y., Ma B. X., Wang Y., Zhao F., Fabrication of B4C Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composite by Powder Metallurgy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, **386**(1-2), 177-181.

[87] Xi Y. L., Chai D. L., Zhang W. X., Zhou J. E., Ti–6Al–4V Particle Reinforced Magnesium Matrix Composite by Powder Metallurgy, *Materials Letters*, 2005, **59**(14-15), 1831-1835.

[88] Luo D., Pei C. H., Rong J., Wang H. Y., Li Q., Jiang Q. C., Microstructure and Mechanical Properties of SiC Particles Reinforced Mg–8Al–1Sn Magnesium Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgy, *Powder Metallurgy*, 2015, **58**(5), 349-353.

[89] Yamanoğlu R., Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290440.

[90] Efendi E., Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Ti-5Al-2,5Fe-xCu-yAg Alaşımlarının Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 455551.

[91] https://www.researchgate.net/figure/The-powder-metallurgy-process-5_fig3_309152816 (Ziyaret tarihi: 1 Nisan 2018)

[92] Thummler F., Oberacker R., *Introduction to powder Metallurgy*, 1st ed., The Institute of Materials, Oxford, 1993.

[93] Kang S. J. L., *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2015.

[94] Cengiz M., B4C Esaslı Kompozitlerin B4c/me Başlangıç Tozlarından Hareketle Spark Plazma Sinterleme (sps) Yöntemi İle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 419024.

[95] Akın İ., ZrB2 Esaslı Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi İle Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 315363.

[96] Yuasa S., Takeno T., Ignition and Combustion of Magnesium-Aluminum Alloy Particle Clouds in a Hot Gas Stream, *In Symposium (International) on Combustion*, 1982, **19**(1), 741-748.

[97] ASTM B962–15, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' principle. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

[98] ASTM G99, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-On-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

[99] ASTM G5-14, Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1994.

[100] Waoka, T., Nakamura, M., Effect of Compaction Temperature on Sinterability of Magnesium and Aluminum Powder Mixtures by Warm Compaction Method, *Materials transactions*, 2011, **52**(5), 943-947.

[101] Xie G., Ohashi O., Sato T., Yamaguchi N., Song M., Mitsuishi K., Furuya K., Effect of Mg on the Sintering of Al-Mg Alloy Powders by Pulse Electric-Current Sintering Process, *Materials Transactions*, 2004, **45**(3), 904-909.

[102] Muhammad W. N. A. W., Sajuri Z., Mutoh Y., Miyashita Y., Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Composites Prepared by Spark Plasma Sintering Technology, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**(20), 6021-6029.

[103] Burke P., Sintering Fundamentals of Magnesium Powders, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2009, **48**(2), 123-132.

[104] Rashad M., Improved Mechanical Proprieties of "Magnesium Based Composites" with Titanium–Aluminum Hybrids, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, **3**(1), 1-9.

[105] Esen Z., Bütev E., Karakaş M. S., A Comparative Study on Biodegradation and Mechanical Properties of Pressureless Infiltrated Ti/Ti6Al4V–Mg Composites, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materialst*, 2016, **63**, 273-286.

[106] Lianxi H., Wang E., Fabrication and mechanical properties of SiCw/ZK51A Magnesium Matrix Composite by Two-Step Squeeze Casting." *Materials Science and Engineering: A278*, 2000, **1-2**, 267-271.

[107] Kondoh K., Wettability of Pure Ti by Molten Pure Mg Droplets, *Acta Materialia*, 2010, **58**(2), 606-614.

[108] Kawamori S., Machida, T., Silicon Carbide Dispersion Strengthening Of Magnesium Using Mechanical Alloying Method, *Materials Transactions*, 2008, **49**(2), 304-309.

[109] Lei T., Tang W., Cai S. H., Feng F. F., Li N. F., On the Corrosion Behaviour of Newly Developed Biodegradable Mg-Based Metal Matrix Composites Produced by in Situ Reaction, *Corrosion Science*, 2012, **54**, 270-277.

[110] Wang H. Y., Jiang Q. C., Wang Y., Ma B. X., Zhao F., Fabrication of TiB2 Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composites by Powder Metallurgy, *Materials Letters*, 2004, **58**(27-28), 3509-3513.

