

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
AZ91 ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

ATAKAN ÖĞUZ OCAK

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AZ91 ALAŞIMININ
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Atakan Oğuz OCAK

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Eylül 2019

Atakan Oğuz OCAK tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AZ91 ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. / /2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ÜNAL (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)

İmzası

...../...../2019

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

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Atakan Oğuz OCAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AZ91 ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Atakan Oğuz OCAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Eylül 2019, 90 sayfa

Bu çalışmanın amacı, AZ91 alaşımı metal tozlarına silisyum ve antimon metal tozlarının ilavesinin malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle 325 mesh boyutundaki AZ91, silisyum ve antimon tozları Nanografi firmasından temin edilmiştir. Öncelikle saf AZ91 numunesi hazırlanmış, sonrasında ise sırasıyla kütlece % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarında silisyum ilave edilerek yeni numuneler sıcak pres işlemi için hazır hale gelmiştir. Sıcak pres yöntemi ile üretilen numunelerin bağıl yoğunlukları hesaplanmış, sonrasında ise mikrogörüntüleri ve SEM görüntüleri alınarak en sonunda Mikro Vickers ve Brinell sertlik deneylerine tabii tutulmuşlardır. Ayrıca işlem sonrasında içeriklerinin kontrolünü sağlamak amacıyla XRD ve XRF analizleri uygulanmıştır.

Yapılan sertlik deneyleri sonucunda Si ilaveli numuneler arasında bağıl yoğunluk ve sertlik değerleri ile optimum değer % 0.3 Si ilaveli numuneden alınmıştır. Si elementi ile birlikte Sb elementi ilave edilmiş ve sırasıyla % 0.3 silisyum içeriğinin yanı sıra sırasıyla % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarında Sb katılarak yeni numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler önceki Si ilaveli numunelerde olduğu gibi mikrogörüntüleri ve SEM görüntüleri alınmış, sonrasında ise sertlik deneyleri ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda Sb ilavesinin artışıyla birlikte sertlik özelliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca mikrogörüntüler ve SEM görüntüleri incelendiğinde ilave edilen Si elementinin magnezyum ile oluşturduğu Mg_2Si arafazı ile Sb elementinin magnezyum ile oluşturduğu Mg_3Sb_2 arafazlarının tane sınırlarında ve β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazları etrafında oluşmasının ve dağılışının malzemenin mekanik özellikleri üzerine doğrudan etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Toz metalurjisi, AZ91 alaşım tozu, silisyum tozu, antimon tozu.

Bilim Kodu : 915.1.195

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ALLOY ELEMENTS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AZ91 ALLOY PRODUCED BY THE METHOD OF POWDER METALLURGY

Atakan Oğuz OCAK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa BOZ

September 2019, 90 pages

The aim of this study is to investigate the effect of the addition of silicon and antimony metal powders to AZ91 alloy metal powders on the mechanical properties of the material. For this purpose, AZ91, silicon and antimony powders of 325 mesh size were firstly obtained from Nanografi company. First, pure AZ91 sample was prepared and then 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5% by mass of silicon were added and new samples became ready for hot press process. Relative densities of the samples produced by hot press method were calculated, then microimages and SEM images were taken and finally subjected to Micro Vickers and Brinell hardness tests. In addition, XRD and XRF analyzes were performed to check the composition of the materials after the procedure.

As a result of the hardness tests, the relative density and hardness values and the optimum value were obtained from 0.3% Si supplemented samples. The Sb element was added together with the Si element and new samples were produced by adding

0.3% silicon content as well as 0.1%, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5% Sb respectively. The micro-images and SEM images of these samples were obtained as in the previous Si-added samples, and then their mechanical properties were examined by hardness tests. As a result of the tests, it has been found that the hardness properties increase with the increase of Sb addition. In addition, micro images and SEM images were examined and it was found that Mg_2Si intermediate formed by magnesium with Si added with magnesium and Mg_3Sb_2 formed by magnesium with Sb had a direct effect on the mechanical properties of the material on the grain boundaries and around β - $Mg_{17}Al_{12}$ phases.

Key Word : Gas atomization, AZ91 alloy powder, silicon powder, antimony powder, chrome powder.

Science Code : 915.1.195

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez alışmasında başta sabırla ve inanla tım desteğini vermiş olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mustafa BOZ hocama, kıymetli jüri hocalarım Doç. Dr. Mehmet ÜNAL ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ'a, daima yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN, Prof. Dr. Halil DEMİR ve Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ hocalarıma sonsuz teőekkürlerini sunarım. Çalışma arkadaşlarım Ahmet Serdar GÜLDİBİ, Muhammet ELİTAŐ, Demet TAŐTEMÜR, Yusuf AYAN ve Talha SUNAR'a, son olarak da beni asla yalnız bırakmayan fedakâr aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Yapılmış olan alışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü tarafından oluşturulan KBÜ-BAP-17-YL-485 no'lu proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Verdikleri desteklerden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü'ne teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 3	16
TOZ METALURJİSİ	16
3.1. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMALATI.....	20
3.1.1. Karıştırma ve Harmanlama.....	20
3.1.2 Tozların Şekillendirilmesi	21
3.1.2.1. Ekstrüzyon	21
3.1.2.2. Haddeleme.....	22
3.1.2.3. Presleme	23
3.1.3. Sinterleme	26
BÖLÜM 4	30
MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	30
4.1. MAGNEZYUMUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	31

	<u>Sayfa</u>
4.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	33
4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI	33
4.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ	37
4.4.1. Alüminyumun Etkisi.....	37
4.4.2. Demirin Etkisi.....	38
4.4.3. Manganın Etkisi.....	38
4.4.4. Çinkonun Etkisi	39
4.4.5. Zirkonyumun Etkisi	39
4.4.6. Bakırın Etkisi	39
4.4.7. Nikelin Etkisi.....	40
4.4.8. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi	40
4.5. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	40
4.5.1. Otomotiv Endüstrisinde	40
4.5.2. Havacılık Endüstrisinde.....	42
4.5.3. Biyomalzeme Endüstrisinde	43
BÖLÜM 5	45
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
5.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	46
5.1.1. Tozların Karıştırılması.....	46
5.1.2. Tozların Sıcak Preslenmesi	48
5.2. NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU	50
5.2.1. XRF Analizi.....	50
5.2.2. Yoğunluk Ölçümü	50
5.2.3. Mikro Yapı Görüntüleme ve SEM Analizleri	51
5.2.4. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri.....	53
BÖLÜM 6	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	55
6.1. NUMUNELERİN XRD VE XRF ANALİZLERİ	55
6.2. NUMUNELERİN BAĞIL YOĞUNLUKLARI	57

	<u>Sayfa</u>
6.3. NUMUNELERİN MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ	58
6.4. NUMUNELERİN SEM-EDX ANALİZLERİ	63
6.5. NUMUNELERİN SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	77
BÖLÜM 7	80
GENEL SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	AZ91 tane sınırları etrafındaki çin harfi şekilli Mg_2Si arafazları.....	5
Şekil 2.2.	Kaba iğne tane şeklinde oluşan Mg_3Sb_2 arafazları.....	13
Şekil 3.1.	Toz metalürjisi ile üretim aşamaları.....	17
Şekil 3.2.	Üretim yöntemlerine göre toz şekilleri.....	19
Şekil 3.3.	Toz metalürjisi üretim şeması	19
Şekil 3.4.	Toz karıştırma turbulası	21
Şekil 3.5.	Ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi.	22
Şekil 3.6.	Haddeleme sistemi.	22
Şekil 3.7.	Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.8.	Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.9.	Soğuk izostatik presleme şematik gösterimi.	25
Şekil 3.10.	Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi.	26
Şekil 3.11.	Sinterleme işmenin aşamaları.	27
Şekil 3.12.	İki tanenin sinterleme profili.....	28
Şekil 3.12.	İki tanenin sinterleme modeli	29
Şekil 3.13.	Sinterleme esnasında gözenek yapısının değişiminin şematik resim	29
Şekil 4.1.	$Mg-Al$ faz diyagramı	38
Şekil 4.2.	Kapı içlerinde AZ91 kullanılmış örnekler	41
Şekil 4.3.	Land Rover Gösterge paneli ve Direksiyon simidinde AZ91 kullanımı. 41	
Şekil 4.4.	ATAK helikopterinin dişli kutusu üst gövdesi	42
Şekil 4.5.	Yüzey bozulması sırasında Mg esaslı malzemeler ile biyo-çevre arasındaki dinamik arayüz.....	44
Şekil 5.1.	AZ91, Si ve Sb tozları	46
Şekil 5.2.	RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı	46
Şekil 5.3.	3 boyutlu turbula cihazı.....	47
Şekil 5.5.	Sıcak presleme sonrası üretilen numunelerin genel görünümü.....	49
Şekil 5.6.	Deneylerde kullanılan KERN 2216 markalı hassas terazi.	50
Şekil 5.7.	Dağlama için kullanılan pikral çözeltisi.....	51

Şekil 5.8. Olympus marka ters metalürjik mikroskop.....	52
Şekil 5.9. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM analiz cihazı.....	52
Şekil 5.10. HMVG marka mikro sertlik ölçüm sistemi.	53
Şekil 5.9. HBD 3000Z1 marka Brinell sertlik cihazı	54
Şekil 6.1. Si ilaveli numunelerin XRD grafikleri	56
Şekil 6.2. Si+Sb ilaveli numunelerin XRD grafikleri	56
Şekil 6.3. Saf AZ91 numunesinin 200x ve 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüleri	58
Şekil 6.4. Si ilaveli numunelerin 200x büyütme optik mikroskop görüntüleri.....	59
Şekil 6.5. Si + Sb ilaveli numunelerin 200x büyütme optik mikroskop görüntüleri	60
Şekil 6.6. Si ilaveli numunelerin 500x büyütme optik mikroskop görüntüleri.....	61
Şekil 6.7. Si + Sb ilaveli numunelerin 500x büyütme optik mikroskop görüntüleri	62
Şekil 6.8. Üretilen Si ilaveli numunelerin SEM görüntüleri (1000X).....	63
Şekil 6.9. Yüzde (%) 0.1 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 6 EDX analizi	65
Şekil 6.10. Yüzde (%) 0.2 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 5 EDX analizi	66
Şekil 6.11. Yüzde (%) 0.3 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	67
Şekil 6.12. Yüzde (%) 0.4 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	68
Şekil 6.13. Yüzde (%) 0.5 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 2 EDX analizi	69
Şekil 6.14. Üretilen Si+Sb ilaveli numunelerin SEM görüntüleri (1000X).....	71
Şekil 6.15. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.1 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	72
Şekil 6.16. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.2 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analiz	73
Şekil 6.17. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.3 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	74
Şekil 6.18. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.4 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	75
Şekil 6.19. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.5 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi	76
Şekil 6.20. Üretilen numunelerin α -Mg fazı mikrosertlik ($HV_{0.5}$) değerleri.....	77
Şekil 6.21. Üretilen numunelerin Si fazı mikrosertlik ($HV_{0.5}$) değerleri.	78
Şekil 6.22. Üretilen numunelerin sertlik (HB) değerleri.....	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Magnezyumun fiziksel özellikleri	31
Çizelge 4.3. Alaşım elementleri ve kısaltmaları	34
Çizelge 4.4. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94)	34
Çizelge 4.5. AZ91 mekanik özellikleri	36
Çizelge 4.6. AZ91 fiziksel özellikleri	36
Çizelge 4.7. AZ91 kimyasal bileşimi.....	36
Çizelge 4.8. Farklı biyomalzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal kemik ile karşılaştırılması.....	43
Çizelge 5.1. Literatürdeki AZ91 alaşımının kimyasal bileşiminin çalışmada kullanılan AZ91 alaşımı ile karşılaştırılması.	47
Çizelge 5.2. AZ91 alaşımlarına katılan Si oranları ve numune kodları	47
Çizelge 5.2. AZ91+ % 0.3 Si alaşımlarına katılan Sb oranları ve numune kodları ..	48
Çizelge 6.1. Numunelerin XRF sonuçları.....	57
Çizelge 6.2. Numunelerin bağıl yoğunluk değerleri	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Bi	: bizmut
Sb	: antimon
Si	: silisyum
Ca	: kalsiyum
β	: beta, beta fazı
C	: karbon
α	: alfa, alfa fazı
Ni	: nikel
Fe	: demir
Pb	: kurşun
Ti	: titanyum
Zn	: çinko
Cu	: bakır
Sr	: strontiyum
Zr	: zirkonyum
Mn	: mangan
Ag	: gümüş
Be	: berilyum
Y	: itriyum
γ	: gama, gama fazı

KISALTMALAR

AM50 : %5 Alüminyum ve %0.5 mangan içerikli magnezyum alaşımı

AM60 : %6 Alüminyum ve %0.5 mangan içerikli magnezyum alaşımı

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

AZ61 : %6 Alüminyum ve %1 çinko içerikli magnezyum alaşımı

AZ91 : %9 Alüminyum ve %1 çinko içerikli magnezyum alaşımı

EDX : Energy-dispersive X-ray spectroscopy (Enerji yayımlı X-ışını analizi)

HRB : Brinell sertlik değeri

HRV_{0.5}: 0.5 kg yük uygulanmış Vickers sertlik değeri

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)

XRD : X-ray diffraction (X-ışını kırınım analizi)

XRF : X-ray fluorescence (X-ışını floresan analizi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Magnezyum 1,74 gr/cm³ yoğunluğa sahip toprak alkali metalleri sınıfında dahil 650 °C ergime sıcaklığına ve 1107 °C kaynama noktasına sahip bir yapısal metaldir [1]. Hafifliği ve yüksek özgül dayanımı sayesinde havacılık, otomotiv, medikal ve savunma sanayii gibi alanlarda geniş kullanım alanına sahip magnezyum elementi alaşımsız olarak kullanıldığında düşük tokluk ve mukavemet özellikleri göstermektedir. Magnezyum malzemeleri alaşımlandırılarak boyutsal kararlılık, yüksek ısıl iletkenlik, sönümlenme ve iyi şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip olmaktadır. Özellikle korozyon dayanımları ve özgül dayanımlarından dolayı gün geçtikçe diğer alaşımlara göre daha çok magnezyum alaşımlarının niteliklerini geliştirmek ve üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla birçok çalışma yapıldığı Fahrettin ÖZTÜRK vd. [2] tarafından vurgulanmıştır.

Üstün korozyon direnci, yüksek özgül dayanımı ve iyi döküm kabiliyeti nedeniyle magnezyum alaşımları arasında en çok AZ91 alaşımları kullanılır. İsmi içerdiği kütlece %9 alüminyum ve %1 çinkodan alan alaşım bu elementlerle birlikte düşük miktarda silisyum, mangan, nikel, demir ve diğer metalik elementler içermektedir. Ayrıca AZ91 alaşımları içerisinde genellikle α -Mg fazlarının tane sınırlarının etrafına sıralanan β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazları bulunmaktadır. β fazları malzeme içerisinde oda sıcaklığında dayanımda bir artış gösterirken, 200 °C üstü sıcaklıklarda dayanımda azalma göstermektedir [3]. Özellikle yüksek sıcaklıklarda görülen dayanım ve sertlik düşüşleri, AZ91 alaşımlarının motor blokları gibi alanlarda kullanılmasında sorunlara yol açmaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki sertlik ve dayanım düşüşlerinin önüne geçilebilmesi için çeşitli Bi, Sb, Si, Ca gibi çeşitli nadir toprak elementleri ilave edilmektedir [4]. Döküm teknolojisiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımlarına yapılan silisyum ilavesi sonucunda β fazları etrafında Çin harfleri şeklinde oluşan Mg₂Si fazları nedeniyle malzemenin sertlik ve dayanımında düşüşler

meydana gelmektedir. Alaşım içerisinde Sb, Sr gibi ilave edilen elementler sonucunda oluşan Mg₂Si fazları ̢ fazları etrafında okgen Şekiller oluşturmakta ve daha düzgün bir sırayla dağılmaktadır. Mikroyapıdaki bu değişiklik AZ91 alaşımının hem dayanım ve sertliğinin artmasını hem de korozyon direncinin güçlenmesini sağlamaktadır [5,6].

Bu çalışmada literatür araştırmaları sonucu, toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş AZ91 tozlarına Si ve Sb ilavelerinin mekanik özelliklere olan etkisinin çalışılmadığı gözlemlenmiştir. Toz metalürjisi alanındaki bu boşluğun giderilmesi ve yeni bilgilerin keşfedilmesi amacıyla bu çalışma hazırlanmıştır.



BÖLÜM 2

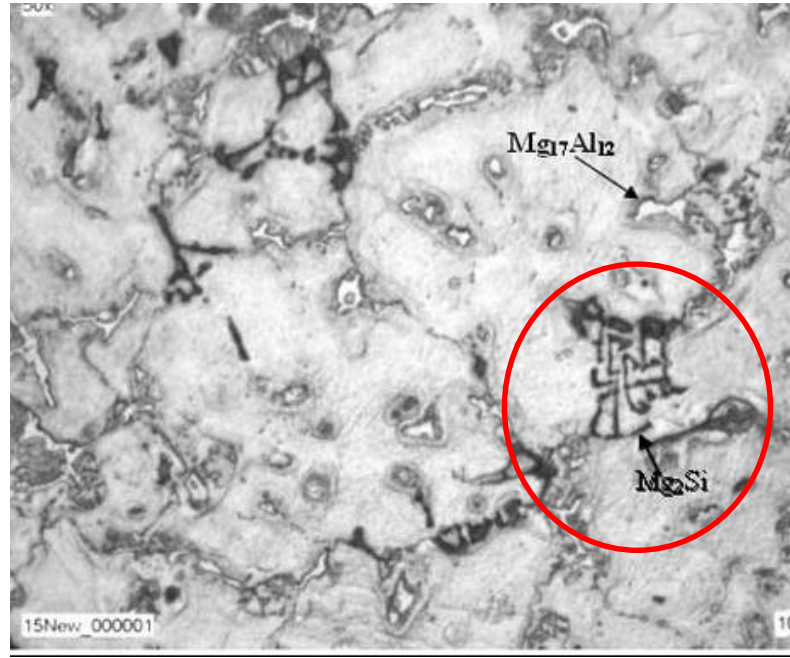
LİTERATÜR TARAMASI

ÜNAL vd. [7] AZ91 magnezyum alaşımına döküm teknolojisiyle Si ilave ederek malzemenin döküm ve mekanik özelliklerindeki değişimi gözlemlemiştir. Atmosfer kontrollü ocak içerisinde yapılan döküm işleminde ağırlıkça %0,2 ve %2,0 oranlarında silisyum ilave edilmiştir. Akıcılık deneyleri için akıcılık spirali ve sıcak yırtılma deneyleri için özel kalıp kullanılmıştır. İlave edilen Si sonucunda akıcılık oranı %25 azalmış ve sıcak yırtılmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca %0,4 Si ilavesine kadar parçanın sertliğinde ve akma-basma dayanımında düşüşler, daha fazla ilave edildiğinde ise artışlar gözlemlenmiştir. Uzama değerlerinde %0,2 ve %0,3 Si ilavesi sonucunda bir azalma gözlemlenirken, diğer değerlerde kayda değer bir değişim ortaya çıkmamıştır. Araştırmacılar sertlik ve dayanım artışını α -Mg tanelerinin aralarındaki farkın azalmasıyla ve Mg_2Si fazlarının dislokasyon hareketlerini engellemesiyle bağlantılı olabileceğini açıklamışlardır.

Srinivasan vd. AZ91 alaşımı üzerine Si ve Sb ilaveleriyle ilgili bir çok çalışmada bulunmuşlardır ve bu çalışmalarında numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini, korozyon davranışlarını, sürünme özelliklerini ve yaşlanma özelliklerini incelemiştir [5,6,8,9]. Temel üretim yöntemi olarak döküm metodu seçilmiş ve çalışmalar bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla kütle oranında %0.2 Si ve %0.2 Sb AZ91 alaşımına ilave edilmiş, son olarak iki element aynı anda ilave edilerek numunelerin mikrogörüntüleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir [5]. Çalışmalar göstermiştir ki Si ilavesi, $Mg_{17}Al_{12}$ - β fazı tane sınırlarında çin harfi şeklinde Mg_2Si fazı oluşturmuş ve bu da dayanım ve sünekliğinde azalmaya yol açmıştır. Az miktarda Sb ilavesi ise Mg_2Si fazlarının tane sınırlarında daha düzenli dağılmasını sağlamıştır. Yüksek ve oda sıcaklıklarında en iyi dayanım Sb ve Si ilavesinin birlikte yapıldığı numunelerde gözlemlenmiştir. Yapılan çekme ve darbe çentik testleri sonucunda kırılan yüzeyler incelenmiş ve gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Si ilavesi

yarılma benzeri yüzeyleri artırmış, Sb ilavesi de aynı etkiyi gösterirken plastik bölgelerin de çoğalmasını sağlamıştır. Bir başka çalışmada AZ91 alaşımı üzerinde Si ve Sb ilavesinin yaşlandırmaya olan etkileri incelenmiştir [8]. Yapılan çalışmada 410 °C’de 48 saatlik solüsyon işlemi uygulanmış ve ısı kararlı Mg₂Si ve Mg₃Sb₂ arafazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. AZ91 alaşımına yaşlandırma işlemi sonunda Mg₁₇Al₁₂-β fazlarının sürekli ve süreksiz olacak şekilde iki biçime sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları, Si ve Sb ilavelerinin yaşlanma sırasında süreksiz çökelti oluşumunu baskıladığını göstermiştir. Sert intermetalik fazlar etrafında gözlenen yoğun sürekli çökeltme bölgeleri, süreksiz çökeltilerin hem başlatılması hem de ilerletilmesi için gereken kimyasal itici güç miktarını azaltır. Bu gözlemlere rağmen, yaşlandırılmış alaşım numunelerinin sertlik ölçümleri, alaşım ilavelerinin AZ91’in en büyük sertlik değerini önemli ölçüde iyileştirmediğini göstermektedir. Araştırmacılar aynı alaşım ve ilavelerinin sürünme özelliklerini de incelemişler [9] ve oluşan arafazların etkilerini araştırmışlardır. Bunun için AZ91 magnezyum alaşımına % 0.5 Si ve % 0.2 Sb ilave etmişler 150 ile 200 °C’deki sürünme davranışlarını gözlemlemiştir. Sonuçlar Si ve Sb elementlerinin birlikte ilave edilmesi sonucu ince çokgen şekilli Mg₂Si fazlarının oluştuğunu ve bu fazların tane sınırları etrafında düzenli bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ayrıca bu ilavelerin yaşlandırma esnasında oluşan süreksiz Mg₁₇Al₁₂-β fazlarının oluşumunu engellediği gözlemlenmiştir. Tüm bu oluşan mekanizmalar malzemenin 150 ve 200 °C’deki sürünme davranışlarını geliştirmiştir. Ek olarak, kararlı durum sürünmesi uzamış, minimum sürünme oranı ve sürünme gerilmesi azalmıştır. Araştırmacılar sürünme özelliklerindeki bu gelişmenin ince ve kararlı Mg₂Si çökeltilerinin oluşması ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Son olarak araştırmacılar aynı alaşım ve ilavelerinin korozyon davranışlarını incelemiştir [6]. AZ91 alaşımı üzerine az miktarda silisyum ve antimon ilavesi (bireysel ve birleşik) yapılmış ve elektrokimyasal korozyon davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daldırma testi, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans ölçümleri korozyon oranını ve davranışını tahmin etmek için kullanılmıştır. Si ve Sb’nin tek başına eklenmesi, sırasıyla büyük çin harfi şeklindeki Mg₂Si arafazlarını ve iğne şeklindeki Mg₃Sb₂ intermetaliklerini oluşturur. Sb’nin AZ91 + Si alaşımına eklenmesinin, çin harfi (Şekil 2.1) şekilli Mg₂Si fazlarını tane sınırları boyunca eşit bir şekilde dağıtmasının yanı sıra ince çokgen bir şekle dönüştürdüğü bulunmuştur. Si ilavesiyle korozyon direncinin arttığı

gözlemlenirken, Sb ilavesinin AZ91 alaşımının korozyon direncini azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte, Si ve Sb elementlerinin birlikte ilave edilmesi sonucunda, en yüksek korozyon direnci elde edilmiştir. Mg_2Si arafazı çokgen şekle ve düzgün dağılıma sahipken korozyonu, çin harfi şekilli büyük fazlara kıyasla daha etkin bir şekilde önlemiştir. Öte yandan, Sb katkılı alaşımdaki Mg_3Sb_2 intermetalik fazı, a-Mg matrisine etkili bir katod görevi görerek oluşan korozyonu artırmıştır.



Şekil 2.1. AZ91 tane sınırları etrafındaki çin harfi şekilli Mg_2Si arafazları.