[111] Guleryuz L. F., Ozan S., Uzunsoy D., Ipek R., An Investigation of The Microstructure and Mechanical Properties of B4C Reinforced PM

Magnesium Matrix Composites, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2012, **51**(7-8), 456-462.

[112] Wan Y., Cui T., Li W., Li C., Xiao J., Zhu Y., Luo H., Mechanical and biological properties of bioglass/magnesium composites prepared via microwave sintering route, *Materials & Design*, 2016, **99**, 521-527.

[113] Yamanoglu R., In Situ Aluminum Alloy Coating on Magnesium by Hot Pressing, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, **28**(8), 1059-1064.

[114] Zheng W. C., Li S. S., Tang, B., Zeng D. B. (2006). Microstructure and Properties of Mg-Al Binary Alloys, *China Foundry*, 2006, **3**(4), 270-274.

[115] Jonnard P., Characterization of Al and Mg Alloys From Their X-Ray Emission Bands, *Microscopy and Microanalysis*, 2009, **15**(1), 36-45.

[116] Rocha S. S. D., Adabo G. L., Henriques G. E. P., Nóbilo M. A. D. A., Vickers Hardness of Cast Commercially Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy Submitted To Heat Treatments, *Brazilian Dental Journal*, 2006, **17**(2), 126-129.

[117] Eldesouky A., Effect Of Grain Size Reduction of AA2124 Aluminum Alloy Powder Compacted by Spark Plasma Sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **609**, 215-221.

[118] Das S. K., Jung I. H., Effect Of The Basal Plane Orientation on Al and Zn Diffusion İn Hcp Mg, *Materials Characterization*, 2014, **94**, 86-92.

[119] Lim C. Y. H., Lim S. C., Gupta M., Wear Behaviour of Sic P-Reinforced Magnesium Matrix Composites, *Wear*, 2003, **255**(1), 629-637.

[120] Qu J., Blau P. J., Watkins T. R., Cavin O. B., Kulkarni N. S., Friction And Wear Of Titanium Alloys Sliding Against Metal, Polymer, and Ceramic Counterfaces, *Wear*, 2005, **258**(9), 1348-1356.

[121] Feng H., Liu S., Du Y., Lei T., Zeng R., Yuan, T., Effect of The Second Phases on Corrosion Behavior of The Mg-Al-Zn Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **695**, 2330-2338.

[122] Gnedenkov A. S., Sinebryukhov S. L., Mashtalyar D. V., Gnedenkov S. V., Features of the Corrosion Processes Development at the Magnesium Alloys Surface, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **225**, 112-118.

[123] Yang L., Jiang Q., Zheng M., Hou B., Li Y., Corrosion behavior of Mg–8Li–3Zn–Al alloy in neutral 3.5% NaCl solution, *Journal of Magnesium and Alloys*, 2016, **4**(1), 22-26.

[124] Candan S., Unal M., Koc E., Turen Y., Candan E., Effects Of Titanium Addition On Mechanical And Corrosion Behaviours of Az91 Magnesium Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**(5), 1958-1963.

[125] Zeng R. C., Zhang, J., Huang W. J., Dietzel W., Kainer K. U., Blawert C., Wei K. E., Review Of Studies On Corrosion Of Magnesium Alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **16**, 763-771.

[126] Turan M. E., Sun Y., Akgul Y., Turen Y., Ahlatci H., The Effect of Gnps on Wear And Corrosion Behaviors of Pure Magnesium, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **724**, 14-23.

[127] Zhou H., Hu L., Sun H., Chen X., Synthesis Of Nanocrystalline Mg-Based Mg–Ti Composite Powders by Mechanical Milling, *Materials Characterization*, 2015, **106**, 44-51.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Gökçe O. S.**, Yamanoğlu R., Titanyum Partikül Takviyesinin Magnezyumun Mekanik Özelliklerine Etkisi, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18)*, Karabük, Turkey, 22-24 March 2018.

[2] **Gökçe O. S.**, Daoud I., Yamanoğlu R., Toz Metalurjik Magnezyum Alaşımlarının Üretimi, *Engineers of Future International Student Symposium (EFIS)*, Zonguldak, Turkey, 15 - 17 June 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2008 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ndeki eğitimini 2010 yılında yarıda bırakarak yine aynı yıl Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Mühendisliğini kazandı. Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak 2015 yılında mezun oldu ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2018 Temmuz ayında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.