Trojanova vd. [10] ticari saflıkta AZ91 alaşımına Si ve SiC ilavelerinin mekanik ve kırılma özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir, üretim yöntemi olarak dökümü tercih etmişlerdir. “Yerinde” bir kompozitin (Mg- Mg_2Si) oluşturulması, Mg_2Si fazlarının ana matris ile güçlü bir bağ oluşması ile meydana gelir. Numuneler, oda sıcaklığından 300 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığında sıkıştırılmıştır. Termal olarak aktive olan işlemleri ortaya çıkarmak için gerilme gevşemesi testleri yapılmıştır. SiC ve Mg_2Si partiküllerinin güçlendirici etkisi artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır. Aktivasyon hacminin yanı sıra aktivasyon entalpisinin tahmini değerleri, termal olarak aktif olan ana işlemin, iç stresin hızlı bir düşüşüyle bağlantılı olduğunu göstermiştir. Kırılma özellikleri, çeşitli sıcaklıklarda darbe çentik testlerinde incelenmiştir. Tüm kırılma testlerinde malzemenin gevrek olduğu görülmüştür. 200 °C'de ve 200 °C'nin

üzerindeki sıcaklıklarda bir süneklik artışı gözlemlenmiştir. SiC ilavesi sonucunda anamatis ve SiC bağlarında alüminyum elementi tepkimeye girerek çatlakları artırmış ve darbe dayanımını düşürmüştür. Araştırmacılar SiC ilavesinin malzemeye faydadan çok zararlı etkilerinin olduğunu iddia etmişlerdir.

Sheng vd. [11] AZ91 alaşımlarına Si ilavesinin hızlı katılma ve toz metalürjisine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma için AZ91 alaşımlarına %2 Si ilave edilmiş ve gaz atomizasyon yöntemi sonrasında uygulanan su soğutmalı bakır haddeler ile pulsu toz taneleri elde edilmiştir. Oluşan tozların boyutları 1–5 µm metre arasında değişkenlik göstermiş olup, taneler içerisinde Mg_2Si , $\beta-Al_{12}Mg_{17}$ ve $AlMg_2Zn$ ara fazları gözlemlenmiştir. Si ilaveli AZ91 alaşımı tozlarının % 0.2 akma dayanımı 322.47 MPa, çekme dayanımı 429.78 MPa olarak ölçülmüş; gerinim oranı ise %6.4 olarak belirlenmiştir. Artan sıcaklık değerlerinde (423, 473, 523 K) alaşımın dayanımında yüksek düşüşler meydana gelmiştir.

Feng vd. [12] AZ91 alaşımına Ca ve Si ilaveleri yaparak, döküm yöntemiyle üretilen numunelerin mikro yapısını, termal kararlılığını ve β fazlarının oluşumunu incelemişlerdir. Bu çalışma için Ca tek başına ve Si ile birlikte ilave edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Az miktarda katılan Ca elementi malzemenin β fazları içinde çözülmüş ve bu fazların termal kararlılığını yükseltmiştir. Bunun sonucunda malzemenin yüksek sıcaklıklardaki dayanımı da artmıştır. Ca ve Si elementlerinin birlikte ilavesi sonucunda malzemenin oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki akma ve çekme dayanımları artmıştır. Ayrıca bu elementlerin ilavesi ile sürünme dayanımı da gözle görülür derecede artmıştır. Sürünme dayanımı ve çekme dayanımının en yüksek olduğu değerler % 0.3 Ca ve % 0.6 Si ilaveli numunelerde görülmüştür. Sürünme oranı ilavesiz AZ91 numunelerinde % 25.76 iken, % 0.3 Ca ve % 0.6 Si ilavelerinde % 2.24'e kadar düşmüştür.

Huang vd. [13] AZ91D alaşımına Si ilavesinin mikroyapıya olan etkisini optik mikroskop yöntemiyle ve XRD yöntemiyle incelemişlerdir, sonrasında ise oda sıcaklığında çekme dayanımlarını ve sertliklerini malzeme muayene yöntemleriyle belirlemişlerdir. Oluşan kırılma yüzeyleri elektron mikroskobu ile taranmıştır. Döküm yöntemiyle üretilen numunelerde mikroyapılar incelendiğinde Mg_2Si arafazlarının çin

harf şeklinde tanelerin etrafında sıralandığı görülmüştür. Bu yapı tozların akma ve çekme dayanımlarını düşürmüştür. Kırılan yapıların SEM görüntüleri incelendiğinde gevrek kırılmalara rastlanmış ve bu kırılmaların Mg_2Si arafazlarından dolayı arttığı tespit edilmiştir.

Erarslan ve Akça [14] AZ91D magnezyum kompozitinin aşınma davranışını incelemişlerdir. % 2, 4, 8 ağırlık oranlarında SiC malzemesini karıştırırmalı döküm yöntemiyle AZ91D magnezyum alaşımına karıştırmışlardır. AZ91 magnezyum malzemesine SiC parçacıkları ilavesiyle oluşan kompozit malzemenin sertliğinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Aşınma testine göre 7 μm çaplı kompozit malzemelerin sürtünme katsayısı 32 μm çaplı kompozitlerden daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Bao vd. [15] gaz atomizasyonu ile üretilen Al ve Ni tozlarının yapısal karakterizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada amaçları, yapıyı incelemek ve yüzeydeki ve tanelerin hacmindeki mevcut fazları tanımlamaktır. Ağırlık fraksiyonlarının değiştiği zaman üç ana faz elde edildiğini bu fazlar ise; Al_3Ni_2 , Al_3Ni ve Al olduğunu tespit etmişlerdir. İncelenen tozların herhangi birinde $B_2 AlNi$ fazının olmadığını görmüşlerdir. Yaklaşık 200 m'den daha küçük çaplı tanelerde azalan boyutla artan bir miktarda bir veya birkaç ek metastabil faz bulmuşlardır [13].

Zdujic ve Uskokovic [16] dönen elektrod yöntemiyle metal ve alaşım tozlarının atomizasyonu üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada santrifüj atomizasyon yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemle refrakter metallerin atomize edilebileceği ve dahası üretilen tozların saf ve ince taneli olabileceğini rapor etmişlerdir. Çalışmada demir, nikel ve titanyum tozları üretmişlerdir. Soğutma işleminde argon ve helyum gazlarını kullanmışlardır. Parçacıkların ortalama boyut ve boyut dağılımını, dönen elektrodun hızını ve çapını değiştirerek kolayca ve doğru bir şekilde değiştirmişlerdir. Herhangi bir malzeme, erime hızını arttırarak partikül boyutu aralığını genişletmişlerdir. Santrifüjlü atomize tozlar, toz oluşumunda reaktif metallerin ve alaşımların üretiminde küresel bir parçacık şekliyle ve yüksek saflıkta karakterize edilebileceğini rapor etmişlerdir.

Ünal [17], eriyik iletim borusunun ucundaki basınç oluşumunun kalay tozu boyutu ve gaz atomizasyon yöntemindeki gaz / erime oranı üzerine etkisini incelemiştir. Eriyik verme borusunun çıkıntı uzunluğunun eriyik ucundaki basınç oluşumu üzerindeki etkisini araştırarak kalay tozu üretmek için yeni tasarlanmış bir yakın bağlantılı nozul sistemi kullanmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, gözlemlenen metal akış oranının daha önce varsaydığı gibi davranmadığını, yani daha derin emme metal akış oranının arttırdığını rapor etmişlerdir. Ergiyik akış hızını, atomize edici gaz basıncının artırılmasıyla azaltmıştır. Aynı çıkıntı uzunluğu için gazın, erime kütle akış oranını arttırdığını ve bu oran artışının, daha ince toz parçacık boyutuna neden olduğunu gözlemlemişlerdir. 5 ve 15 mm çıkıntı uzunlukları için 1.0-3.5 MPa püskürtme gazı basıncında eriyik verme tüpünün ucunda daima negatif basınç olduğu vurgusunu yapmışlardır. Öte yandan, 10 mm çıkıntı uzunluğu için 1.0-2.0 MPa basınç aralığında pozitif ve negatif değerler arasında eriyik borusu ucunda basınç dalgalanması olduğunu belirtmişlerdir. Atomizasyon süreci 5 mm ve 10 mm çıkıntı uzunluklarından 15 mm çıkıntı uzunluğu için daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Aydın ve Ünal [18] laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada Dumlupınar gaz atomizasyon ünitesi kullanılarak kalay tozu üretilmiştir. Nozul olarak dairesel yarıkli süpersonik bir nozul tasarımı ve imalatı yapmışlardır ve toz üretiminde bu nozulu kullanmışlardır. Sıcaklık olarak 430 °C' ye kadar çıkmışlardır. Atomizasyon gazı olarak azot gazı kullanmışlardır. Çalışmanın genel amacı daha az gaz kullanarak daha ince ve daha küresel metal tozları elde etmek için yeni bir nozul tasarımı ve imalatı yaparak toz üretimi gerçekleştirmek istemişlerdir. Üretimden sonra toz boyut analizi, tozların şeklinin SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapılarının üretim parametrelerine etkilerini incelemişlerdir.

Sofuoğlu [19] gaz atomize edilmiş alüminyum ve kalay tozlarının üretim parametrelerinin incelenmesi üzerinde deneysel ve nümerik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, gaz atomizasyonunun üretim parametreleri incelenmiştir. Çalışmada, gaz atomize edilmiş alüminyum ve kalay tozlarının toz parçacık boyutları için atomizasyon parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Gaz basıncı, nozul çıkış bölgesi, çıkıntı uzunluğu, ergiyik dağıtım tüp (nozül) çapı ve süper sıcaklık ısısı atomizasyon

parametreleri olarak seçilmiştir. Atomizasyon nozulları, atomizasyon gazının ve erimiş metalin konumuna göre serbest düşüş ve yakın bağlantılı olmak üzere iki temel türe ayrıldığı vurgulanmıştır. Gaz basıncı ve süper ısı sıcaklığı toz parçacık ortalama büyüklüğünü önemli ölçüde etkilediğini tespit etmiştir. Gaz basıncı ve süper ısı sıcaklığı arttığında, toz parçacık boyutu azaldığını tespit etmiştir. Çıkıntı uzunluğu ve gaz basıncındaki artış kalay toz parçacık boyutundaki azalmaya neden olduğu rapor edilmiştir. Ergiyik dağıtım çapı, çıkıntı uzunluğu ve nozul çıkışı bölgesinin toz parçacık ortalaması üzerinde çok az etkisi olduğunu tespit etmiştir.

Akgün vd. [20] döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada, döküm yöntemiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımının üretimi ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. AZ91 magnezyum alaşımı ergitme ocağında eritilip metalik kalıplara dökülerek üretilmiştir. Üretilen magnezyum alaşımları kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği bakımından incelenmiştir. Artan kesme hızına göre yüzey pürüzlülük değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada; magnezyum ve alaşımlarının tüm yapısal malzemelerden daha yüksek işlenebilirliğe sahip olduğu rapor edilmiştir.

Persson vd. [21] su atomize edilmiş metal tozları için partikül boyutunun tahmini üzerine parametre çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, atomizasyon parametrelerinin su atomize edilmiş metal tozlarının parçacık boyutuna etkisinin önemini araştırmışlardır. Dv50 tahmini için yayınlanmış modeller uygulanmış ve deney verileri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bazı önemli atomizasyon parametrelerinin parçacık boyutunu nasıl etkilediğini incelemek için Fe-C alaşımlarının model hesaplamaları ve atomizasyon testleri kullanılmıştır. Su basıncının ve viskozitesinin etkisi hem model hesaplamaları hem de atomizasyon deneyleri ile yapılmıştır. Model hesaplamalarında, su basıncı, ergiyik akış oranı, su püskürme açısı, sıvı metal viskozitesi ve yüzey gerilimini parametre olarak kullanmışlardır. Atomizasyonda % 0,5 - 4,4 C içeren sıvı demir demir deneyleri uygulamışlar ve karşılaştırmışlardır. Dv50 üzerindeki etkisi su basıncı için yüksek, viskozite için orta, ergiyik akış hızı ve yüzey gerilimi için düşük olduğunu tespit

etmişlerdir. Model hesaplamaları jet açısının Dv50 üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve ilave çalışmalarla doğrulanacağını rapor etmişlerdir.

Uslan ve Küçükarslan [22] kalay tozu üretimine gaz atomizasyonu parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada gaz atomizasyon yöntemi kullanılmış ve bu yöntemle kalay tozu üretmişlerdir. Deneyleri Gazi Üniversitesinde bulunan gaz atomizasyon ünitesinde yapmışlardır. Deneylerde yakından eşlemeli Mannesmann tipi nozul kullanmışlardır. Atomizasyon gazı olarak hava kullanmışlardır. Toz üretim parametreleri; sıcaklık olarak 400 °C de sabit, 5-30 bar basınç aralığında ve nozul çıkıntısı olarak 2-8 mm mesafelerde atomize etmişlerdir. En ince toz boyutu 68,50 µm olarak, 400 °C de, 3 mm nozul çapında, 8 mm çıkıntı mesafesinde ve 10 bar basınçta elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Tozların genel olarak karmaşık şekilli olduğunu tespit etmişlerdir. Gaz basıncı ve nozul çıkıntı yüksekliği arttırıldığı zaman toz boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir.

Duygulu vd. [23] magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada ikiz merdaneli sürekli döküm tekniği ile AZ31, AZ61, AZ91, AM50 ve AM60 magnezyum alaşımlarını levhalar halinde 4-8 mm kalınlıklarda 1500 mm eninde üretmişlerdir. Daha sonra üretilen bu alaşımlara homojenleştirme ısıl işlemi yapılmıştır. Isıl işlemden sonra optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu ve geçirimli elektron mikroskopu ile incelemeler yapmışlardır. Alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, alaşımlara çekme deneyi ve sertlik deneyleri uygulanmıştır. Magnezyum 1,74 gr/cm³ yoğunluk ile tüm yapısal metallerin en hafifi olduğu ve magnezyumun, alüminyumdan 1,5 kat, titanyumdan 3 kat ve demirden 4 kat daha yoğun olduğunu rapor etmişlerdir. Magnezyum alaşımları yüksek özgül mukavemete, yüksek spesifik sertliğe, iyi dökülebilirliğe ve işlenebilirliğe, hacim birimi başına düşen ısı içeriğine, yüksek sönümlenme kapasitesine ve iyi bir elektromanyetik görüntüleme özelliğine sahip olduğunu vurgulamışlardır. Magnezyumun kolay kaynak edilebileceğini, darbeye ve darbe direncine dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Magnezyum dünya yüzeyinde altıncı en bol metal ve sekizinci elementtir ve dahası, magnezyum kolayca geri dönüştürülebilir, magnezyum alaşımlarının etkili bir ısı dağılımı olduğunu rapor etmişlerdir.

Dunkley [24] Atomları parçalayarak: metal tozu nasıl yapılır konusu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Toz metalürjisi, metal tozlarının tutarlı kalitesinin sağlanması ekonomikliğe bağlı olduğunu tespit etmiştir. Metal tozlarının çoğunluğu artık erimiş metallerden atomizasyon yoluyla üretilmekte olduğunu vurgulamıştır. Su atomizasyonunda, erimiş metali parçalamak ve söndürmek için yüksek basınçlı su püskürtme jetleri kullanıldığını tespit etmiştir. Parçacık boyutunun basınçla yakından ilgili olduğunu vurgulamıştır. Birçok ünite 100-200 Bar'da çalışıp ve yaklaşık 30-100 µm arasında toz üretirken, Japonya'daki bazı özel üniteler 1500 Bar'a kadar çıkıp ve tozları 10 µm kadar inceltildiğini rapor etmiştir. Tonaj açısından, su atomizasyonu tozlar, metal ve özellikle de demirden oluşan metaller için en önde gelen yöntem haline geldiğini öne sürmüştür. Genel olarak, su atomizasyon yöntemi, düşük maliyetli ortamından (su) ötürü diğer yöntemlerden daha ucuzdur, gaz veya hava ile karşılaştırıldığında düşük enerji kullanımı ve çok yüksek üretkenliğe sahip olduğunu tespit etmiştir. Su atomizasyonunun temel sınırlamaları toz saflığı, partikül şekli ve özellikle de daha reaktif metaller ve alaşımlar olduğunu rapor etmiştir. Gaz atomizasyonu, sıvı metalin hava, azot, argon veya helyum gibi yüksek hızlı bir gazla parçalanması işlemi olduğunu vurgulamıştır. Çalışma basınçları 5-100 bar aralığında olabileceğini tespit etmiştir. 15-60 bar aralığındaki basınçlarda, soy gaz ile atomize edilmiş demir, nikel ve kobalt alaşımları yapmak için kullanıldığını örneklemiştir. Gaz atomizasyonunun pek çok açıdan su atomizasyonundan farklı olduğunu vurgulamıştır. Su atomizasyonu basıncın önemli olduğunu ama gaz atomizasyonunda ise gaz akış hızı, parçacık boyutunu kontrol eden önemli bir faktör olduğunu tespit etmiştir. Gaz atomizerleri, su atomizerlerinden daha geniş bir tasarım yelpazesinde bulduklarını ve çoğunlukla kapalı veya serbest düşme nozul konfigürasyonları olarak sınıflandırıldığını rapor etmiştir.

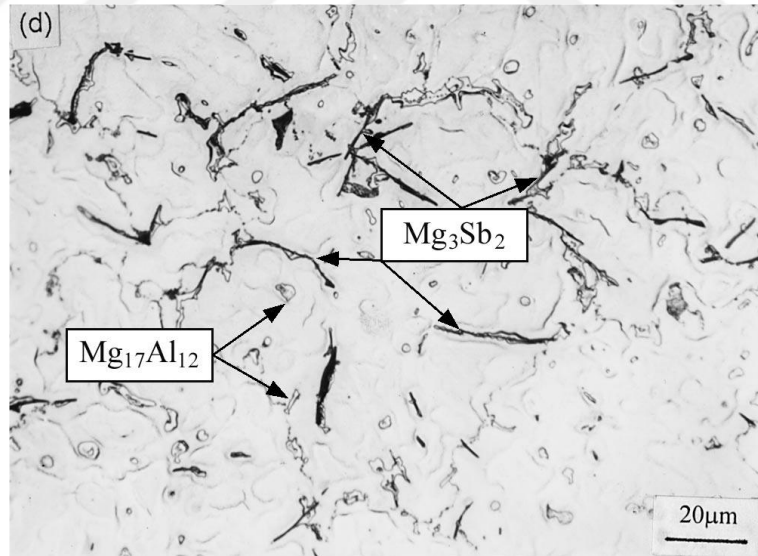
Denigris [25] yüksek kalite, daha iyi proses ekonomisi: gaz atomizasyon proseslerini geliştirmek için kesintisiz partikül boyutlandırma kullanımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Gaz atomizasyon işlemleri, metal enjeksiyon kalıplama, düzenli şekillendirilmiş metal parçacıkları ve çoğalan üretim gibi diğer metalürji proseslerini yüksek kalitede üretmek için rutin olarak kullanıldığını vurgulamıştır. Atomizasyonun giderek daha sıkı piyasa gereksinimlerini karşılamak için sürekli olarak yakından tanımlanmış bir özelliğe sahip parçacıklar üretmek için kontrol edilmesi esası

olduğunu vurgulamıştır. Sıralı veya bağlantılı analizör ile kesintisiz parçacık boyutlandırma hem ürün kalitesini hem de proses ekonomisini önemli ölçüde geliştiren ve süreç kontrolünü daha iyi mümkün kılan bir seçenek olabileceğinin tespitini yapmıştır. Bu çalışmada, metal tozu üretiminde kanıtlanmış değerin süreç analitik teknolojilerini ve kesintisiz partikül boyutlandırma yönteminin benimsenmesinden elde edilen kazanımları araştırmıştır. Bu araştırmalara gelişmiş ürün kalitesi, daha yüksek verim ve artırılmış işlem verimliliği dahil edilmiştir. Bağlantılı lazer difraksiyon sistemlerini, metal tozu üretiminde kesintisiz partikül boyutu analizi için kurduğunu rapor etmiştir.

Oğuz vd. [26] gaz atomizasyonu yöntemi ile kalay tozu üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekline etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada ilk olarak gaz atomizasyon ünitesi imalatı yapmışlardır. Gaz atomizasyon ünitesinin indüksiyon fırını, nozul, atomizasyon kulesi ve toz tutma ünitesi olarak dört ana bölümden oluştuğunu rapor etmişlerdir. Ergitme için grafit pota kullanmışlardır. Nozul olarak yakından eşlemeli ve dairesel yarıklı nozul kullanmışlardır. Deneyler 500 °C sıcaklıkta, 3 mm nozul çapında ve koruyucu gaz olarak argon kullanmışlardır. Bu çalışmada; amaç gaz basıncının toz boyutuna etkisini araştırmak olduğu için gaz basıncı değişken olarak 2, 4, 6, 8, 11 bar kullanılmıştır. Yapılan deneylerde gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir. Özellikle 8 ve 11 bar basınçlarında tozların neredeyse tamamının küresel olduğunu rapor etmişlerdir.

Öztürk ve Kaçar [27] magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada magnezyum ve alaşımlarının imalat yöntemleri, şekillendirilebilirlik, korozyon direnci, çevreye olan etkileri ve mevcut kullanım alanlarını araştırmışlardır. Magnezyumun genel olarak havacılık, uzay ve otomotiv sanayilerinde kullanımının her geçen gün arttığını bildirmişlerdir. Magnezyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanılmadığını ve sanayicilerin magnezyum ve alaşımlarının yerine demir, çelik gibi malzemeleri tercih ettiğini tespit etmişlerdir. Bunun sebebini ise magnezyum alaşımlarının pahalı olmasına bağlamışlardır. Çelik ve dökme demirin yerini alabilecek en uygun malzemelerin Al, Mg ve Ti alaşımları olduğunu vurgulamışlardır.

Wang vd. [28] Sb ilavesinin, AZ91 magnezyum alaşımının mikroyapısı, mekanik özellikleri ve kırılma davranışları ile yapının kesit kalınlığına ve mekanik özelliklerine etkilerini incelenmişlerdir. Sonuçlar, Sb, AZ91 alaşımına eklendiğinde, taneler ile $Mg_{17}Al_{12}$ fazının incelendiğini ve granüle edildiğini ve yeni bir Mg_3Sb_2 fazının oluşturulduğunu ve bu fazın Sb içeriği arttıka kaba iğne şeklinde olduğunu göstermiştir (şekil 2.2). Oda sıcaklığındaki çekme dayanımı, uzama ve darbe dayanımı önce artmış, ardından artan Sb içeriği ile azalmıştır. Ek olarak, Sb ilavesi, AZ91 alaşımının 100 °C ve 150 °C'deki çekme dayanımını artırmıştır. AZ91 alaşımının oda sıcaklığında gerilme ve darbe çentik kırılma yapıları incelendiğinde tanecikler arasında gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Artan Sb içeriği ile, her iki fraktografin üzerindeki yırtılma deformasyon bölgeleri, ilk önce genişler ve daha sonra azalır; bu, gerilme mukavemeti, uzama ve darbe dayanımının önce yükselmesi sonrasında ise artan Sb içeriği ile azalması ile tutarlılık göstermektedir. Sırasıyla % 0.5, 1.0 ve 2.0 Sb ilaveleri ile elde edilen numunelerde en yüksek çekme dayanımı ve gerinim uzama değerleri % 0.5 Sb ilaveli numunelerde gözlemlenmiştir.



şekil 2.2. Kaba iğne tane şeklinde oluşan Mg_3Sb_2 arafazları.

Balasubramani vd. [29] Pb ve Sb ilavelerinin AZ91 alaşımının çökelti kinetikleri üzerine yaptıkları çalışmada sürekli kalıba döküm yöntemiyle numuneler üretmiştir. Bu amaç doğrultusunda saf AZ91, % 1 Pb ilaveli AZ91 ve %0.5 Sb ilaveli AZ91 alaşımları incelenmiştir. Pb ve Sb ilavelerinin AZ91 alaşımının çökeltme dizisi ve

yaşlanma kinetiği üzerindeki etkisi, diferansiyel termal analiz cihazı, optik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. AZ91 alaşımındaki çökeltme dizisi değişmez, buna rağmen, fazların çözünmesi için gerekli entalpi, Pb ve Sb'nin bireysel ilavelerine göre değişir. Kissinger yöntemi kullanılarak DTA sonuçlarından hesaplanan aktivasyon enerjisinin kantitatif analizi, $Mg_{17}Al_{12}$ faz oluşumu için gerekli olan aktivasyon enerjisinin Pb ilavesiyle 5.21'den 3.5821 kJ/mol'e düşürüldüğünü gösterirken, Sb ile 5.21'den 8.37 kJ/mol'e yükseldiğini göstermektedir ve bu sonuçlar yaşlanma özellikleriyle uyumluluk göstermektedir. Tüm bunlara ek olarak Pb ilavesinin AZ91 alaşımının yaşlanma davranışını artırdığı ve Sb ilavesinin geciktirdiği tespit edilmiştir.

Chen vd. [30] AZ91 alaşımına Ca ve Sb ilavelerinin etkilerini araştırmıştır. Ağırlıkça % 2 Ca ilave edilmesi mikro yapıyı inceltmiş, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının miktarını önemli ölçüde azaltmış ve AZ91 alaşımında ağırsı yeni bir Al_4Ca fazı oluşturmuştur; AZ91-2Ca alaşımlarının gerilme dayanımı ve uzama özellikleri oda sıcaklığında düşmektedir. Bununla birlikte, Ca ve Sb ilavesiyle, mikro yapı daha da artırılmıştır ve AZ91 magnezyumda ağırlıkça % 0.1 ila % 1.0 Sb ilavesiyle yeni bir Ca_2Sb fazı oluşturulmuştur. Ayrıca, ağırlıkça % 0.4 Sb ilaveli alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin optimum olduğu bulunmuştur. Ca ilavesi oluşan Al_4Ca arafazları malzemenin dayanımını düşürürken, Sb ilavesi ile oluşan arafazlar azalmıştır. Araştırmacılar çekme dayanımındaki düşüşün ve Sb ilavesi ile yükselişinin bu arafazların oluşumuyla alakalı olduğunu ileri sürmektedir.

Boby vd. [31] Sb ve Y elementlerini önce tek başına sonra birlikte AZ91 alaşımına ilave ederek malzemenin mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemiştir. Sonuçlar, ilavelerin, $Mg_{17}Al_{12}$ - β fazı ile birlikte yeni Al_2Y ve Mg_3Sb_2 fazı meydana getirdiğini ve ayrıca tanelerin önemli ölçüde incelendiğini göstermektedir. İtiryum eklenen AZ91 + Sb alaşımının β fazının daha ince hale geldiği ve diğer alaşımlarinkinden daha düzgün dağıldığı görülebilir. AZ91 alaşımında minimum tane büyüklüğü 140 μm , 0.6 itiryum ve 0.5 antimon ilavesiyle gözlemlenmiştir. Dahası, geliştirilmiş oda ve yüksek sıcaklık mekanik özellikleri Sb ilaveli AZ91 + xY alaşımlarında elde edilir. Maksimum gerilme özellikleri, 0.6 itiryum ve 0.5 antimonun

birleřtirilmiř ilavelerine sahip olan alařım ile elde edilmiřtir. Mekanik deneyler 150 °C’de tekrarlandığında deęerlerdeki dūřuřlerin çok az olduęu gözlemlenmiřtir.

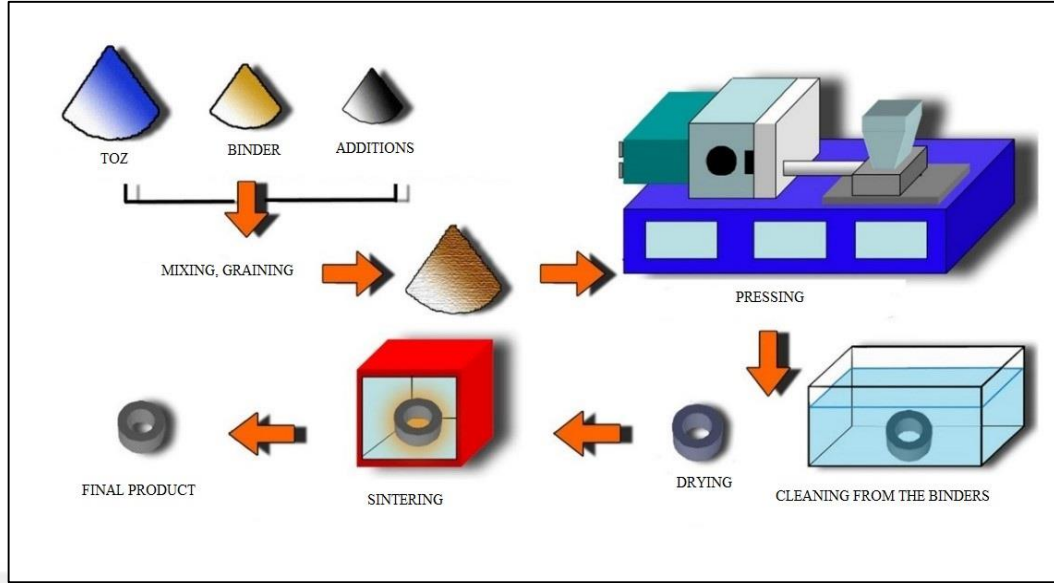
Zhou vd. [32] yaptıkları çalışmada AZ91 alaşımına Bi, Sb ve Ca ilavelerinin korozyon direncine ve elektrokimyasal davranışına etkilerini araştırmışlar, bu çalışmayı gerçekleştirmek için %3.5 derişimli NaCl zeltisi kullanmışlardır. Elektrokimyasal ve korozyon özelliklerini ve yüzey topografisini karakterize etmek için sabit daldırma, elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağınık spektroskopisi (EDS) ve X ışını kırınımı (XRD) gibi teknikler kullanılmıştır. Korozyon başlangıcının çoğunlukla Mg_3Bi_2 ve Mg_3Sb_2 partikülleri üzerinde olduğu, korozyonun $Mg_{17}Al_{18}Ca_{0.5}$ ve Mg_2Ca fazları üzerinde bir etki göstermediği tespit edilmiştir. AZ91 alaşımına kk miktarlarda bizmut ve antimonun eklenmesi, korozyon oranında belirgin bir artışa neden olmuştur.

BÖLÜM 3

TOZ METALURJİSİ

Toz metalürjisi ile üretim teknolojisi, metal imalat teknolojileri arasında yer alan ve 1800'lü yıllarda endüstriyel değer kazanmasından bu yana hızla gelişmekte olan bir yöntemdir. Kullanımı gün geçtikçe artan bu yöntemin karmaşık parçaların üretimini sağlayabilmesi, yüksek malzeme verimi, ekonomik olması ve diğer gelişen teknolojilere katkıda bulunması gibi özellikleri mevcuttur. Bu özellikleri sayesinde toz metalürjisi diğer geleneksel metal imalat yöntemlerinin yerini almakta, bilim ve sanayide büyük gelişme ve ilerlemelere katkıda bulunmaktadır [33-35].

Metaller ve alaşımlarının belli boyutlarda toz haline getirildikten sonra yapıştırıcı, kayganlaştırıcı gibi ilavelerle veya sade halde sıkıştırılması, sonrasında ise sıkıştırılan numunelerin sinterlenerek yani ısı işlem uygulanarak sertleştirilmesi sonucunda şekillendirilmesi yöntemi toz metalürjisinin temelidir [36]. Bunun yanı sıra bronz filtre üretimi gibi bazı istisnai uygulamalarda tozların yüksek basınç kullanılmadan sıkıştırıldığı da görülmektedir [37]. Genel olarak toz metalürjisinin üretim şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Toz metalürjisi ile üretim aşamaları [38].

Toz metalürjisi yöntemi, bilim ve sanayi uygulamalarında geniş bir alana sahiptir. Biyomedikal malzemeler, otomotiv parçaları, havacılık ve uzay sanayi, nükleer teknoloji ürünleri, iş makineleri, filtreler, kendinden yağlamalı yataklar vb. birçok uygulamada toz metalürjisi ile gerçekleştirilen üretim artmakta ve mevcut üretimde de gelişmeler kaydedilmektedir [34,39]. Günümüzde hızla gelişen olan bir diğer üretim teknolojisi olan eklemeli imalat yönteminde metal parçaların üretiminde metal tozları sıklıkla kullanılmakta ve 3 boyutlu yazıcılardaki en büyük sarf malzeme kısmını oluşturmaktadır [40].

Toz metalürjisinde metalik tozların üretim yöntemlerini bilmek, imal edilecek toz ve imalatı yapılacak olan malzeme için son derece önemlidir. Tozların imalatında kimyasal bileşimi ve saflığı ne kadar önemliyse parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve tozların yapıları da o kadar önemlidir [41].

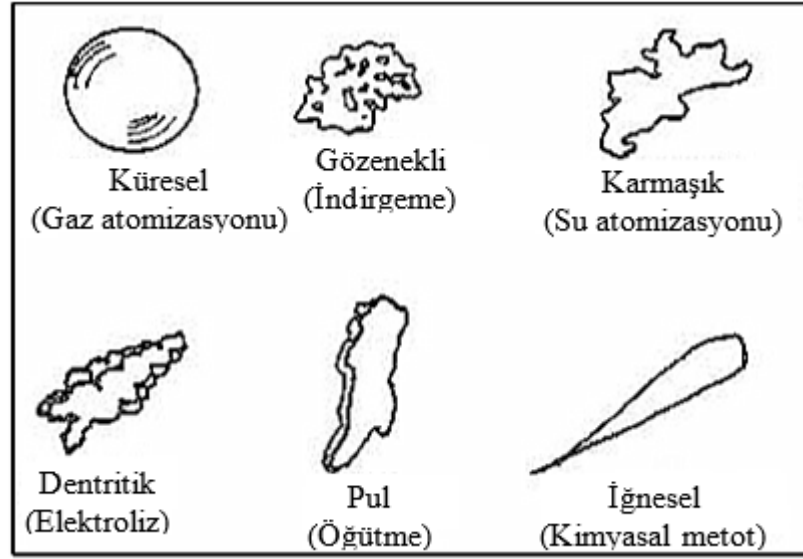
Metal tozlarının üretiminde dört temel mekanizma vardır [42]. Bunlar;

1. Mekanik yöntemler (Öğütme)
2. Atomizasyon yöntemleri
3. Kimyasal yöntemler
4. Elektroliz yöntemi

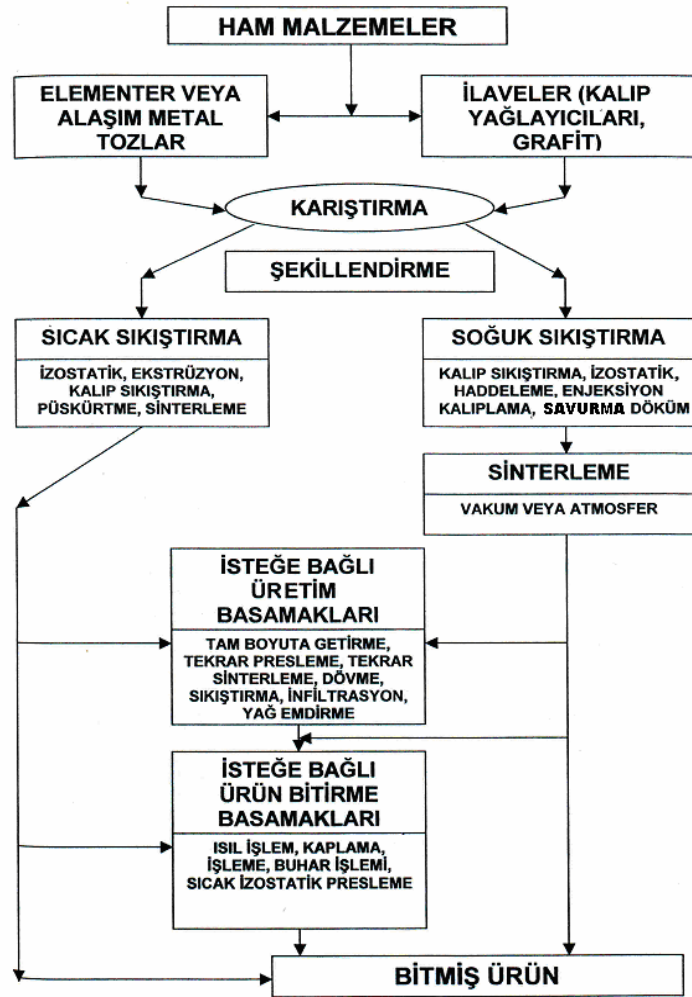
Genel olarak her malzeme toz haline getirilebilir. Toz haline gelme işlemi 3 farklı yöntemle oluşturulur; atomizasyon, kimyasal ve elektrolitik. Atomizasyon eritilmiş metalin düşey veya yatay bir şekilde akıtılırken, gaz veya su püskürtülerek toz haline getirilmesi işlemidir [18].

Kimyasal yöntemle metalik toz üretimi, metalin elementel olarak toz haline indirgenmesi işlemidir. Elektroliz yöntemi ise, elektrik akımını kullanarak metalin çözülmesini sağlamak ve bu sayede toz haline gelmesi işlemidir. Elektrik aracılığıyla tozlar anottan katoda taşınır ve ince bir film üzerine yapıştırılır. Bu film üzerine yapışan tozlar kurutulur ve arzu edilen tozlar imal edilmiş olur [42, 43].

Tozların boyutları ve şekilleri, toz üretim şekline göre değişir. Demirkesen'e göre [44] 1 mm'den daha küçük çap veya uzunluğa sahip metal parçacıkları toz olarak isimlendirilebilir. Toz şekilleri ise üretim yöntemine bağlı olarak küresel, puls, dentritik ya da diğer şekillerde olabilir (Şekil 3.2). Şekillendirmeye hazır hale gelen tozlar öncelikle ilaveler ile karıştırılır. Bu ilaveler kalıp yağlayıcıları, yapıştırıcılar veya gözenek oluşturucu malzemeler olabilir. Karıştırma süreci esnasında farklı metal tozları bilyeler veya sert çubuklarla öğütülerek mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilebilir. Daha sonrasında karışım bir kalıba doldurulur ve sıkıştırma işlemi başlatılır. Bu işlem soğuk şekillendirme ya da sıcak şekillendirme ile gerçekleştirilir. Sıkıştırılan tozlar sinterleme işlemiyle sertleştirilir ve eğer gerekiyorsa son yüzey temizleme işlemlerinin uygulanmasında sonra mamül kullanıma hazır hale gelir. Tozların sıkıştırılması ve sinterlenmesi akış şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Üretim yöntemlerine göre toz şekilleri [34].



Şekil 3.3. Toz metalürjisi üretim şeması [37].

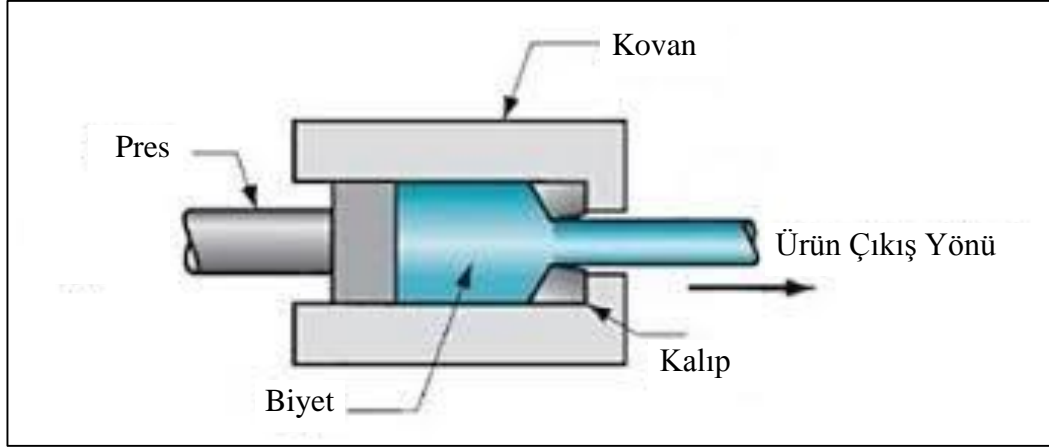
3.1. TOZ METALURJİSİ İLE PARÇA İMALATI

Tozların şekillendirme işleminde, tozların yoğunluğu yaklaşık olarak görünür yoğunluğa eşit kabul edilir. Tozlara uygulanan basıncın artırılması ile toz taneleri arası noktasal temas bozulur ve basıncın artmasına bağlı olarak gözeneklilik miktarı azalır. Ayrıca basıncın artmasına bağlı olarak plastik deformasyon ve yoğunluk artar [45]. Tozların parça halinde şekillendirilmesi genellikle ekstrüzyon, haddeleme ve presleme gibi işlemlerle yapılmaktadır.

3.1.1. Karıştırma ve Harmanlama

Tozların karıştırma işlemi, birden fazla bileşenli tozlar için uygulanan işlemdir. Harmanlama ise, genellikle tek bileşenli karışımlar için uygulanan işlemdir. En iyi karıştırma işlemi tozun hacminin, karıştırıcı hacminin %50'si ile 60'ı kadar olduğunda meydana gelmektedir. Karıştırma süresi olarak da genellikle 5 ile 30 dk. yapılan karışımlarda başarı elde edilmiştir [46].

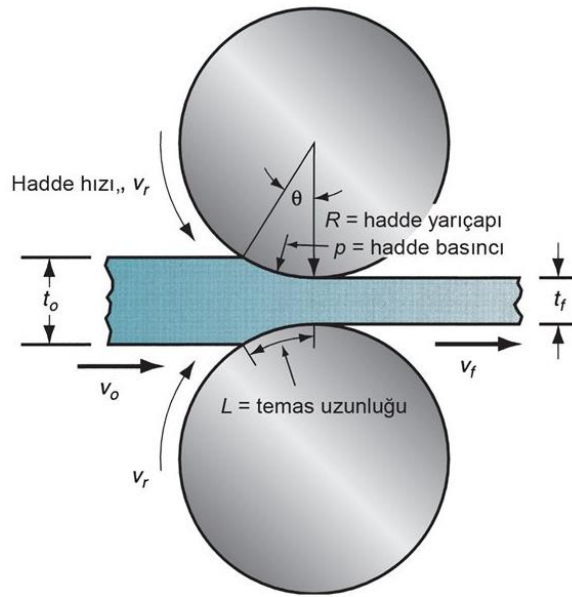
Metal tozların karıştırılma işlemi genellikle V veya Y tipi karıştırıcılar vasıtasıyla çift borulu ve çift-koni karıştırıcılarda yapılmaktadır (Şekil 3.4). Karıştırma süresinin uzun tutulması toz taneciklerinin kırılarak küreselleşmesine ve plastik deformasyona uğramasına yol açmaktadır. Bunun gibi sebepler tozun sıkıştırılabilme özelliğini azaltır. Karışımın en dikkat edilmesi gereken kısmı, bileşimin iyi ayarlanarak tozun her bölmesinde homojenliği sağlamaktır [47].



Şekil 3.5. Ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi.

3.1.2.2. Haddeleme

Malzemenin eksenleri etrafında dönen iki merdane arasında geçirilerek yapılan yapılan plastik şekil verme işlemi haddeleme olarak adlandırılır. (Şekil 3.6). Merdaneler aynı hızda ve birbirlerine zıt yönde dönerler. Malzemede; sıkıştırmayı sağlayan basma kuvveti ve malzeme ve merdaneler arasında sürtünme ile oluşan yüzey kayma gerilmesi ile deformasyon sağlanır. Bunun yanı sıra sürtünme kuvveti aynı zamanda malzemenin ilerlemesini sağlar [51].

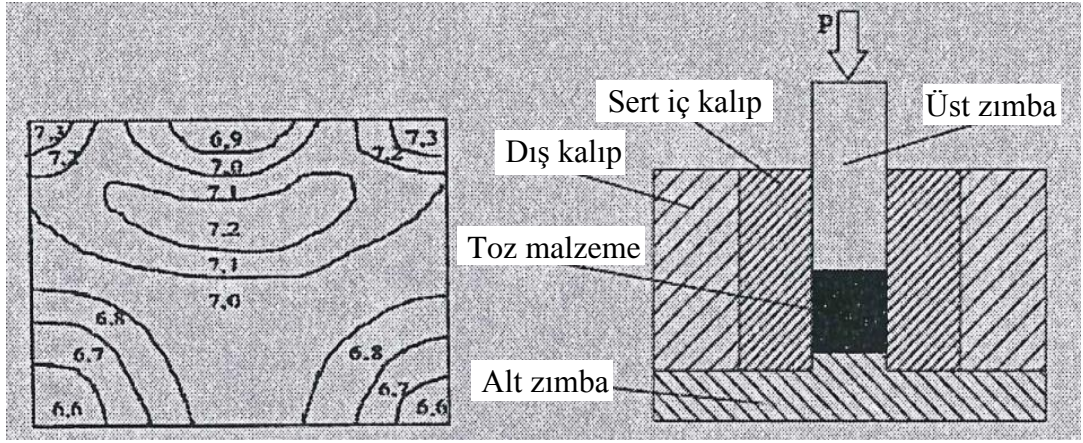


Şekil 3.6. Haddeleme sistemi.

3.1.2.3. Presleme

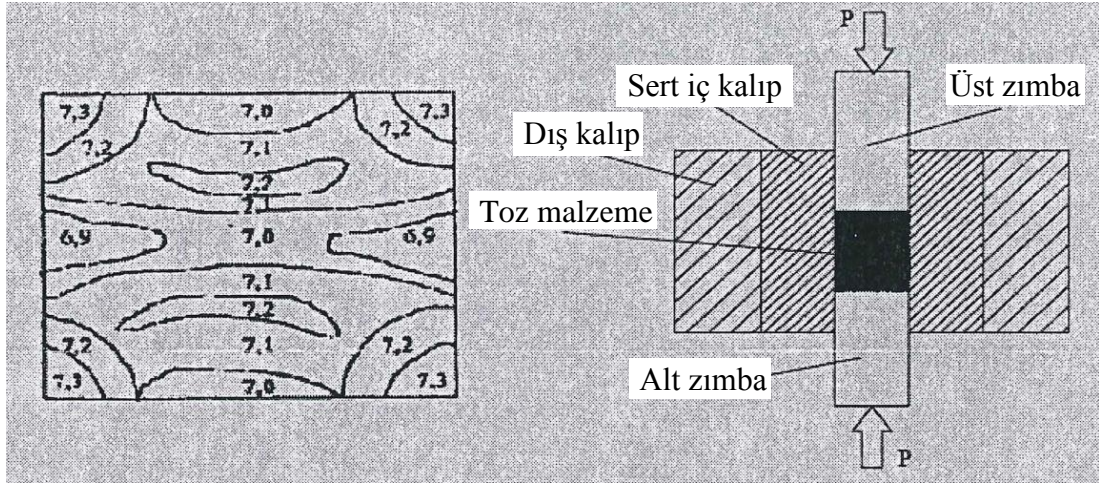
Presleme işlemi genel olarak; iki zimba arasındaki kalıba yerleştirilen tozların iki ekseninde yüksek basınç uygulanması ile tanımlanır. Presleme işlemi genellikle basit parçaların seri imalatında yaygın olarak kullanılır. Basınç uygulanarak elde edilen parça kütle olarak adlandırılır. Kütle terimi, henüz yeterince sıkıştırılmamış anlamına gelmektedir. Kütle halinde malzemenin dayanımı çok düşüktür ancak sinterleme işleminden sonra nihai ürünün dayanımı çok yüksek olmaktadır. Bazı presleme uygulamalarında, presleme işlemi ile birlikte tozlara sıcaklık da uygulanarak sinterleme işlemi yapılmaktadır. Bu gibi uygulamalarda hem presleme hem de sinterleme işlemi yapılmış olduğundan dolayı tek seferde nihai ürün imal edilmiş olur [52].

Tek yönlü presleme işleminde, deformasyon işleminin başlamasıyla birlikte, tozların kendi aralarında ve toz kalıbının iç kısmında oluşan sürtünme kuvveti dağılımında bir düzensizliğe yol açmaktadır. Bu düzensizlik uygulanan basıncın dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Tozun yoğunluk miktarı, hareketli zimbanın olduğu bölgelerde yüksek olurken sabit zimbanın olduğu bölgelerde düşük olmaktadır. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı Şekil 3.7’de görüldüğü gibi dağılmaktadır. Yoğunluk miktarının bu şekilde azalması imal edilen parçanın boy/çap oranına bağlıdır. Tek yönlü preslemede, presleme işleminden önce kalıba doldurulan toz yüksekliğinin kalıp çapına oranı, presleme işleminden sonraki yoğunluk dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı; yükseklik/çap ≤ 4 olması tavsiye edilmektedir [53].



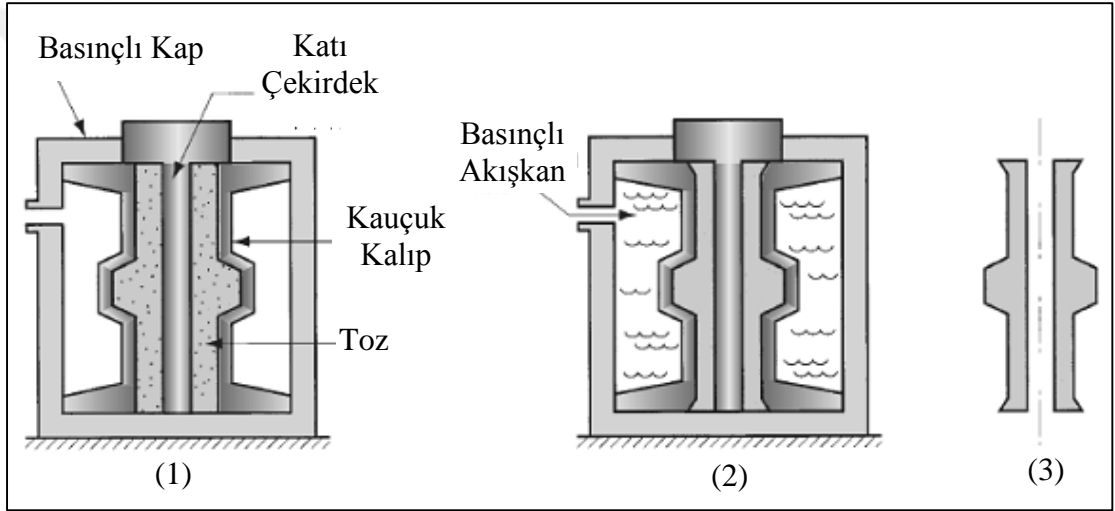
Şekil 3.7. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi [54].

Çift yönlü preslemede tozun, karşılıklı olarak alttan ve üstten çalışan iki adet zımba tarafından aynı anda preslenmesi işlemidir (Şekil 6.5). Her iki yönden de eşit miktarda basınç uygulanır. Çift yönlü presleme ile kalıp içerisinde düzenli bir sıkıştırma meydana gelmektedir. Yoğunluk dağılımı ise, tek yönlü presleme ile imal edilen parçaların yoğunluk dağılımına kıyasla daha homojen olmaktadır [55].



Şekil 3.8. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi [54].

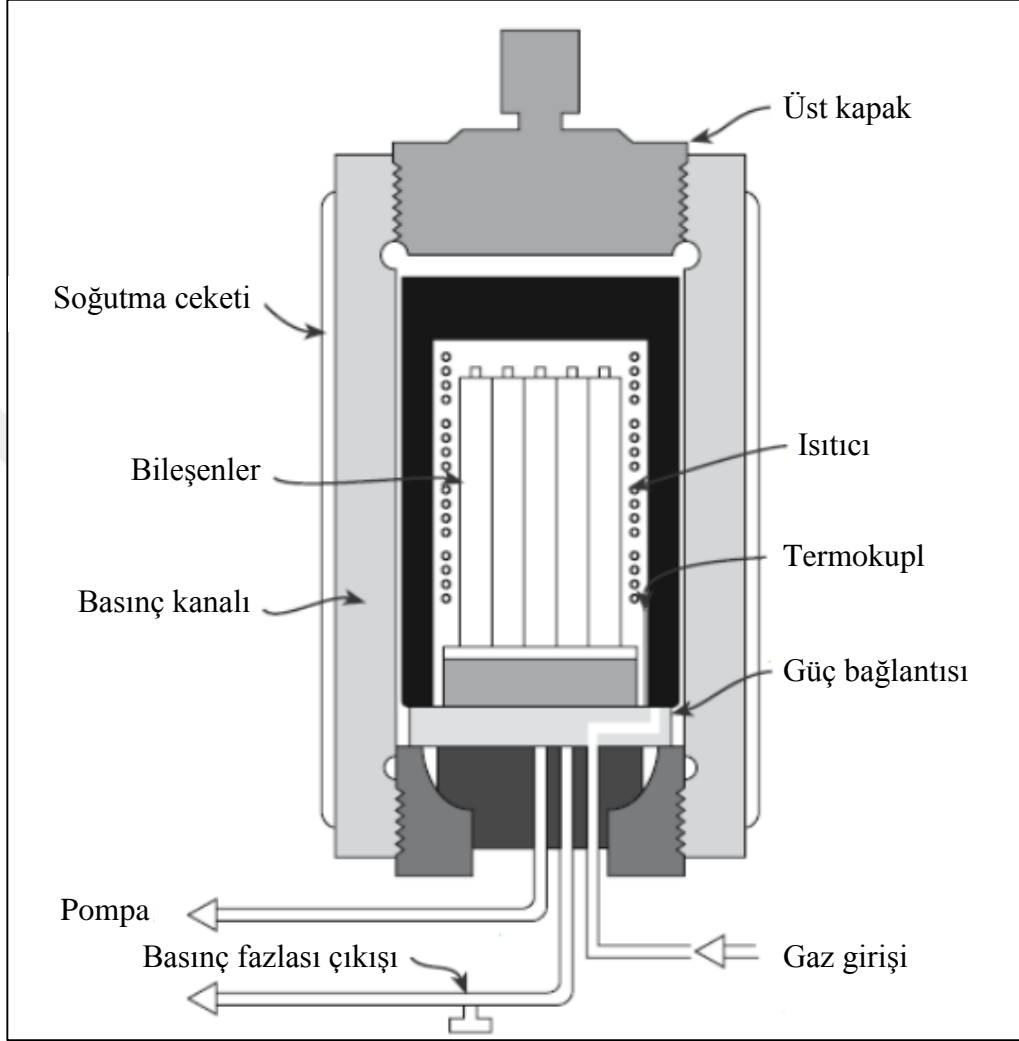
Toz presleme esnasında uygulanan basınçların her yönden eşit olarak uygulandığı bir yöntemdir (Şekil 3.9). Soğuk izostatik presleme genellikle karmaşık kademeli, boy ve çap oranının büyük olduğu parçalara uygulanmaktadır. Toz, kalıp olarak kullanılan sızdırmaz elastik bir kap içerisine konulur ve kapatılır. Kalıbın içerisinde hava presleme esnasında çıkacağından dolayı önceden kalıp içerisinden boşaltılır. Boşaltma işlemi sonrasında kalıp, sıvı banyosu içerisindeki bir basınç kabına bırakılır. Sıvı içerisine yüksek basınç uygulanarak kalıp hidrostatik basınca maruz bırakılır. Kalıp sıvı banyosundan çıkarılır ve parçanın üzerindeki yumuşak kalıp alınır. Bu yöntemle preslenen parçalarda homojen bir yoğunluk dağılımı elde edilir [55].



Şekil 3.9. Soğuk izostatik presleme şematik gösterimi [56].

Sıcak izostatik presleme, sadece aksenal basınç uygulanan sıcak presleme yöntemine kıyasla her yönden basıncın uygulandığı ve esnek kalıpların kullanıldığı bir yöntemdir (Şekil 3.10). Bu yöntemde tozların içinde bulunduğu kalıba üç eksenenden eş aksenal olarak gaz aracılığıyla basınç uygulanırken aynı zamanda sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemin, soğuk izostatik presleme tek farkı basınç uygulanan bölmenin ilave bir sistem vasıtasıyla ısıtılmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda basınç uygulanırken herhangi bir olumsuz reaksiyonun meydana gelmemesi için argon veya helyum gazı kullanılır. Sıcak izostatik preslemede, işlem sıcaklığı 2000 °C'ye kadar ulaşılabilirken basınç 30 ile 400 MPa arasında değişmektedir. Sıcak izostatik presin en önemli avantajı tane büyümesi olmadan yüksek yoğunlukta malzemeler

üretilebilmektedir. Bu yöntemle arzu edilen özellikler için mikroyapının kontrolü zordur fakat parça şekil tutarlılığı oldukça yüksektir [57].

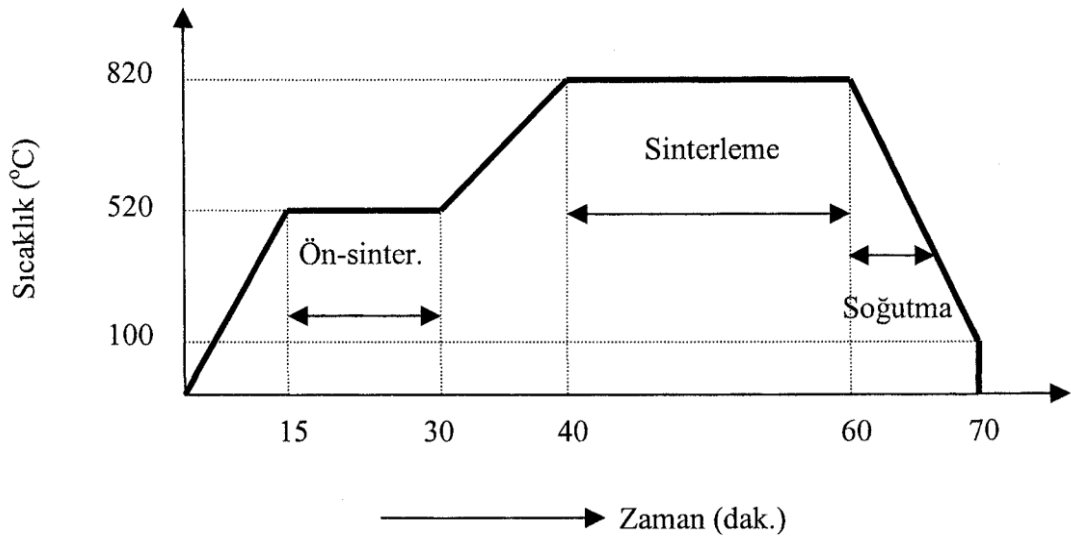


Şekil 3.10. Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi [58].

3.1.3. Sinterleme

Sinterleme, şekillendirilmiş toz metal parçaların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışını ve özelliklerin iyileşmesini sağlayan bir tür ısıtma işlemidir. Sinterlemenin etkili olabilmesi için tozların sıkı bir şekilde birbirleri ile temas halinde olması en önemli etkidir. Bu bağlamda, sinterleme işlemi preslenmiş veya kalıplanmış tozlara uygulanır [59].

Sinterleme, preslenmiş parçaların kontrollü bir atmosfer ortamında ve yüksek sıcaklıkta arzu edilen son özelliklerin elde edilmesi amacıyla ısıl işleme tabi tutulmasıdır. Sinterleme sıcaklığı olarak ise; metallerin ergime sıcaklıklarının %70 ile %80'i alınırken, bazı refrakter malzemelerde sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığının %90'ına kadar ulaşmaktadır. Birden fazla malzeme ile karıştırılıp ve preslenen parçalarda sinterleme sıcaklığı bazı bileşenlerin ergime sıcaklığı üzerinde olabilir. Bu gibi durumlarda düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler eriyerek yüksek ergime sıcaklığına sahip tozlar arasındaki gözenekleri doldururlar.



Şekil 3.11. Sinterleme işleminin aşamaları [36].

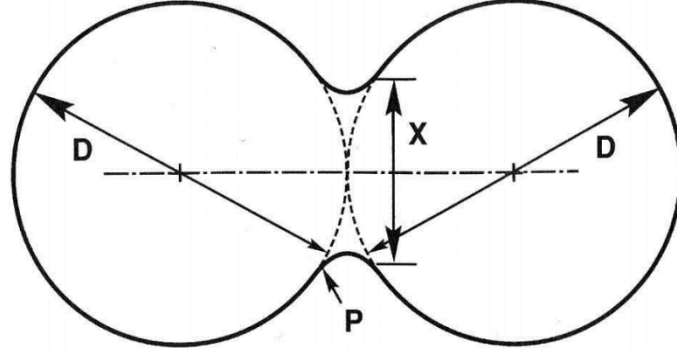
Sinterleme işlemi genellikle 3 aşamada meydana gelmektedir (Şekil 3.11). Bunlar;

1. Yanma veya temizlenme bölgesi
2. Yüksek sıcaklık bölgesi
3. Soğutma bölgesi

İlk olarak oluşan yanma ve temizlenme bölgesi, yağ ve bağlayıcıların hava ile yakılarak giderilme işleminin gerçekleştiği bölgedir. Malzeme içerisindeki yağlayıcı ve bağlayıcıların temizlenmesi, düşük ısıtma hızlarında meydana gelmektedir. Yüksek ısıtma hızlarında ise; genellikle gözeneklerde yanan bağlayıcı ve hava, iç basınç meydana getirerek parçanın parçalanmasına yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde parçacıklar arasında bağlar oluşmaya başlar. Bu işlem katı hal difüzyonu

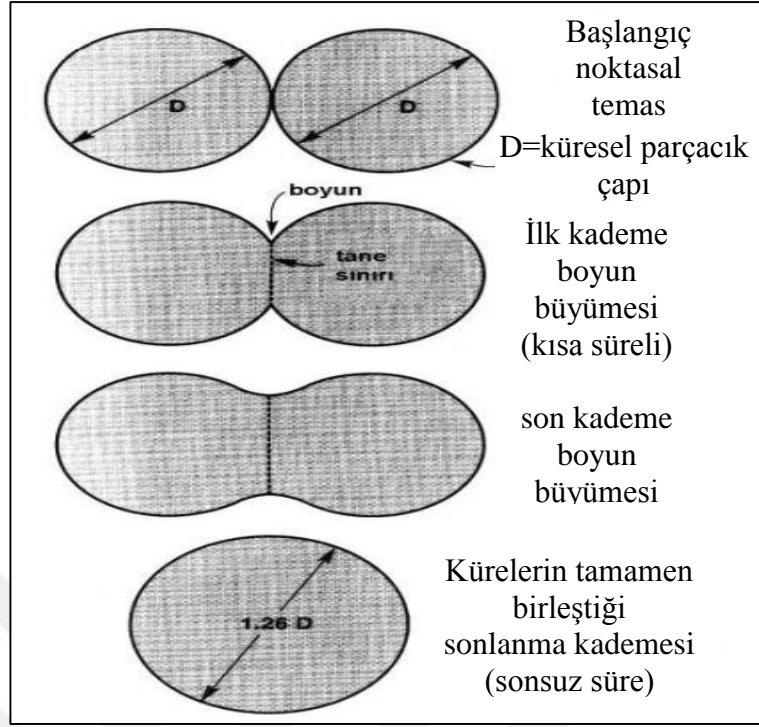
aracılığıyla meydana gelmektedir. Metaller arası fazların ve katı çözeltilerin meydana gelmesi katı hal difüzyonu yardımıyla oluşur. Yüksek sıcaklıkta birbiri ile temas eden parçalar arasında bağ oluşur ve atomların karşılıklı transferi sayesinde bu bağ güçlenir. Bu bölgedeki bekleme süresi ise arzu edilen yoğunluk ve özelliklere göre değişkenlik gösterir. Bekleme süresi genellikle 10 dk. ile birkaç saat arasında olmaktadır. Soğutma bölgesi atmosfer kontrollünde yapıldığı için oksidasyon engellenmiş olur. İnce toz parçacıkları presleme sonrası tam temas sağlayamadığından ve kalıntı porozite içerdiklerinden bu 3 aşamada da atmosfer kontrolü mutlaka olması gerekmektedir [55].

Sinterlemenin diğer bir ölçüsü de boyun çapının küre çapına olan oranı olarak belirlenir. (X/D) ve Şekil 6.9'da gösterildiği gibi boyun çapının küre çapına bölümü ile belirlenir. Şekilde P ile gösterilen bölge ise boyun dairesel profilinin yarıçapı olarak adlandırılır. Gerçekleşen boyun büyümesine ilaveten sinterlenen bir kütle büzülür (yani gözenekler atılır), yoğunlaşır ve mukavemeti artar.



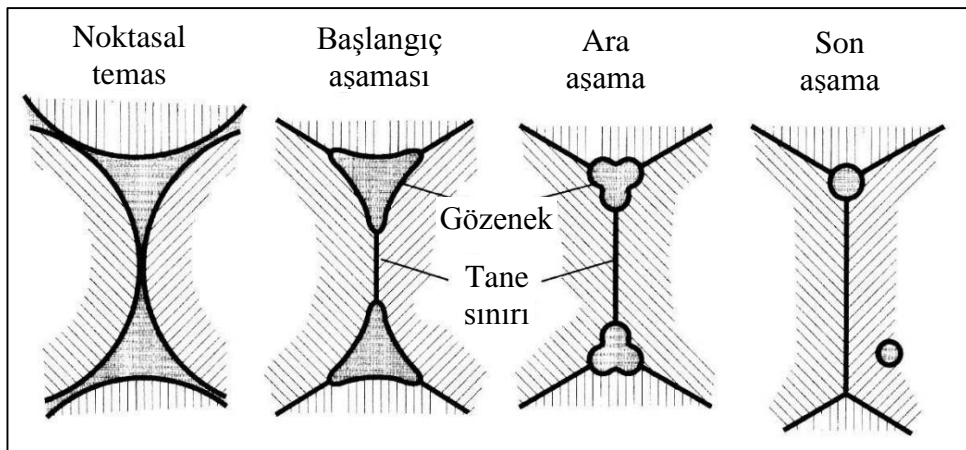
Şekil 3.12. İki tanenin sinterleme profili [57].

Şekil 6.10'da görülen birleşme halindeki iki tane ele alındığında zaman, sıkıştırılmış bir toz yığımında buna benzer birçok birleşme bölgesi vardır. Sinterleme işleminin ilerlemesiyle temas eden parçacıklar arasındaki bağlar genişler ve birleşir. Her bir birleşimde bir tane sınırı büyür. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi uzun süreli bir sinterleme sonucunda iki parçacık tamamen birleşerek başlangıç çapının 1.26 katı büyüklüğünde tek bir küre şeklinde oluşmasına neden olur.



Şekil 3.12. İki tanenin sinterleme modeli [60].

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi parçacıkların noktasal temasıyla başlayan sinterleme sırasında gözenek yapısının değişimini gösteren şematik resmi verilmiştir. Gözenek hacmi giderek azalır ve gözenekler daha küresel bir hale gelir. Gözenek küreselleşmesi oluşurken gözeneklerin yerini tane sınırları aldığı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.13. Sinterleme esnasında gözenek yapısının değişiminin şematik resim [61].

BÖLÜM 4

MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Son yıllarda, performans geliştirmede ağırlık tasarrufunun önemli olduğu mühendislik uygulamalarında hafif malzemelerin kullanımının artmasıyla birlikte otomotiv, havacılık, iletişim ve iletişim endüstrilerinde magnezyum ve alaşımlarının önemi artmıştır.

Magnezyum alaşımlarının kullanımına olan talebin artması ile birlikte, toz metalürjisinin ürettiği kompozit malzemelere olan talepte büyük bir artış oluşmuştur. Al, Ti, Zn ve Fe gibi metallere kıyasla, çok düşük 1.74 g / cm^3 yoğunluğa sahip magnezyum, alüminyum alaşımlarından yaklaşık % 35, titanyum alaşımlarından % 65 daha hafiftir [62]. Magnezyumun oda sıcaklığındaki yüksek mukavemet yoğunluğu ve yüksek elastik modül yoğunluğu oranı sayesinde alüminyum ve titanyum gibi malzemelerden daha avantajlıdır. Ek olarak, mükemmel dökülebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek ısı iletkenliği gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, Ancak, magnezyum kristali sadece 3 kayma sistemi ile sıkı paket hegzagonal (sph) kafes yapısı, sınırlı sünekliğe ve tokluğa sebep olmaktadır. Magnezyumda soğuk şekillendirme yapmak zordur ve bu nedenle şekillendirme işlemlerinin yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekir [63,64].

Magnezyumun erime sıcaklığı düşüktür ve bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kullanımı çok zordur. Yaklaşık olarak $100 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık üstünde sürünme direnci düşer. Bunun yanısıra, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci azalır ve oluşan oksit tabakası oksitlenmeyi hızlandırır [65,66]. Bununla birlikte, magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda sürünme ve oksidasyon direncini arttırmak için geliştirilmiştir. Magnezyum esaslı kompozit malzeme ürünleri, birçok avantaj ve kullanım ile artmaktadır. Ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımları daha yüksek mekanik “özelliklere sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda daha kul-

lanırlıdır. Bu nedenle magnezyum ve magnezyum esaslı kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir [67].

4.1. MAGNEZYUMUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum, hegzagonal kristal kafes (hsp) yapısına sahiptir ve $a=0.320$ nm, $c=0.520$ nm $c/a=1.624$ nm kenar uzunluklarına sahiptir. Magnezyum 1.74 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu için tüm mühendislik malzemelerinin en hafifidir. Çizelge 4.1' de saf magnezyumun özellikleri verilmiştir. Alüminyumdan yaklaşık olarak (2.7 g/cm³) iki kat, çelikten ise (7.86 g/cm³) dört kat daha hafiftir [68,69].

Çizelge 4.1. Magnezyumun fiziksel özellikleri [70].

Atomik numara	12
Atomik kütle	24.31 g/g.mol
Renk	Gmşms gri metal
Yoğunluk	20 °C'de 1.738 g.cm-3 650 °C'de 1.58 g.cm-3
Ergime sıcaklığı	650 °C
Kaynama derecesi	1103 °C
Kristal yapısı	Sıkı paket hegzagonal
Yanma ısısı	25020 kJ.kg-1
Parlama sıcaklığı	2800 °C
Buharlaşma ısısı	5272 kJ.kg-1
Özgül ısısı	20 °C'de 1025 J.K-1.kg
Buhar basıncı	527 °C'de 20 Pa 650 °C'de 360 Pa 1727 °C'de 400 Pa
Viskozite	650 °C'de 1.25 cp
Isıl iletkenlik	27 °C'de 156 W/m K 527 °C'de 146 W/ m K

Magnezyum elementi reaktif bir metal olduğundan dolayı doğada metalik olarak bulunmaz. Doğada kalsiyum bileşikleri, oksit, silikat ya da karbonat halinde bulunur. Magnezyum yüksek reaktiviteye sahip olduğu için üretim esnasında yüksek enerjiye

ihtiyaç duyulur. Bu yüzden magnezyum ucuz bir metal değildir [71,72]. Magnezyum ve alaşımlarının avantajları aşağıda verilmiştir;

1. Tüm mühendislik malzemeler içerisinde en hafif olması,
2. İyi bir elektromanyetik kalkan olması
3. Yüksek dayanım/yoğunluk oranı,
4. Titreşim ve darbe sönümlene kabiliyeti,
5. Mükemmel dökülebilirlik,
6. Yüksek hızlarda öğütülebilmesi,
7. Atmosfer kontrollü ortamda kaynak edilebilmesi,
8. Yüksek saflıktaki magnezyum kullanımında, iyi korozyon direnci.

Polimer malzemeler ile karşılaştırıldığında;

1. Daha iyi mekanik özellikler,
2. Daha iyi yaşlanma süresi,
3. Termal elektrik iletkenliğinin yüksek olması,
4. Tekrar kullanılabilirlik özelliği.

Magnezyumun bazı zayıf yönlerinden dolayı kullanım alanını sınırlayan özellikleri vardır [73]. Bu özellikler aşağıda verilmiştir;

1. Düşük elastisite modülüne sahip olması,
2. Sınırlı soğuk şekil değiştirme kabiliyeti ve tokluk,
3. Yüksek sıcaklıklarda düşük sürünme direncinin düşük olması,
4. Katılma esnasında çekme oranının yüksek olması,
5. Kimyasal reaktivite özelliğinin yüksek olması,
6. Düşük korozyon direnci.

Magnezyum alaşımlarının düşük ergime sıcaklığına (650 °C) sahip olması kullanım alanını sınırlayan diğer bir dezavantajdır. Magnezyumun alüminyum, çinko, mangan, nadir toprak elementleri, toryum ve zirkonyum gibi elementlerle alaşımlandırılması, yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci, mukavemet, ağırlığın azalması ve atalet

kuvvetlerin düşürülmesini sağlarlar [74,75]. Bu alaşımlandırılma özelliğinden dolayı çelik, bakır esaslı alaşımlar, dökme demirler ve hatta alüminyum alaşımlarının yerini almıştır [71]. Magnezyum ve magnezyum alaşımları yapısal uygulamalar olarak otomotiv, endüstriyel, malzeme taşınması, ticari ve uzay ekipmanlarını kapsamaktadır. Yapısal olmayan uygulamalar içinde organik kimyada kullanılmaktadır [76]. Son yıllarda magnezyum, ikili, üçlü ve çoklu magnezyum esaslı alaşım olarak çalışılmış ve farklı alaşım sistemleri elde edilmiştir. Bu alaşım sistemleri diğer alaşım sistemleri ile kıyaslandığında, mukavemet / ağırlık oranının yüksek olmasından dolayı ele alınmıştır. Magnezyum düşük yoğunluğu, yüksek özgül ısı kapasitesi, yüksek ses absorpsiyonu ve ısı iletkenliğinden dolayı birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir [77].

4.2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Magnezyum alaşımları $160-300 \text{ N/mm}^2$ çekme dayanımı, $80-190 \text{ N/mm}^2$ % 0.2 akma dayanımı ve % 2-15 kopma uzaması gibi mekanik özelliklere sahip bir metaldir. Fakat sıcaklığın artmasıyla magnezyum alaşımlarının mukavemeti azalmakta ve oda sıcaklığında düşük süneklik göstermektedir. Akma ve çekme mukavemeti arasındaki fark yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır. Hegzagonal kristal kafes yapısına ve 3 adet kayma düzlem sayısına sahip magnezyum, yüzey merkezli kübik yapısı ve 12 adet kayma düzlemine sahip olan alüminyuma göre soğuk şekillendirilmesi daha zordur. Bir kristalde kayma sistemi sayısı arttıkça malzemenin şekil değiştirmesi kolaylaşır, yani sünekliği artar. Magnezyumda $210 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda etkin olmayan kayma düzlemleri devreye girmektedir, bu yüzden sıcaklık arttıkça magnezyumun sünekliği de artmaktadır [78].

4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Mg alaşımları ASTM (A275) standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Yöntem, iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. İlk harf, yapı içerisinde Mg' dan sonra yapıda en fazla olan elementi, 2.harf ise yapıda 2. en fazla olan elementi simgeler. Rakamda' da, ilk rakam Mg' dan sonra yapıda en fazla bulunan metalin %' lik dilimini, 2. Rakam ise yapıdaki 2. en fazla bulunan elementin %' lik dilimini simgeler. Çizelge 4.3'de

yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.3. Alaşım elementleri ve kısaltmaları [74 -78].

Harf	A	C	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Cu	Re	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Y	Ca	Zn

Örnek AZ91 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir;

A→ Alüminyum yani, Mg'dan sonra alaşımdaki en fazla elementi ifade eder.

Z→ Çinkoyu, yani 2. olarak en fazla kullanılan elementi ifade eder.

9→ Alaşımdaki Al oranının yaklaşık % 9 olacağını ifade eder.

1→ Alaşımdaki Zn oranının yaklaşık % 1 olacağını ifade eder.

Çizelge 4.4. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) [74 -78].

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları									
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ61	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	1,9-2,5	3,7-4,8	2,5-3,5	6,5	7,8-9,2	8,5-9,5	0,05 max	0,05 max
Zn	0,20 max.	0,20 max.	0,15-0,25	0,10 max.	0,7-1,3	1,0	0,2-0,8	0,45-0,90	1,0-1,5	4,8-6,2
Mn	0,28-0,50	0,26-0,50	0,20 min.	0,35-0,60	0,20 min.	0,15	0,15-0,5	0,17-0,40	0,1 max.	0,1 max.
Si	0,05max.	0,05max.	0,70-1,2	0,60-1,4	0,05 max.	0,20 max.	0,10 max.	0,05 max.	0,05 max.	0,05 max.
Fe (max)	0,004	0,004	0,004	0,0035	0,005	-	0,05	0,004	0,03	0,03
Cu (max)	0,008	0,008	0,008	0,015	0,05	0,08	0,05	0,025	0,02	0,05
Ni (max)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,010	0,005	0,001	0,005	0,005
Be	-	-	-	-	-	-	0,002	-	0,002	0,002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	-	0,12-0,25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3-0,9
Diğer	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	0,01	-	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

4.3.1. AZ91 Magnezyum Alaşımının Özellikleri

Mg alaşımlarından AZ serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorblama özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapımında kullanılır [78]. AZ91 alaşımları iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Aynı zamanda, iyi dökülebilirliğe, iyi mekanik özelliğe ve korozyon direncine sahiptirler. Fakat, bu alaşımlar 120 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda düşük sürünme direncine sahiptirler. AZ91 alaşımlarının mikro yapısı genelde α -Mg ile $Mg_{17}Al_{12}$ fazlarından meydana gelmektedir [77].

Magnezyum, bilhassa Al, Zn ve Mn olmak üzere, toprak alkali metaller ve çok az miktarlardaki Si, Sn, Pb, Y, Ba, Sb, Ca, Sr ve Bi gibi elementlerle alaşım yapılarak, mekanik özellikleri iyileştirilmekte ve gösterdiği iyileştirme performansı ile kullanım alanını her geçen gün genişletmektedir. AZ91 (Mg-Al-Mn) alaşımları genellikle otomobil parçalarının üretiminde kullanılır ve bu alaşımının dökülebilirlik özelliği iyidir [78]. Yüksek eğme direnci gerektiren kapı, kaput ve bagaj kapağı gibi dış yüzeyi geniş otomobil saclarında magnezyum alaşımlarının kullanımı çeliğe nazaran % 50, alüminyuma nazaran % 20 ağırlık avantajı sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlarından Mg-Al-Mn alaşımları dayanım, hafiflik ve kısmen iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden ötürü endüstriyel öneme sahip bir malzemedir.

Mg alaşımlarında Al, Mg' un katı çökelti dayanımını, ergiyiğin dökülebilirliğini kolaylaştırır ve döküm işleminde mikro gözenekleri azaltır. Mg alaşımlarında Al' un varlığı alaşımın katılaşma süresini mukavemetini ve sertlik değerlerini arttırmaktadır. Fakat sünekliliği düşürmektedir. $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik yapı içerisinde (≤ 120 °C) oluşur ve yapının mukavemetini artırır. Al' un fazla miktarda alaşımda bulunması yapıda mikro gözenek oluşmasına neden olduğu bilinmektedir [76,77,79,80].

Alaşım içerisinde Mn'ın bulunması yapının korozyon ve sürtünme direncini arttırmaktadır. Lakin Mg alaşımlarının mukavemetinde Mn' ın etkisi azdır [76,77,79,80]. Mn, Mg içerisinde % 3,4'e kadar sıcaklığa bağılı olarak katı eriyik oluşturabilmektedir.

Çizelge 4.5. AZ91 mekanik özellikleri [74].

Çekme Dayanımı	220 Mpa
Akma Dayanımı (Çekme)	130 Mpa
Akma Dayanımı (Basma)	130 Mpa
Brinell Sertlik	60
Sönümleme Kapasitesi	%52
Elastiklik Modülü	45 Gpa
Poisson Oranı	0.35
Uzama	%8 - %15
Çentik Darbe Dayanımı	3.2 Joule
Yorulma Dayanımı	60 Mpa

Çizelge 4.6. AZ91 fiziksel özellikleri [74].

Yoğunluk	1.79 gr/cm ³
İletkenlik	61 W/m ^o K
Termal Genleşme	25.6 um/m ^o K
Korozyon Dayanımı 3 gün, %5 NaCl	0.05 mg/cm ² /d
Döküm Sıcaklığı	650 - 695 °C

Çizelge 4.7. AZ91 kimyasal bileşimi [81].

Element	Al	Zn	Si	Zn	Fe	Cu	Ni	Diğer	Mg
%	8-9.5	1	0.10	0.22	0.005	0.010	0.002	0.003	Kalan

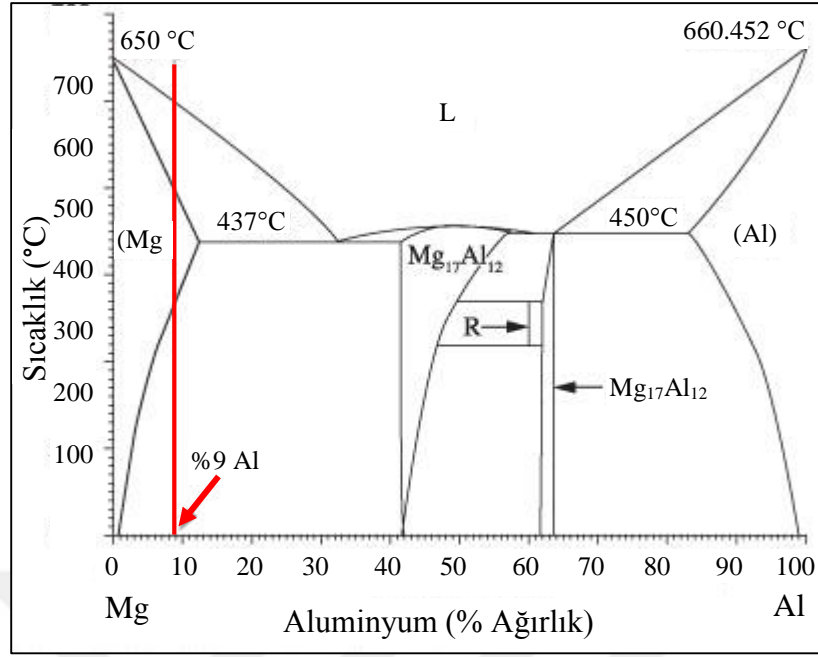
Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinde istenilen geliştirmeleri yapabilmek için magnezyuma alaşım elementleri eklenerek toz metalürjisi yöntemiyle yeni ürünler elde edilmektedir [82]. Hegzagonal sıkı paket (HSP) kafes yapısına sahip olan magnezyum çok fazla sayıda element ile katı çözünürlük oluşturabilir. Magnezyum, temel olarak Al, Zn, Mn, Be, Si, Ca, Cu, Fe, Ag, Sn ve Zr gibi ana elementler ile K, Na, Li alkali ve Y, Ce, Ln, Nd gibi toprak elementleri ilave edilerek alaşımlandırılabilir. Magnezyum, bu elementlerden bir veya daha fazlası ile alaşımlandırıldığında oluşan alaşımlar çoğunlukla yüksek mukavemet / ağırlık oranını arttırmaları [82].

4.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Magnezyum alaşımlarına mukavemet kazandırmak için farklı alaşım elementleri ile katı eriyik ve çökelme sertleşmesi uygulanmaktadır. Çoğunlukla alüminyum elementi çekme mukavemetini ve sertliğini artırmakta, dökülebilirliği geliştirmekte fakat gözeneklilik eğilimini arttırmaktadır. Kalsiyum, tane yapısını inceltir, sürünme direncini artırır bunun yanısıra yapışma ve sıcak yırtılma gibi dökülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Mangan, çekme mukavemetini artırır, tane incelmelerini sağlar, kaynak kabiliyetini artırır [83]. Nadir toprak elementleri, sürünme direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık mukavemeti gibi özellikleri geliştirir ancak bu olumlu özelliklerle birlikte maliyeti artırır. Silisyum, dökülebilirliği olumsuz yönde etkiler ancak sürünme direncini artırır. Çinko, çekme mukavemetini ve dökülebilirliği iyileştirir fakat mikro gözeneklilik ve sıcak yırtılma eğilimi artırır. Son olarak zirkonyum, çekme mukavemetini artırmakta ve tane inceltme işlemi için çok etkilidir fakat alüminyum ya da silisyum içeren alaşımlarda tercih edilmemektedir [78].

4.4.1. Alüminyumun Etkisi

Alüminyum, alaşım elementleri içinde en etkili elementlerden biridir. Magnezyuma alüminyum ilavesi alaşımın sertliği ve çekme mukavemetini artırmakta ve bunun yanında katılaşma aralığını genişletmektedir. Alaşıma ağırlıkça % 6' nın üzerinde alüminyum ilave edildiği zaman ısıl işlem uygulanabilir hale gelir, ancak endüstriyel alaşımlarda alüminyum ağırlıkça % 10' un altında tutulur. En uygun dayanım ve süneklik özellikleri ağırlıkça % 6 alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında görülmektedir [78,83]. Şekil 7.1'deki Mg – Al denge faz diyagramında görüldüğü gibi ötektik sıcaklıkta (437 °C) alüminyumun maksimum çözünürlüğü yaklaşık olarak ağırlıkça % 33'tür.



Şekil 4.1. Mg-Al faz diyagramı [84].

Ağırlıkça % 2'den fazla alüminyum içeren alaşımlarda soğutma hızlarına bağlı olarak genellikle bir miktar ötektik faz oluşmaktadır. Bu nedenle yaygın olarak AM50, AM60 ve AZ91 gibi magnezyum alaşımlarında önemli miktarda ötektik faz oluşumu görülmektedir. Ötektik altı magnezyum-alüminyum alaşımları ağırlıkça % bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak geniş bir aralığa sahiptir [82].

4.4.2. Demirin Etkisi

Magnezyum alaşımlarında az miktarlarda bulunması bile korozyon direncinin önemli ölçüde azaltan elementlerden biridir. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımlarında demir içeriği genel olarak ağırlıkça % 0.01 ile % 0.03 arasında olmalıdır. En iyi korozyon direnci için alaşım içerisinde demir içeriğinin üst limiti % 0.005 olmalıdır [74].

4.4.3. Manganın Etkisi

Mangan, magnezyum alaşımlarının çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakla birlikte akma mukavemetini de kısmen arttırmaktadır. Alaşım içerisinde

manganın en önemli özelliği Al ve Fe ile AlMnFe gibi ikinci faz parçacıklar oluşturarak demir içeriğini azaltmakta ve bu azalma sayesinde mikroyapı saflaştığı için korozyon direncini artırmaktadır. Ticari öneme sahip magnezyum alaşımları nadir olarak ağırlıkça % 1.5' in üzerinde mangan içerirler. Mg-Al alaşımlarında manganın çözünürlüğü ağırlıkça % 0,3'e kadar düşebilmektedir [80].

4.4.4. Çinkonun Etkisi

Magnezyum alaşımlarında çinko, alüminyum ile birlikte alaşım elementi olarak kullanıldığı zaman etkisi yüksek olmaktadır. Çinko, alüminyum ile beraber kullanıldığı zaman düşük sıcaklıklarda (oda sıcaklığı) mukavemetinin artırılmasını sağlar. Buna ek olarak, çinkonun alüminyum ile birlikte kullanılması süneklikte azalma olmaksızın mukavemeti artırmak için de kullanılır. Ağırlıkça % 7 ile % 10 arasında alüminyum içeren magnezyum alaşımlarına, ağırlıkça % 1'den fazla oranlarda çinko ilave edilmesi yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemetini artırmaktadır. Çinko bununla birlikte, nikel ve demir empüritelerinin zararlı korozyon etkisini engellemek amacı için de kullanılmaktadır [85].

4.4.5. Zirkonyumun Etkisi

Magnezyumun kafes parametresi ($a=0.320$ nm, $c=0.520$ nm) zirkonyumun kafes parametresine ($a=0.323$ nm, $c=0.514$ nm) çok yakın olmasından dolayı zirkonyumun magnezyum alaşımlarında önemli derecede tane inceltme etkisi vardır. Katılaşmanın başlangıcı esnasında zengin zirkonyumlu katı parçacıklar magnezyum tanelerinin katılaşması esnasında heterojen çekirdeklenmeyi sağlamaktadır. Alüminyum ya da mangan içeren alaşımlarda zirkonyum genellikle kullanılmaz, çünkü zirkonyum katı eriyikten uzaklaşarak bu elementler ile kararlı bileşik oluşturmaktadır [82].

4.4.6. Bakırın Etkisi

Magnezyum alaşımlarında, bakırın ağırlıkça % 0.05' ten fazla ilave edilmesi durumunda korozyon direnci negatif yönde etkilenmektedir. Bakır, magnezyum içerisinde sınırlı oranda çözünebilirliğe sahiptir. Magnezyuma ilave edilen bakır oda

sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini artırdığı gözlenmiştir, ancak süneklik özelliğine taviz verilmiştir [76].

4.4.7. Nikelin Etkisi

Nikel, magnezyum alaşımlarında korozyon direncini kayda değer oranda azalmasını sağlayan empüritelere biridir. Ancak, magnezyum alaşımlarında korozyona karşı en iyi direnç sağlamak için ağırlıkça % 0.005'e kadar nikel elementinin ilavesine izin verilmiştir [84].

4.4.8. Nadir Toprak Elementlerinin Etkisi

Magnezyum alaşımlarına, nadir toprak elementleri sürenme ve korozyon direnci ile yüksek sıcaklıklarda mukavemetini arttırmak amacıyla ilave edilmektedir. Fakat bu elementler olabildiğince pahalı olduğundan dolayı genellikle ileri teknoloji alaşımları için kullanılmaktadır. Bu elementlerin alaşım içerisindeki varlığı alaşımın katılaşmasını hızlandırarak daha az gözenekli yapı oluşmasını sağlar ve kaynak çatlamlarını engeller [84].

4.5. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

4.5.1. Otomotiv Endüstrisinde

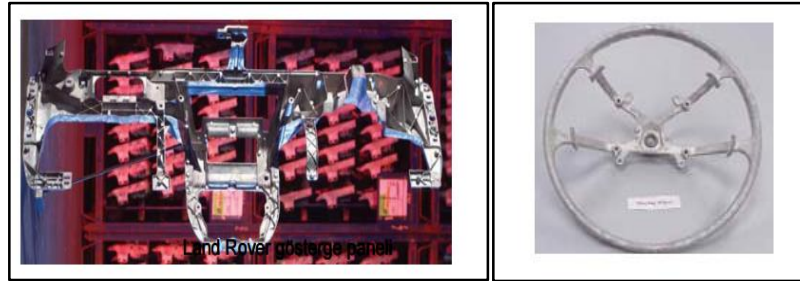
Otomotiv sektörünün dünya genelinde amacı hafif, çevreye zarar vermeyen, güvenli ve ucuz araç üretmektir. Araç üreticileri, kullanıcı isteklerini ve çevre sağlığı için verilmiş kararları dikkate alarak araç ağırlıklarını azaltmayı ve bunun sayesinde araçlardan çıkan zararlı egzoz gazlarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Bilindiği gibi araç ağırlığı arttıkça yakıt tüketimi de artmaktadır, bunun yanı sıra yakıt tüketimi arttıkça araçların çevreye verdiği CO₂ emisyonu artmaktadır. Otomotiv firmaları tarafından araç ağırlığını azaltmak için yüksek dayanımlı çelikler, alüminyum alaşımları ve kompozit malzemeler kullanılmakta, fakat bu tür malzemeler ile araç ağırlığında hedeflenen azalma olmamaktadır. Bu yüzden özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisinde yoğunluğu düşük olduğundan dolayı magnezyum kullanımında önemli

miktarda artış olmuştur. Diğer taraftan, düşük yorulma direnci, sürünme direnci, alev alma tehlikesi, düşük korozyon direnci ve aşınma direncinin zayıf olması, magnezyumun yaygın olarak kullanımını etkilemektedir [64].

Otomotiv endüstrisinde magnezyum alaşımları hakkında birçok araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Volkswagen firması Beetle modeli aracında ilk olarak 22 kg magnezyum ve alaşımlarını kullanmıştır [82]. Motor yapımında Porsche firması 1928 yılında magnezyum ve alaşımlarını kullanmıştır [80]. 161 kg ağırlığında altı silindirli en hafif motoru, BMW firması R6 modelinde Mg-Al alaşımı kullanmıştır. Mg-Al alaşımı Al malzemesi kullanılmış motora göre % 24 hafiflik ve düşük yakıt tüketimi sağlamıştır. Audi firması V8 Quattro modelinin motorunda magnezyum kullanarak diğer 8 silindirli motorlardan 5 kg hafiflik sağlanmıştır [86]. Şekil 4.3' de gösterge paneli, AM50 veya AM60B Magnezyum alaşımından imal edilirse 12 kg, çelikten imal edilirse 18 kg gelmektedir [87].



Şekil 4.2. Kapı içlerinde AZ91 kullanılmış örnekler [77].



Şekil 4.3. Land Rover Gösterge paneli ve Direksiyon simidinde AZ91 kullanımı [77].

4.5.2. Havacılık Endüstrisinde

Magnezyum havacılık endüstrisinde, hava taşıtı yapımında 1900'li yıllardan beri kullanılmakta ve 1950'li yıllarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. 1950 yılından sonra askeri uçak ve hava taşıtı yapımında önemli ölçüde magnezyum kullanılmıştır. 1950 yılında Westland Aircraft tarafından yapılan Sikorsky S-56 modelinin yapımında 115 kg magnezyum kullanılmıştır. Avrupa uçak sanayisi tarafından, Convair B-36 Peacemaker modelinin yapımında 8600 kg magnezyum kullanılmıştır. Uçak endüstrisinde 1990'lı yıllardan itibaren magnezyum kullanımı azalmıştır, fakat helikopter endüstrisinde şanzıman ve vites kutusu gibi parçaların yapımında kullanılması devam etmektedir [82]. Ayrıca, ATAK helikopterin dişli kutusu üst gövdesi (Şekil 4.3) yerli tasarım ve magnezyum döküm sürecine ait tasarım parametrelerinin belirlenmesi ile Teknik Veri Paketi (TVP) hazırlanmıştır [85].



Şekil 4.4. ATAK helikopterin dişli kutusu üst gövdesi [85].

Havacılık endüstrisinde magnezyum kullanımını özetlemek gerekirse: mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek şok ve titreşim dirençleri magnezyumun avantajlarıdır, fakat yüksek sıcaklıklarda alev alması ve korozyon direncinin düşük olması magnezyumun dezavantajlarıdır. Magnezyumun dezavantajları kullanım alanını sınırlandırmaktadır, ancak diğer metallerle alaşımlandırma ve kompozit malzeme yapıldığında olumsuz etkileri önemli ölçüde arttırılabilmektedir [88].

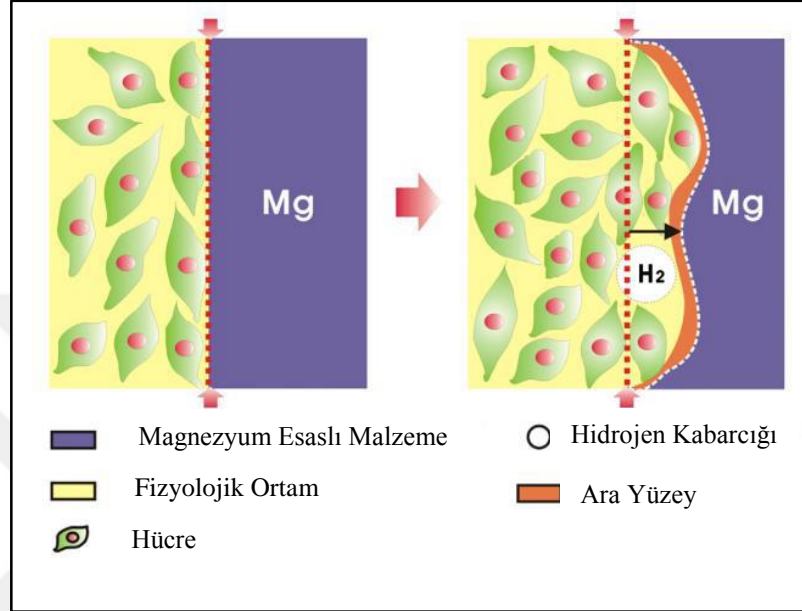
4.5.3. Biyomalzeme Endüstrisinde

İnsan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek için kullanılan malzemeler biyomalzeme olarak adlandırılır. Metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. İnsan vücudu biyomalzeme olarak kullanılan malzemeler için oldukça korozif bir ortamdır. Paslanmaz çelikler, titanyum ve alaşımları ile krom ve kobalt alaşımları günümüzde kullanılan metalik biyomalzemelerdir. Bu malzemeler korozyon ya da aşınmadan kaynaklanan zehirli iyon ya da parçacıklar, doku içerisine sızarak hücrelere zarar verebilir ve bu durum doku kaybına yol açabilir. Bunun yanısıra kullanılan metalik biyomalzemelerin vücut yapısına uyumluluğu incelendiğinde elastik modüllerinin kemik dokusu ile tam olarak uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu uyumsuzluk yeni kemik dokusunun oluşum hızını ve implantın kararlılığını etkilemektedir. Dahası, vücutta kullanılan plaka, vida ve çivi gibi metalik malzemeler kalıcı olduğundan ve doku iyileştikten sonra başka bir ameliyatla metallerin vücuttan çıkarılması sağlık giderlerini arttırmaktadır [87]. Magnezyum düşük yoğunluğuna ek olarak diğer seramik biyomalzemelere göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğu Çizelge 4.8’de görülmektedir.

Çizelge 4.8. Farklı biyomalzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal kemik ile karşılaştırılması [87].

Özellik	Kemik	Magnezyum	Titanyum alaşımları	Cr-Co alaşımları	Paslanmaz çelikler	Sentetik Hidroksiapatit
Yoğunluk gr/cm ³	1.8-2.1	1.74-2.0	4.4-4.5	8.3-9.2	7.9-8.1	3.1
Elastisite modülü, GPa	3-20	41-45	110-117	230	189-205	73-117
Akma dayanımı, MPa	130-180	65-100	758-1117	45-1000	170-310	600
Kırılma tokluğu, MPam ^{1/2}	3-6	15-40	55-115	-	50-200	0.7

Akma mukavemeti ve elastisite modülü diğer metalik malzemelere nazaran kemiğe daha yakındır. Bunun yanı sıra magnezyum insan vücudunda en çok bulunan dördüncü katyondur. Yetişkin bir bireyin vücudunda yaklaşık olarak 30 gr magnezyum bulunmaktadır ve bunun çoğunluğu kaslarda ve kemiklerde bulunur [87].



Şekil 4.5. Yüzey bozulması sırasında Mg esaslı malzemeler ile biyo-çevre arasındaki dinamik arayüz [88].

Magnezyum elementi vücut içinde zehirsizdir ve kolay bir şekilde çözünebilir, çözünen magnezyum vücuttan kendiliğinden atılır. Ayrıca magnezyumun biyo-çevre ile uyumluluğunu gösteren arayüz Şekil 4.4'te görülmektedir. Buna ek olarak, magnezyum kemik gelişimini hızlandırır. Sonuç olarak magnezyum ve alaşımları vücutta yerleştirildikten sonra 20-90 gün içinde yeni dokunun oluşmasına yardımcı olur ve doku oluşumunu tamamladıktan sonra başka bir ameliyata gerek kalmadan magnezyum vücutta çözünerek atılır. Magnezyumun biyomalzeme olarak kullanılmasındaki en büyük dezavantajı düşük korozyon direncinin olmasıdır. Fakat korozyon direncini arttırmak için koruyucu yüzey kaplaması yapılır ve vücut içinde uygun biyomalzeme olarak kullanılabilir [89].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada ilk olarak AZ91 alaşımı ile Si ve Sb elementi tozları ticari olarak temin edilmiştir. Tozların teminatında Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün sağlamış olduğu proje yardımı kullanılmış, ilgili tozlar Nanografi firmasından satın alınmıştır. Tüm tozların boyutu 325 mesh değerindedir. Literatür araştırması sırasında önceki çalışmalar incelenmiş [5,6,8,9] ve bu doğrultuda saf AZ91 alaşımına öncelikle ağırlık olarak % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarında Si tozları ilave edilmiştir. Gerek tozların küresel yapıda olmasından dolayı sıkıştırılmasının zor olması, gerekse sağladığı sıkıştırma ve sertleştirme aynı anda yapılabilmesi avantajı nedeniyle sıcak presleme yöntemi tercih edilmiştir. Yine daha önceki yapılan çalışmalar incelenmiş [33,34] ve sıcak pres için sıkıştırma sıcaklığı 500 °C ve sıkıştırma basıncı 45 MPa olarak belirlenmiştir.

Bir saat boyunca 15 mm çapında ve 25 mm yüksekliğindeki bir kap içerisinde sıcak presleme işlemine tabii tutulan saf AZ91 numunesinin ve sırasıyla % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 Si ilaveli AZ91 numunelerinin, işlem sonrasında yoğunluk testleriyle yoğunlukları ölçülmüş; sonrasında ise mikroyapıları incelenmiştir. Ayrıca malzemelerin SEM görüntüleri alınmış ve içeriklerine bakmak için XRF testleri yapılmıştır. Tüm bu yapılan deneyler malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimin Si ilavesiyle birlikte nasıl bir değişiklik gösterdiğini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

En yüksek sertlik değeri % 0.3 Si ilaveli S3 kodlu numunede görülmüş ve aynı karışım üzerine % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 Sb ilave edilerek tüm işlemler tekrarlanmıştır.

5.1. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

5.1.1. Tozların Karıştırılması

Yapılan bu çalışmada Nanografi firmasından temin edilen 325 mesh toz boyutuna sahip AZ91 magnezyum alaşımı tozları ve Si ile Sb elementi tozları kullanılmıştır (Şekil 5.1). Alınan tozların içerikleri Şekil 5.2.'de gösterilmiş olan RIGAKU ZSX Primus II analiz cihazında XRF testiyle incelenmiş ve literatürdeki malzeme içerik oranlarına benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir (Çizelge 5.1.).



Şekil 5.1. AZ91, Si ve Sb tozları.



Şekil 5.2. RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı.

Çizelge 5.1. Literatürdeki AZ91 alaşımının kimyasal bileşiminin çalışmada kullanılan AZ91 alaşımı ile karşılaştırılması.

İçerik	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Fe	Mg
Literatürdeki Oran (%)	8.3-9.7	0.15-0.5	0.35-1	0.1	0.03	0.005	Kalan
Kullanılan Oran (%)	7.72	0.19	1.07	0.04	0.02	0.062	90.89

Saf AZ91 tozlarının uygun olduğu görüldükten sonra Si ilaveli AZ91 numunelerinin hazırlanması için AZ91 içerisine ağırlıkça % 0.1-0.5 oranlarında Si tozları ilave edilmiş ve numuneler numaralandırılmıştır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. AZ91 alaşımlarına katılan Si oranları ve numune kodları.

Numune No	İçerik
S1	AZ91+0.1 Si
S2	AZ91+0.2 Si
S3	AZ91+0.3 Si
S4	AZ91+0.4 Si
S5	AZ91+0.5 Si

Karıştırma işlemi tüm numuneler için T2F4 marka turbula cihazında (Şekil 5.3) 40 d/d hızında 60 dakika sürecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Bütün ilaveler homojenize bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.



Şekil 5.3. 3 boyutlu turbula cihazı.

İkinci etapta AZ91 tozuna ilave edilen Si miktarının mekanik ve mikroyapı özelliklerinin etkisi dikkate alınarak, optimum yoğunluk ve sertlik değerine göre Sb tozları ilave edilmiştir.

Mikroyapı ve mekanik özellikler dikkate alındığında en iyi sonucu % 0.3 Si ilavesi verdiği için AZ91 alaşım tozuna %0.3 Si ilavesi ile birlikte %0.1-0.5 arasında Sb ilave edilerek turbulada aynı parametreler ile karıştırılmıştır (Çizelge 5.2.). Karıştırılarak sıkıştırmaya hazır hale gelen tüm tozlar vakumlu poşetler içerisinde saklanarak tozların oksitlenmesi ya da diğer zararlı etkilere maruz kalması önlenmiştir.

Çizelge 5.2. AZ91+ % 0.3 Si alaşımlarına katılan Sb oranları ve numune kodları.

Numune No	İçerik
A1	AZ91+0.3 Si+0.1Sb
A2	AZ91+0.3 Si+0.2Sb
A3	AZ91+0.3 Si+0.3Sb
A4	AZ91+0.3 Si+0.4Sb
A5	AZ91+0.3 Si+0.5Sb

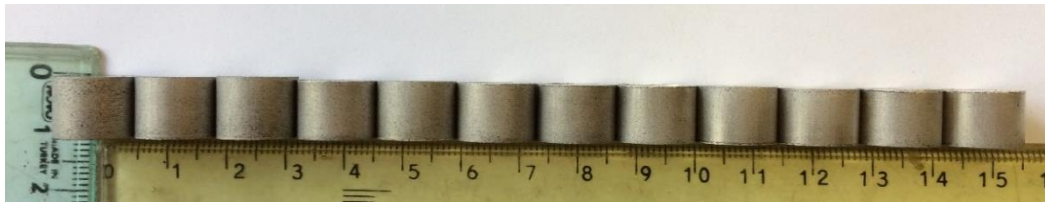
5.1.2. Tozların Sıcak Preslenmesi

Preslenmeye hazır hale getirilen tozlar sıcak preslenmeleri için Çetin [33] ve Akkaş'ın [34] yapmış olduğu benzer çalışmalardan presleme sıcaklığı 500 °C olarak seçilmiş ve pres basıncı 45 MPa olarak belirlenmiştir. Presleme çalışmaları Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Sıcak pres cihazı olarak MSE marka sıcak presleme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Sıcak pres cihazı.

Tozlar 15 mm çapında ve 25 mm yüksekliğinde numuneler olacak şekilde grafit kalıp içerisinde 1 saat sıcak preslenmişlerdir. Sıcak presleme sonrası numuneler üzerinde kalan oksit ve grafit kalıntıları 80'lik ve 180'lik zımparalarla temizlenerek, sonraki deneyler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Sıcak presleme sonrası üretilen numunelerin genel görünümü

5.2. NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU

5.2.1. XRF Analizi

Sıcak preslenme sonrasında hazır hale gelen numunelerin içeriklerinin kontrol edilmesi, bunun yanı sıra ilk ve son hallerinin karşılaştırılması amacıyla tüm numuneler Şekil 5.2.'deki RIGAKU ZSX Primus II XRF analiz cihazı cihazında XRF analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler numuneler herhangi bir bakalit kalıba ya da aracı bir kaba ihtiyaç duyulmadan doğrudan numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

5.2.2. Yoğunluk Ölçümü

XRF analizi sonrasında malzemelerin yoğunlukları ölçülmüş ve hesaplanan değerlerden numunelerin bağıl yoğunlukları hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle parçaların kütleleri Şekil 5.6'da görülen hassas ölçüm cihazıyla hesaplanmış, sonrasında hacimleri kumpasla ölçülmüş ve $d(\text{yoğunluk})=m(\text{kütle})/v(\text{hacim})$ formülüne dayanarak yoğunlukları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler AZ91 alaşımının yoğunluğuna [78] bölünerek bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan KERN 2216 markalı hassas terazi.

5.2.3. Mikro Yapı Görüntüleme ve SEM Analizleri

Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda numunelerin yüzeylerine Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda 220, 500, 1200 ve 1600 mesh zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi uygulanmıştır. Sonrasında numunelerin yüzeyleri 1 µm boyutlu elmas partikül içeren süspansiyon ile parlatılmıştır. Son olarak reaktif çözelti içerisinde 5 saniye daldırılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7). Dağlama reaktifinin içeriği aşağıdaki gibidir:

1. 5 ml asetik asit
2. 6 g pikrik asit
3. 10 ml su
4. 100 ml etanol.



Şekil 5.7. Dağlama için kullanılan pikral çözeltisi.

Dağlama işlemine tabii tutulan numunelerin optik görüntüleri Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Olympus marka optik mikroskobunda alınmıştır (Şekil 5.8). Tüm numuneler üzerinde sırasıyla 100, 200, 500 ve 1000 büyütme alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinde malzemenin mikroyapıları incelenmiş ve tane sınırları, arafazlar ve çökelti gibi yapılar işaretlenmiştir.



Şekil 5.8. Olympus marka ters metalürjik mikroskop.

Mikroyapıların alınması sonrasında malzemelerin SEM görüntüleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka cihazda alınmıştır (Şekil 5.9). Ayrıca, elektron mikroskobu ile görüntülerin alınması esnasında malzemeler üzerinde EDX analizleri yapılmış, oluşan tanelerin içinde ve sınırlarında oluşan fazların tespiti sağlanmıştır.

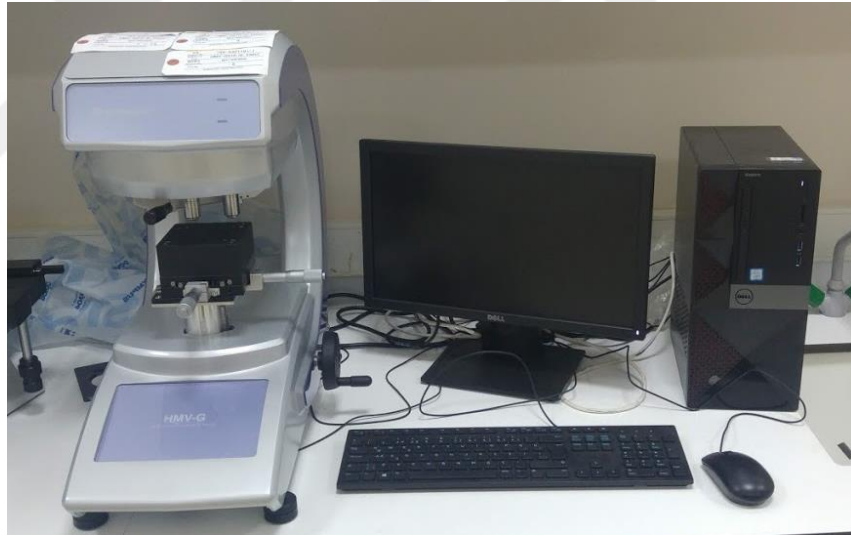


Şekil 5.9. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM analiz cihazı.

5.2.4. Mikro ve Makro Sertlik Ölçümleri

Farklı Si ve Sb oranlarının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmak için malzemelere mikro ve makro sertlik testleri uygulanmıştır. Mikro sertliklerin belirlenmesi için Mikro Vickers yöntemi, makro sertliklerin belirlenmesi içinse Brinell sertlik yöntemi tercih edilmiştir. Tüm sertlik deneyleri Kastamonu Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle malzemenin mikrosertlikleri ölçülmüştür. Bunun için ölçümler ana fazlardan (α -Mg) üçer adet, ara fazlardan üçer adet olacak şekilde alınmış ve ortalamaları ile birlikte not edilmiştir. Bu işlem için HMVG marka cihaz sistemi kullanılmıştır (Şekil 5.10). Tüm mikrosertlik ölçümleri 0.5 kg yük altında 15 saniye yükleme süresi olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10. HMVG marka mikro sertlik ölçüm sistemi.

Mikro sertlik değerleri alındıktan sonra tüm numuneler HBD 3000Z1 marka Brinell makro sertlik cihazında makro sertlik testlerine tabii tutulmuşlardır (Şekil 5.9). Uygulanan yük değeri 100 kg'dır ve yükleme süresi 15 saniyedir. 5 mm çelik bilya ucu kullanılmış ve her bir yüzeyden üçer adet sertlik ölçümü alınmıştır.



Şekil 5.9. HBD 3000Z1 marka Brinell sertlik cihazı.

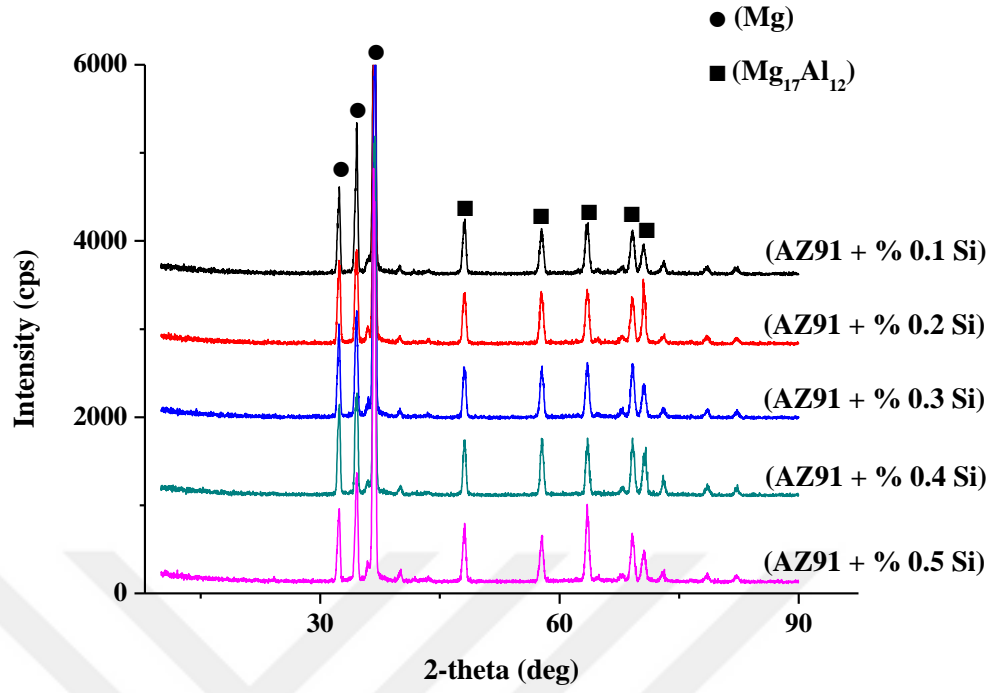
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

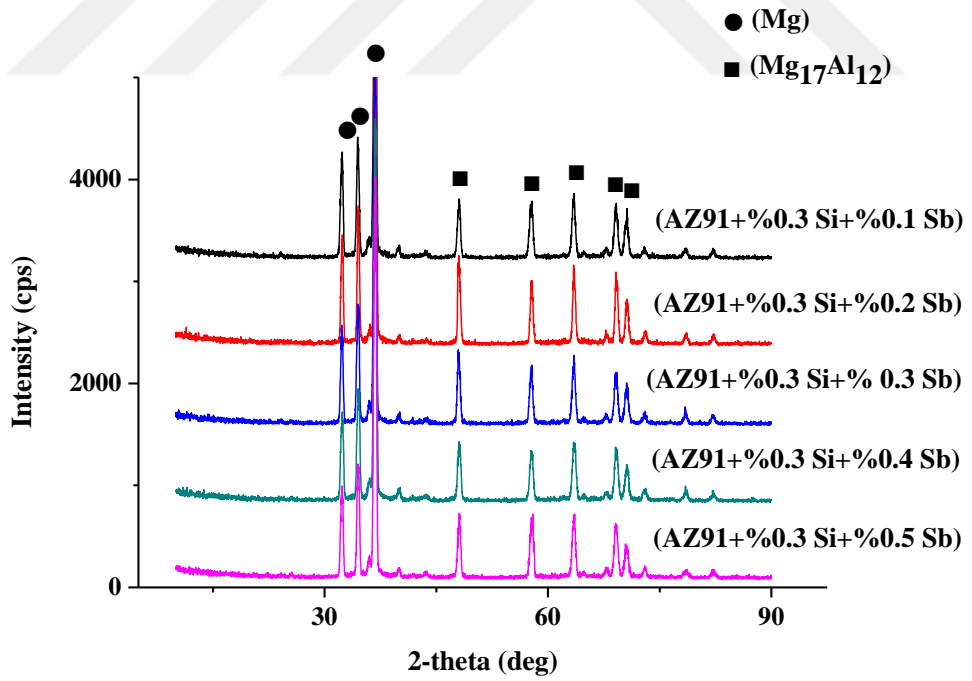
Bu bölümde; farklı saf ve çeşitli Si ve Sb ilaveli AZ91 alaşım tozlarının parametrelere bağlı olarak mikroyapıları, SEM görüntüleri, sertlikleri ve içerikleri incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

6.1. NUMUNELERİN XRD VE XRF ANALİZLERİ

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2, Si ve Sb ilaveli AZ91 alaşım numunelerinin XRD grafiğini göstermektedir. Grafik incelendiğinde; pikler α (Mg ana matris) fazından ve β fazından ($Mg_{17}Al_{12}$) oluşur. Malzeme içerisindeki çökelti, katılaşma yoluna bağlı olarak $Al_{12}Mg_{17}$ bileşiği oluşturmaktadır [82]. $Al_{12}Mg_{17}$ çökeltilerinin süneklik pahasına AZ91 alaşımı için mekanik güçlendirme sağladığı bilinmektedir [81]. Alaşımın mekanik özellikleri çökeltinin miktarına, morfolojisine ve boyutuna bağlıdır. AZ91 alaşımında, kuvvet ve sürünme direnci, $Al_{12}Mg_{17}$ fazının 120 °C'nin üzerinde yumuşaması nedeniyle özelliklerini kaybeder [81]. AZ91 hegzagonal sıkı paket α -Mg ve ötektik $\alpha + \gamma$ (γ fazı, hacim merkezli kübik α faz + β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazının birleşimi) fazlarından oluşur. β fazının çöktürülmesi, sürekli ve süreksiz çökelme şeklinde iki şekilde gerçekleşir [76].



Şekil 6.1. Si ilaveli numunelerin XRD grafikleri.



Şekil 6.2. Si+Sb ilaveli numunelerin XRD grafikleri.

Sıcak presleme sonrası numunelerin kimyasal kompozisyonlarını incelemek amacıyla yapılan XRF analiz sonuçları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Numunelerin XRF sonuçları.

İçerik	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Mg	Sb
Saf AZ91	7.72	0.19	1.07	0.04	0.062	90.89	-
S1	7.37	0.17	1.00	0.08	0.04	91.32	-
S2	7.25	0.19	0.98	0.14	0.02	91.40	-
S3	7.19	0.18	1.00	0.29	0.03	91.28	-
S4	7.13	0.18	1.02	0.35	0.03	91.27	-
S5	7.12	0.18	0.99	0.36	0.03	91.28	-
A1	7.08	0.21	1.00	0.39	0.02	91.17	0.10
A2	7.28	0.20	0.98	0.31	0.02	91.05	0.13
A3	7.48	0.17	1.00	0.25	0.03	90.77	0.26
A4	7.01	0.19	0.97	0.33	0.03	91.06	0.38
A5	6.99	0.21	0.98	0.24	0.02	91.09	0.43

6.2. NUMUNELERİN BAĞIL YOĞUNLUKLARI

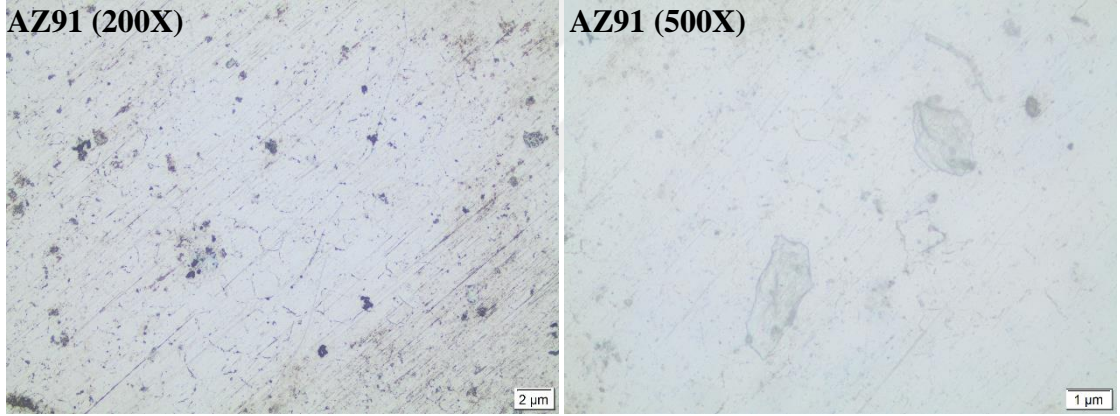
Sıcak presleme sonrasında saf AZ91 numunesi ile Si ve Sb ilaveli numunelerin bağıl yoğunluklarının yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 6.1.). Bu konudaki örnek çalışmalarda ve ders notlarında sıcak presleme sonrası üretilen parçalarda yüksek bağıl yoğunluklara ulaşıldığı görülmektedir [36]. Bununla birlikte ilave malzeme oranları arttıkça bağıl yoğunlukların da düştüğü Çizelge 6.2’de açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.2. Numunelerin bağıl yoğunluk değerleri.

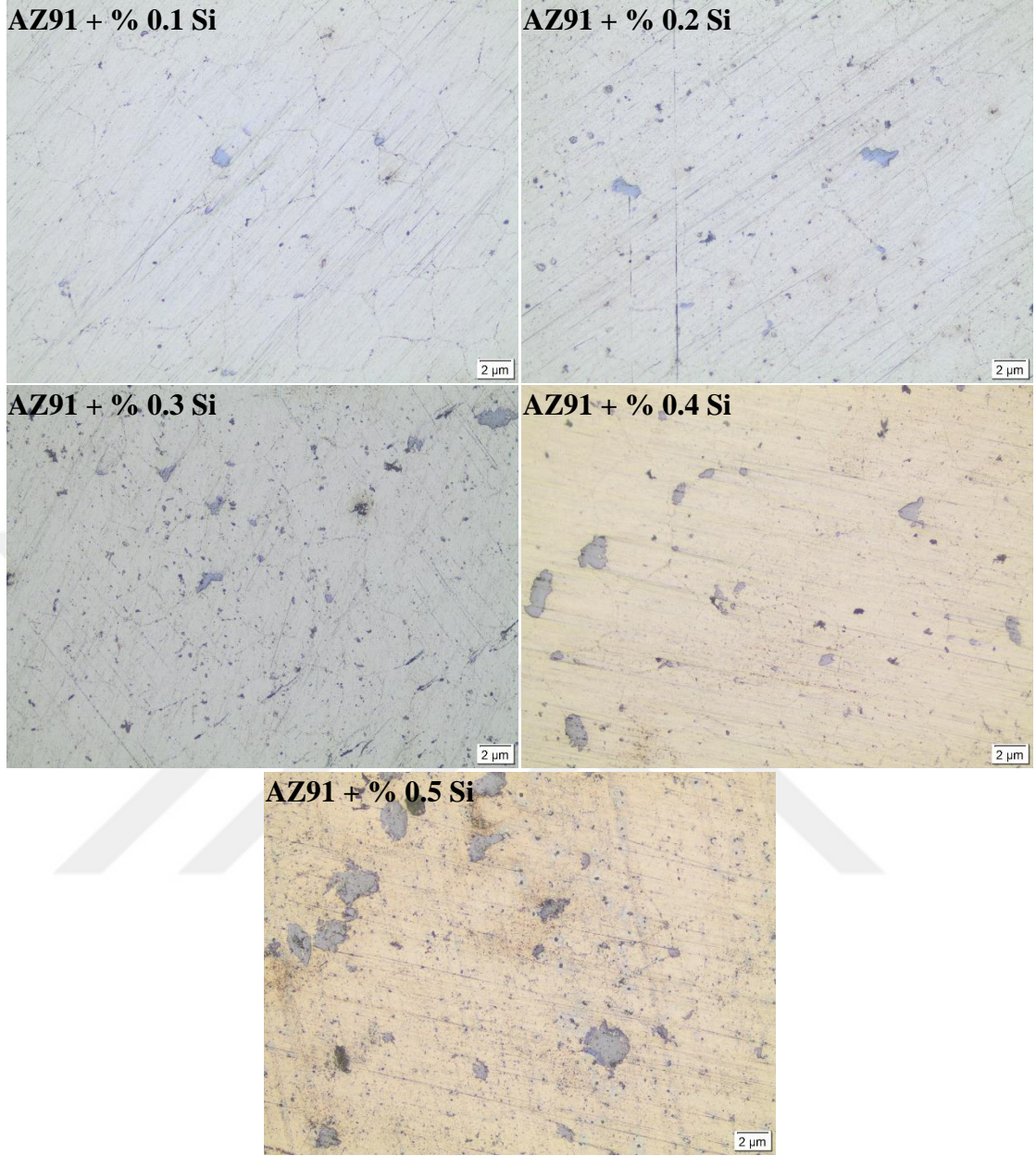
Numune No	Bağıl Yüzde Yoğunluk
Saf AZ91	% 99.17
S1	% 99.12
S2	% 99.07
S3	% 99.05
S4	% 99.01
S5	% 98.97
A1	% 98.72
A2	% 98.64
A3	% 98.23
A4	% 97.76
A5	% 97.71

6.3. NUMUNELERİN MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ

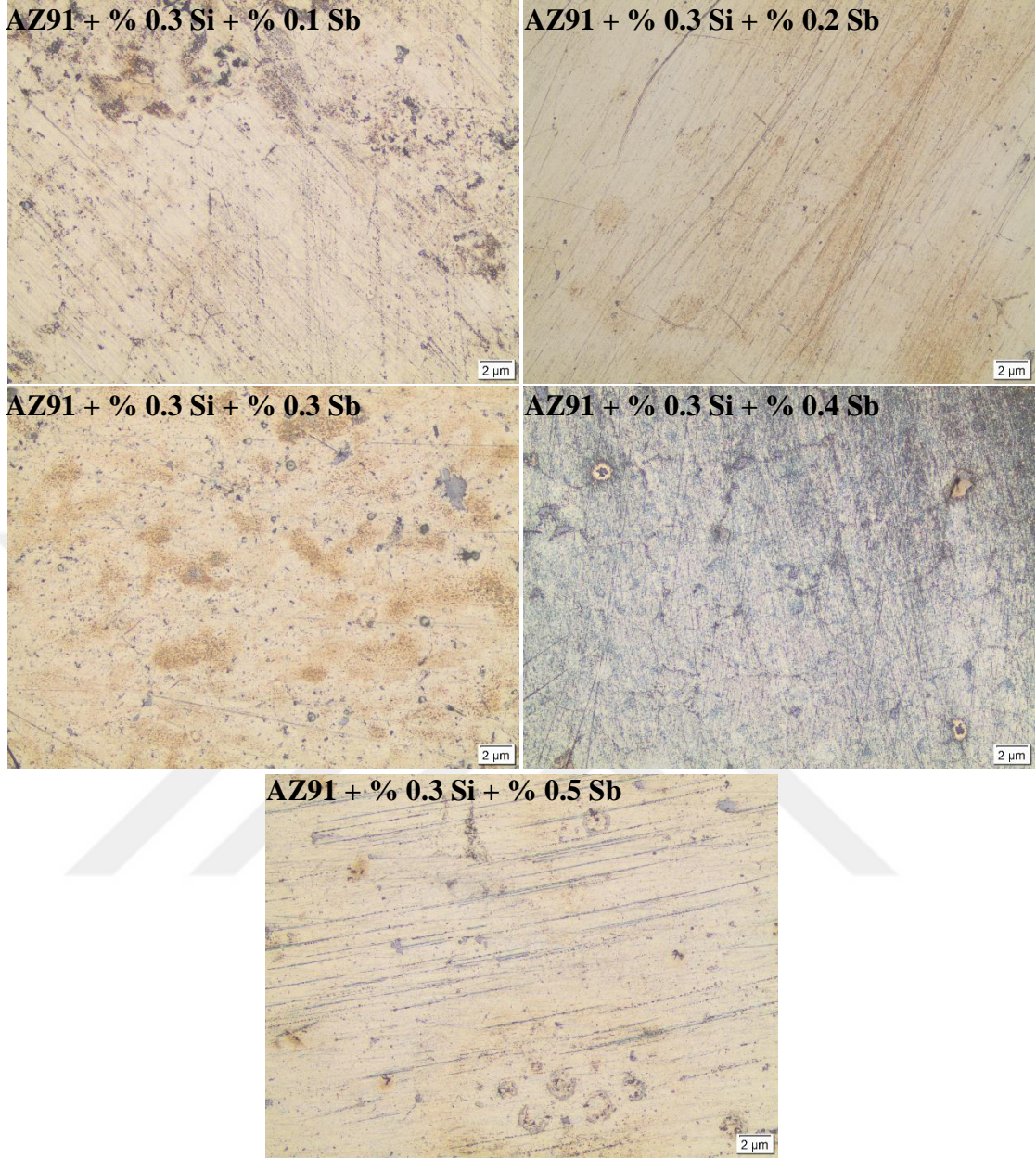
Saf AZ91 ve Si, Sb ilaveli numunelerin 200x ve 500x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri Şekil 6.3-6.7'de verilmiştir. Bu görüntülerde tane yapıları etrafında β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazları görülmektedir. Si ilaveli numunelerde Si tanecikleri koyu gri renkte gözükmemektedir. Sb ilaveli numunelerde ise Sb tanecikleri dairesel biçimde gözükmemektedir. Tüm numunelerde ilave elementlerinin artışlarının mikroyapı görüntülerinde belirgin olması, ilavelerin homojen dağıldığının göstergesidir. Literatür araştırmalarında belirtilen çalışmalarda döküm yöntemi kullanılmış [5-9] ve α -Mg tane sınırlarında Çin harfi şeklinde Mg_2Si fazlarının dizildiği görülmüştür. Bu çalışmada toz metalürjisiyle üretilen numunelerde bu şekilde bir arafaz biçimine rastlanmamıştır.



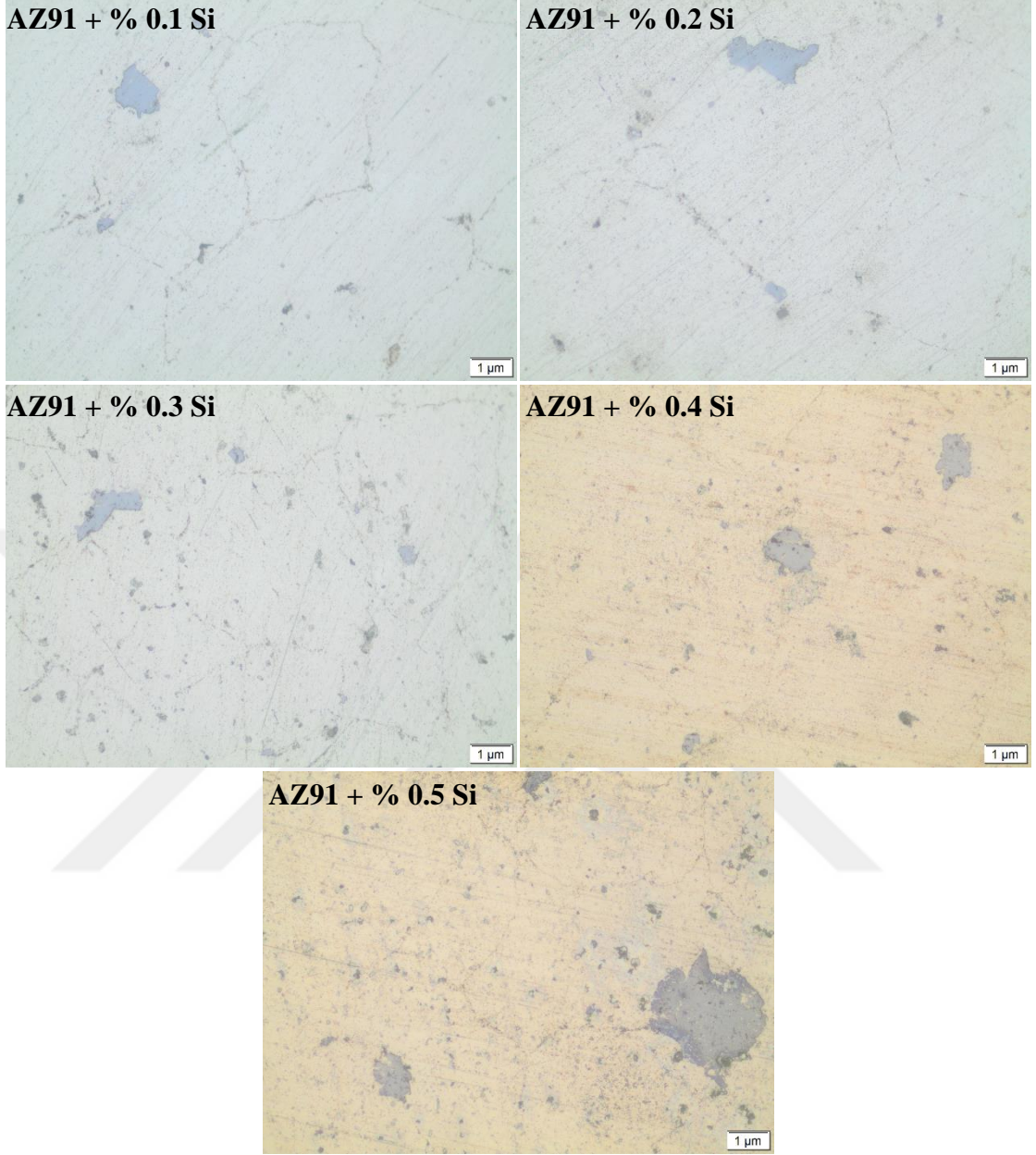
Şekil 6.3. Saf AZ91 numunesinin 200x ve 500x büyütülmüş optik mikroskop görüntüleri.



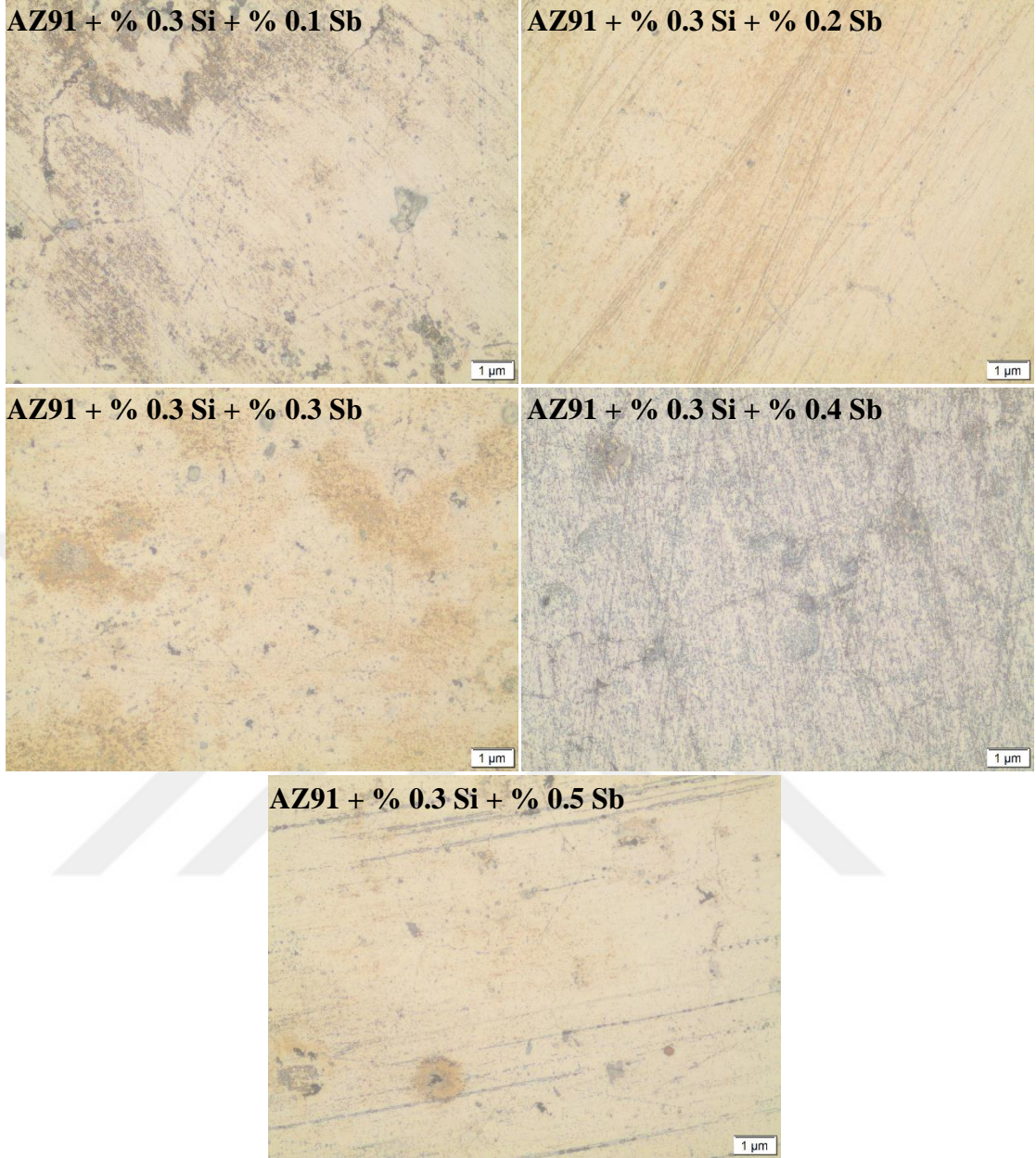
Şekil 6.4. Si ilaveli numunelerin 200x büyütme optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 6.5. Si + Sb ilaveli numunelerin 200x büyütme optik mikroskop görüntüleri.



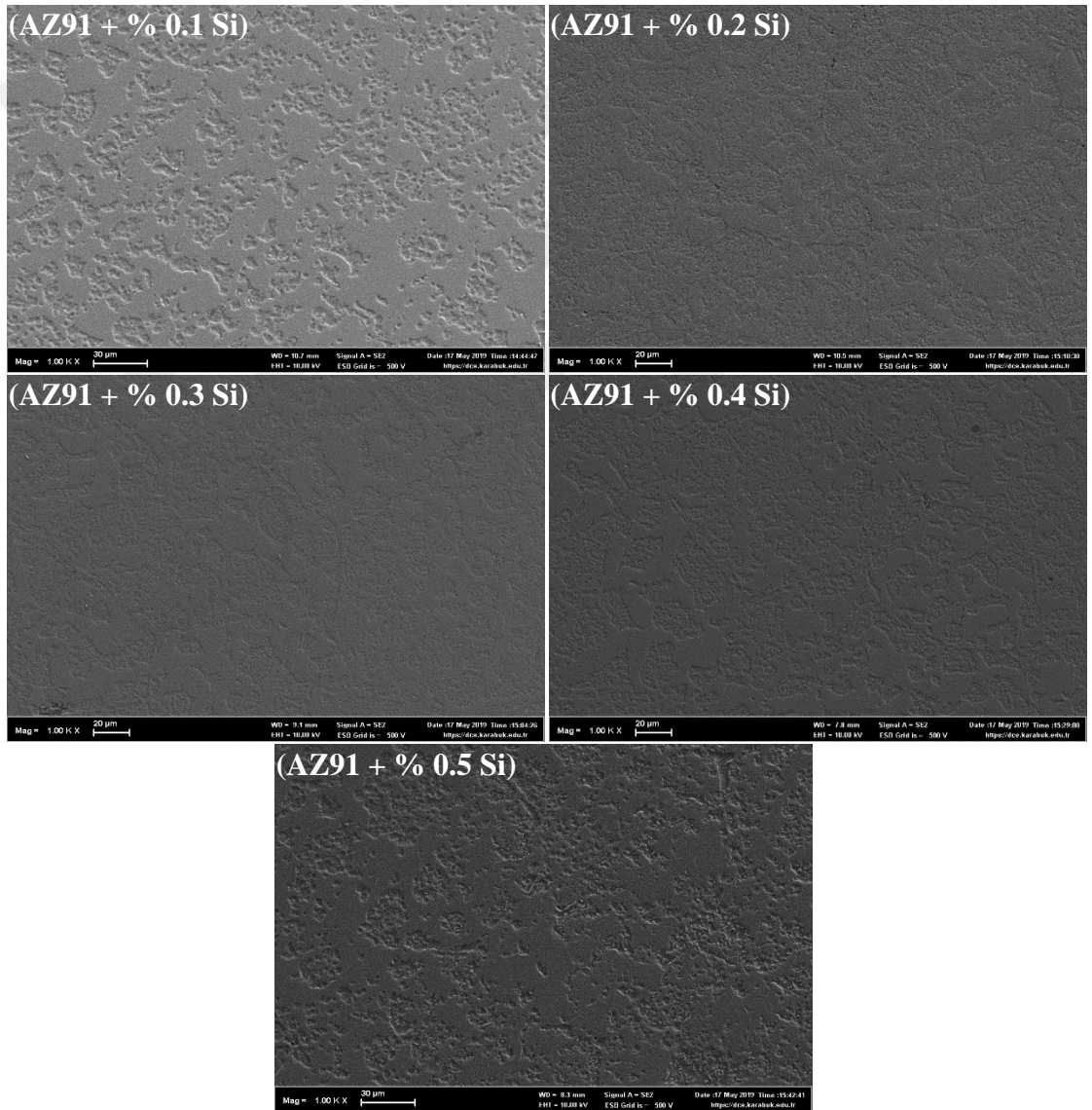
Şekil 6.6. Si ilaveli numunelerin 500x büyütme optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 6.7. Si + Sb ilaveli numunelerin 500x büyütme optik mikroskop görüntüleri.

6.4. NUMUNELERİN SEM-EDX ANALİZLERİ

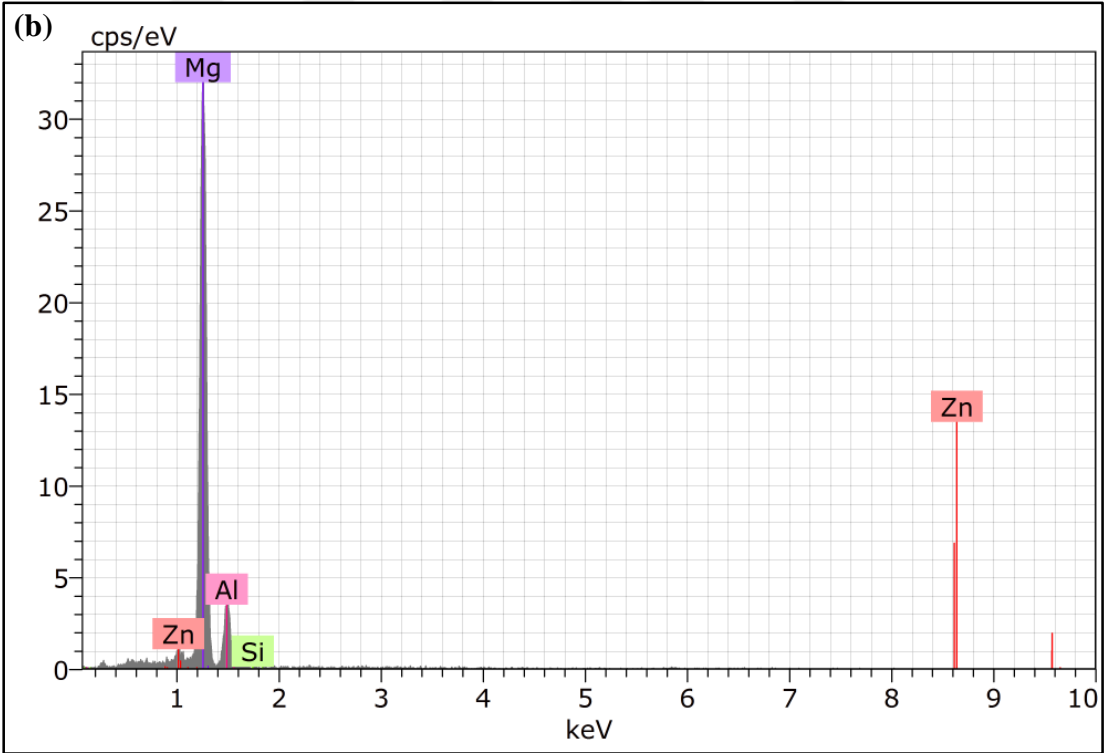
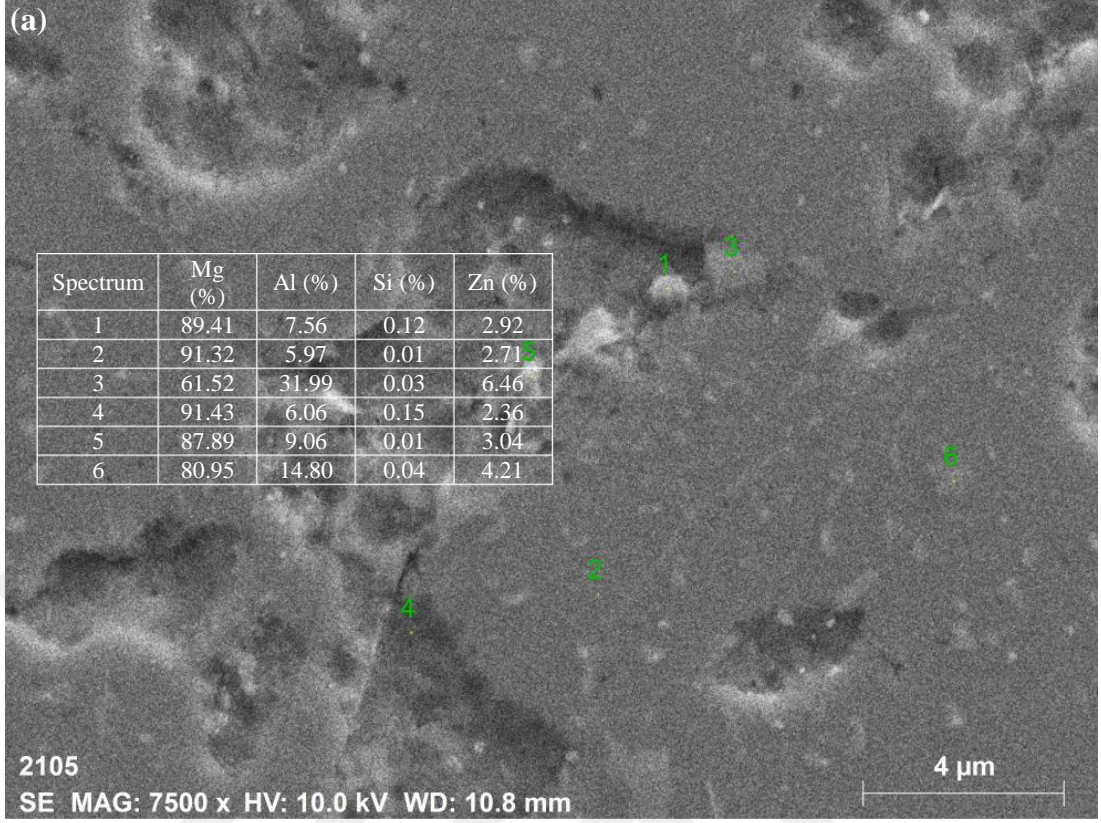
Üretilen numunelerin yüzeylerini incelemek ve sıcak pres sonrası malzeme yapılarını görmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmış sonrasında arafazların belirlenmesi ve içeriklerin incelenmesi için EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8’de yalnızca Si ilaveli numunelerdeki sıcak presleme sonrasında tüm yüzeylerde homojenliğin sağlandığı ve tozlar arasında difüzyon sonucunda güçlü bağların oluştuğu açıkça görülmektedir.



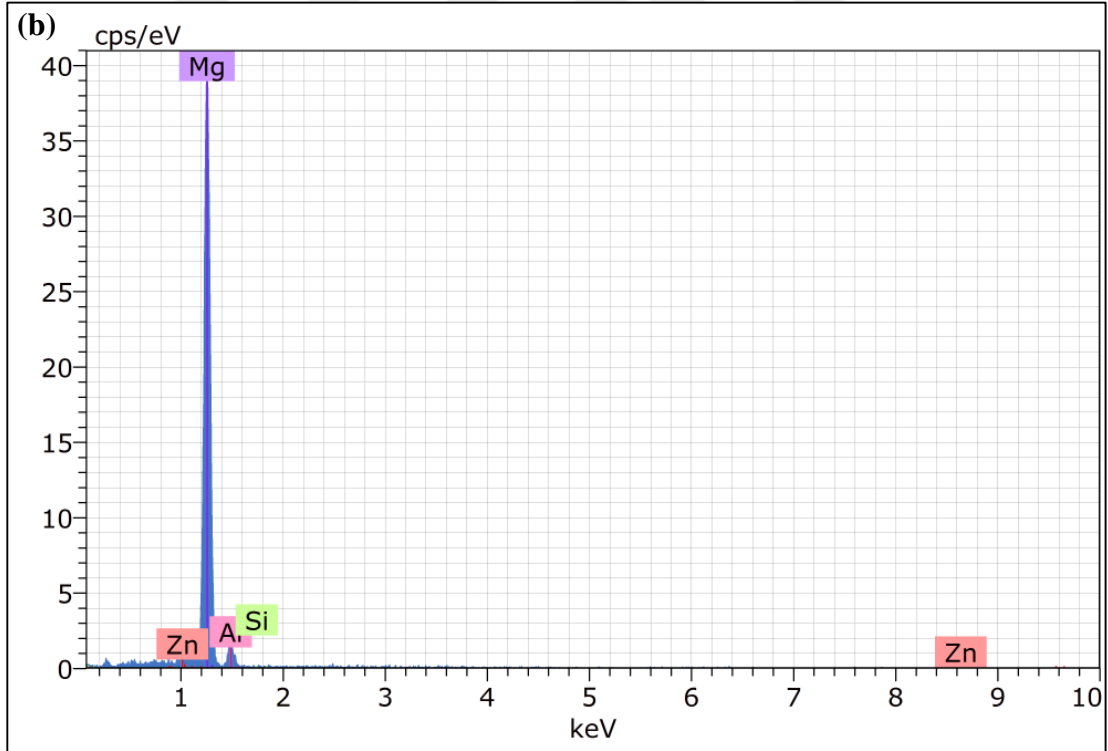
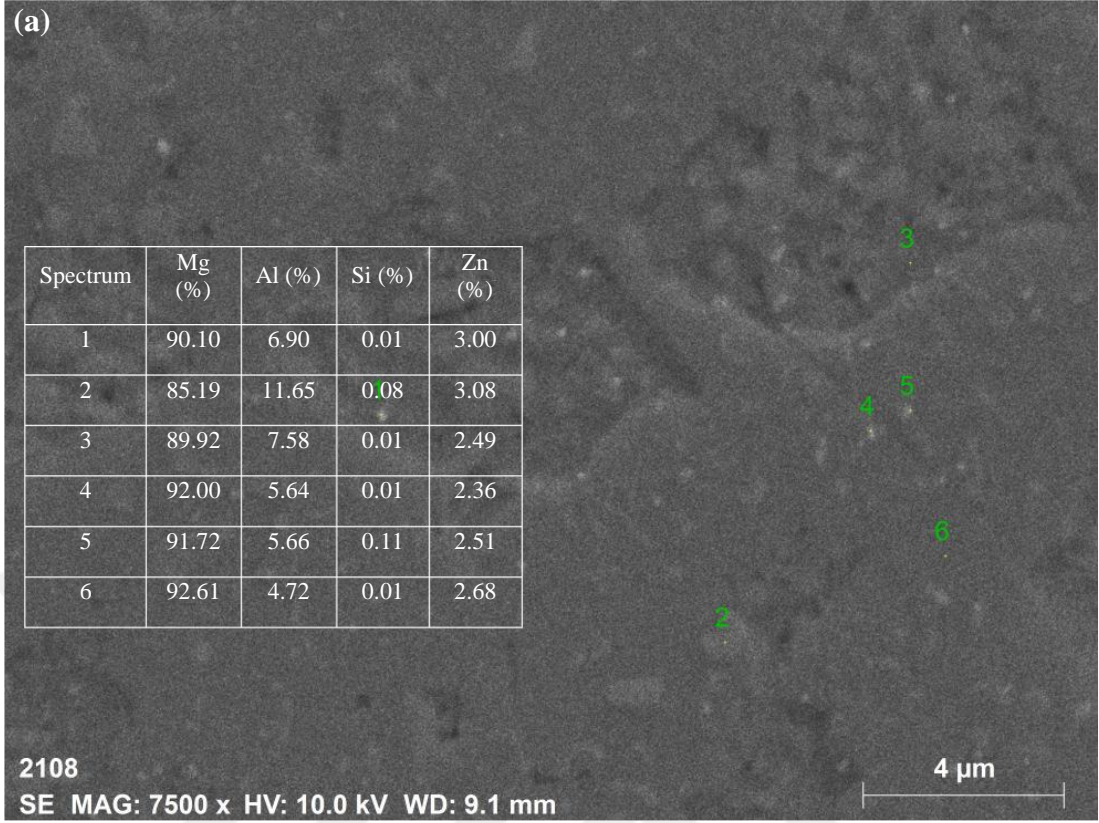
Şekil 6.8. Üretilen Si ilaveli numunelerin SEM görüntüleri (1000X).

SEM görüntülerinin alınması sonrasında tüm yüzeylerde arafazların ve ilavelerin varlığını incelemek için EDX analizleri yapılmıştır. Analizlerde ve görüntülerde Si tanelerinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Artan Si ilaveleriyle birlikte Si içeren taneciklerin yüzde oranları artış göstermiştir. Şekil 6.9-6.13'te SEM görüntüleri üzerinde arafaz ya da ana matristen farklı bir malzeme olduğu düşünülen parlak veya farklı renklerdeki noktalarda gerçekleştirilen EDX analizleri sonuçları incelendiğinde Mg_2Si arafazlarına rastlanmamıştır. Bununla birlikte özellikle tane sınırları etrafındaki fazlar incelendiğinde $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ fazlarına rastlanmaktadır. Özellikle Şekil 6.9., Şekil 6.11. ve Şekil 6.12.'deki normal değer üzerindeki alüminyum oranları bu fazların oluşumuna bir kanıt olarak değerlendirilebilir.

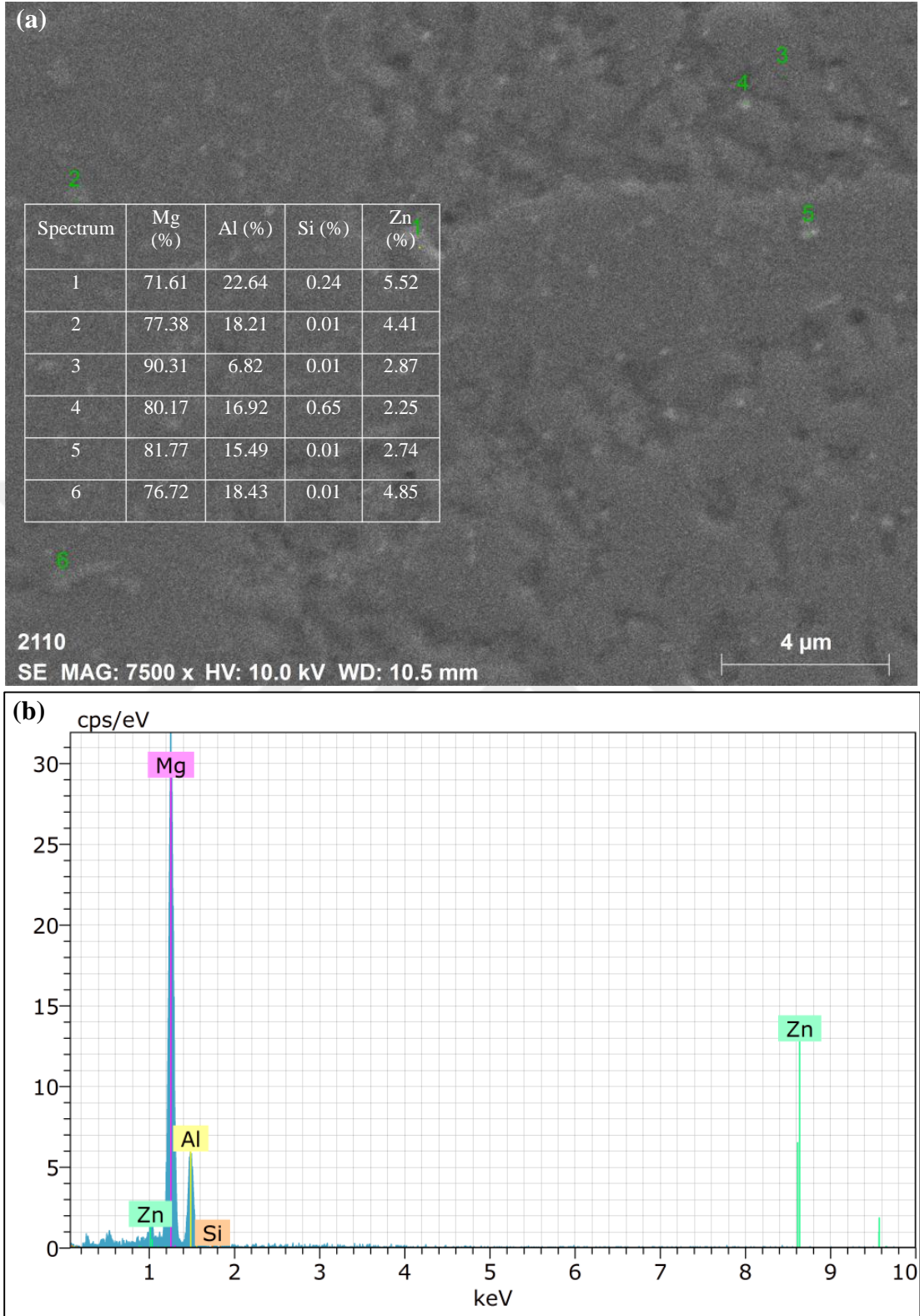




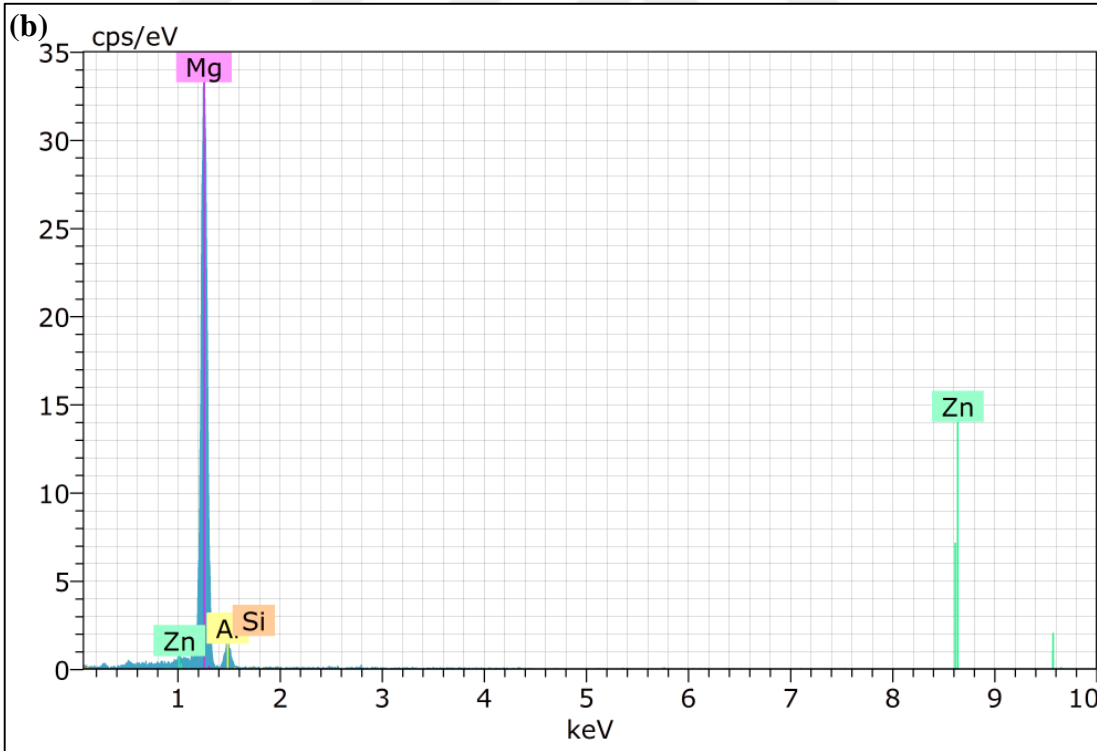
Şekil 6.9. Yüzde (%) 0.1 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 6 EDX analizi.



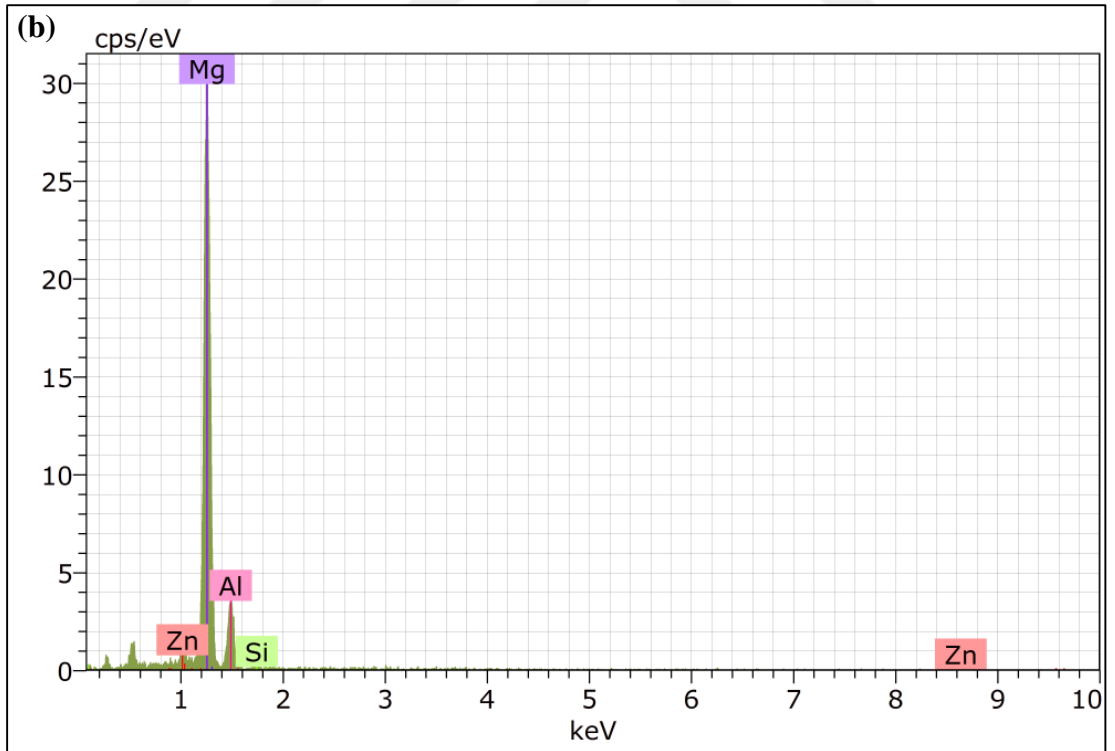
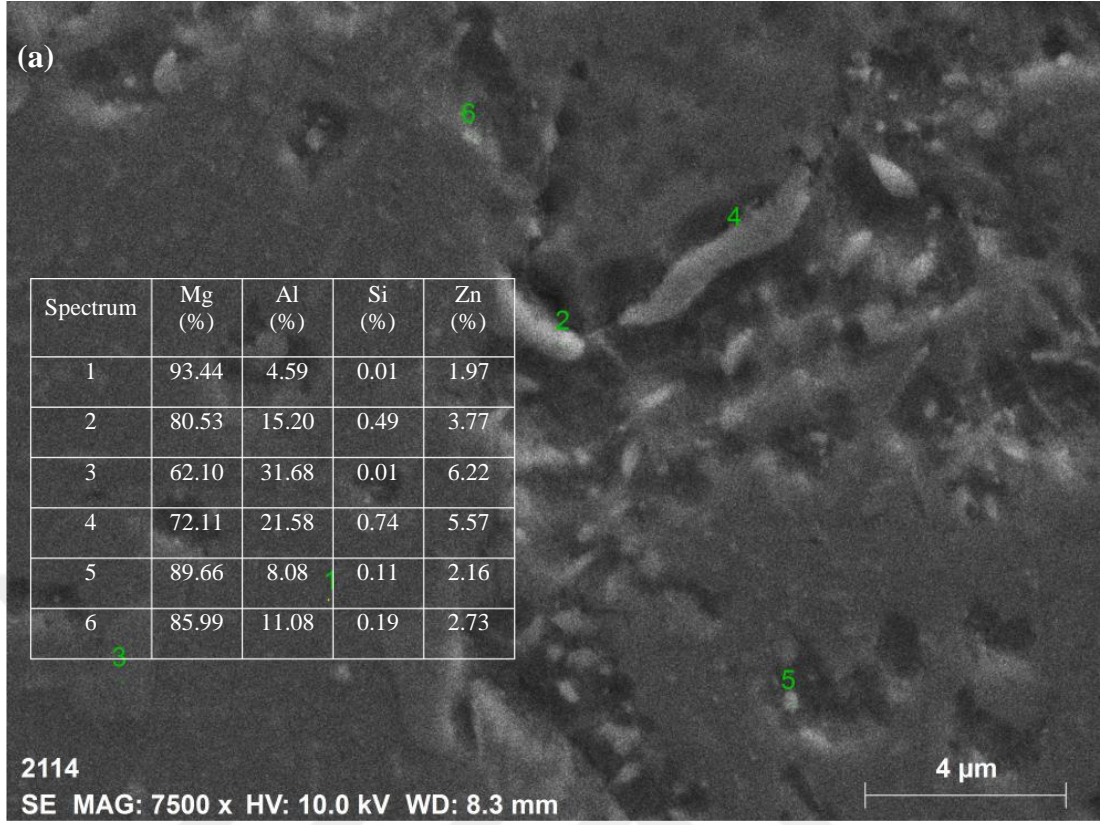
Şekil 6.10. Yüzde (%) 0.2 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 5 EDX analizi.



Şekil 6.11. Yüzde (%) 0.3 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.

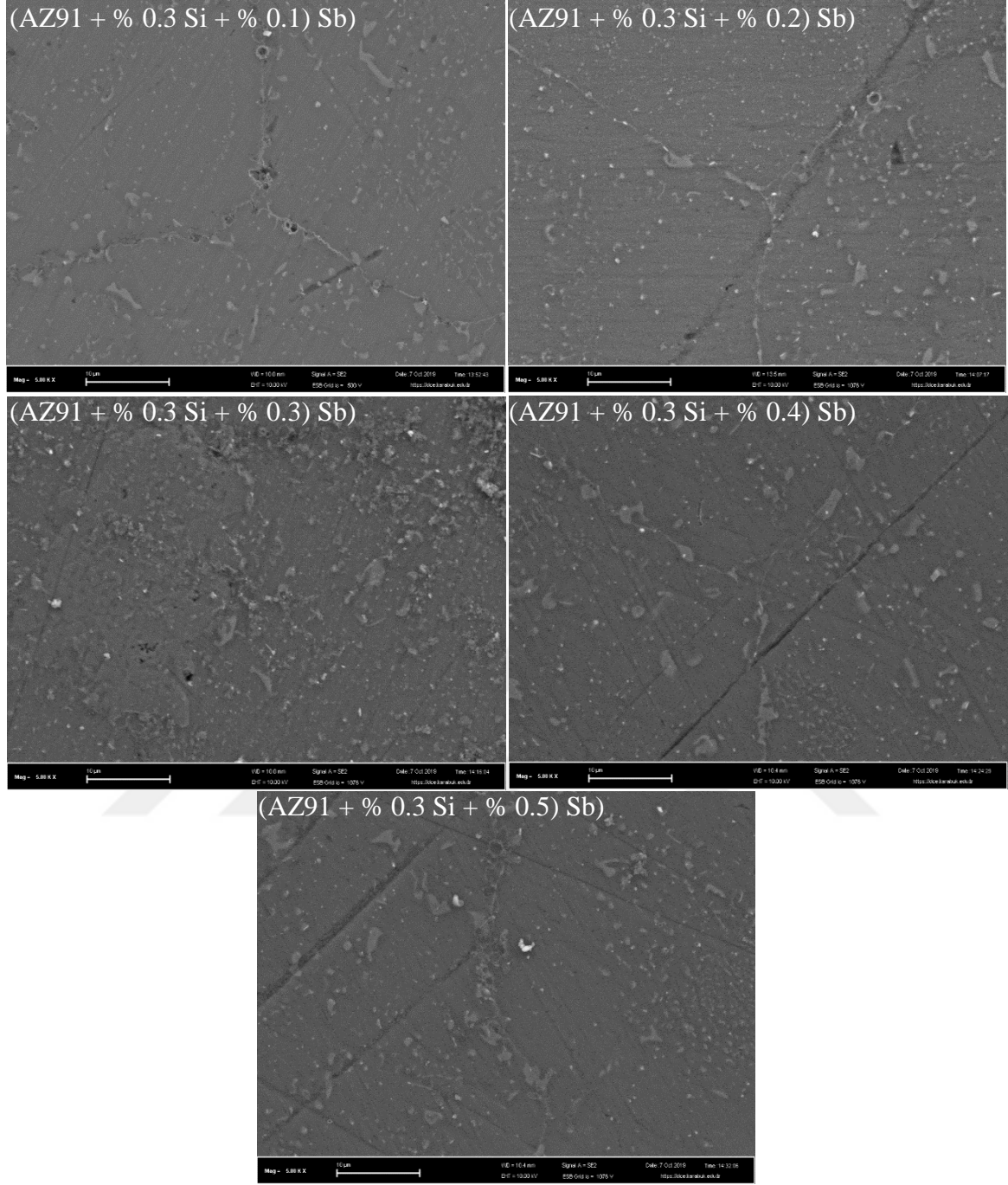


Şekil 6.12. Yüzde (%) 0.4 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.

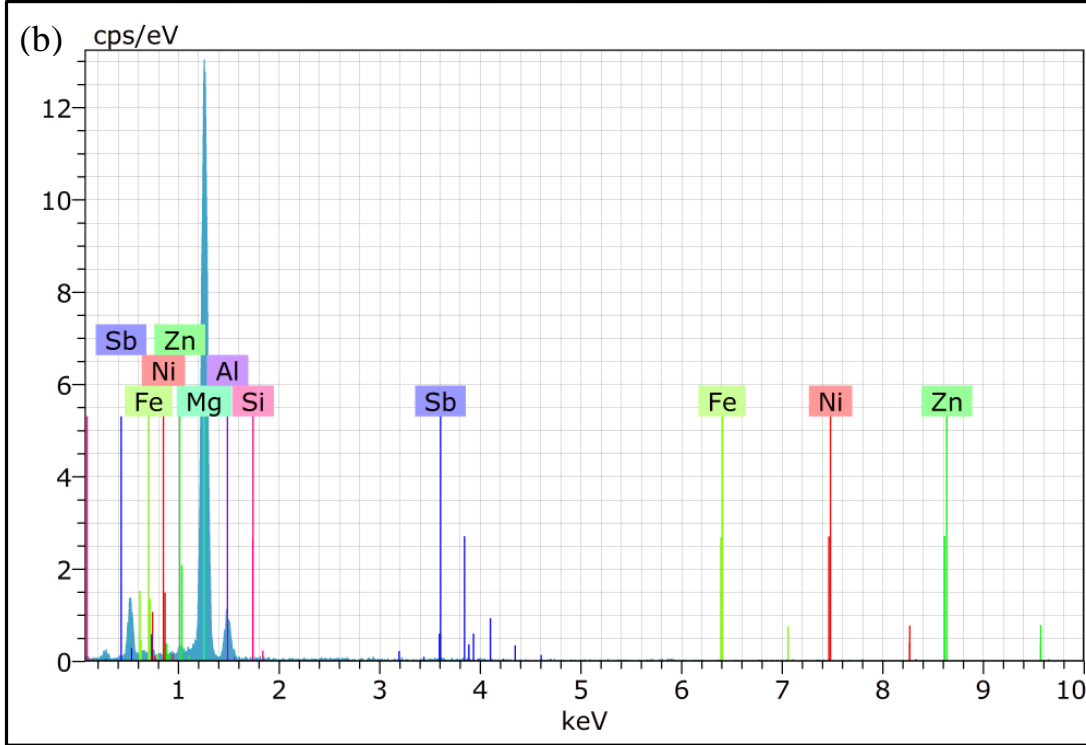
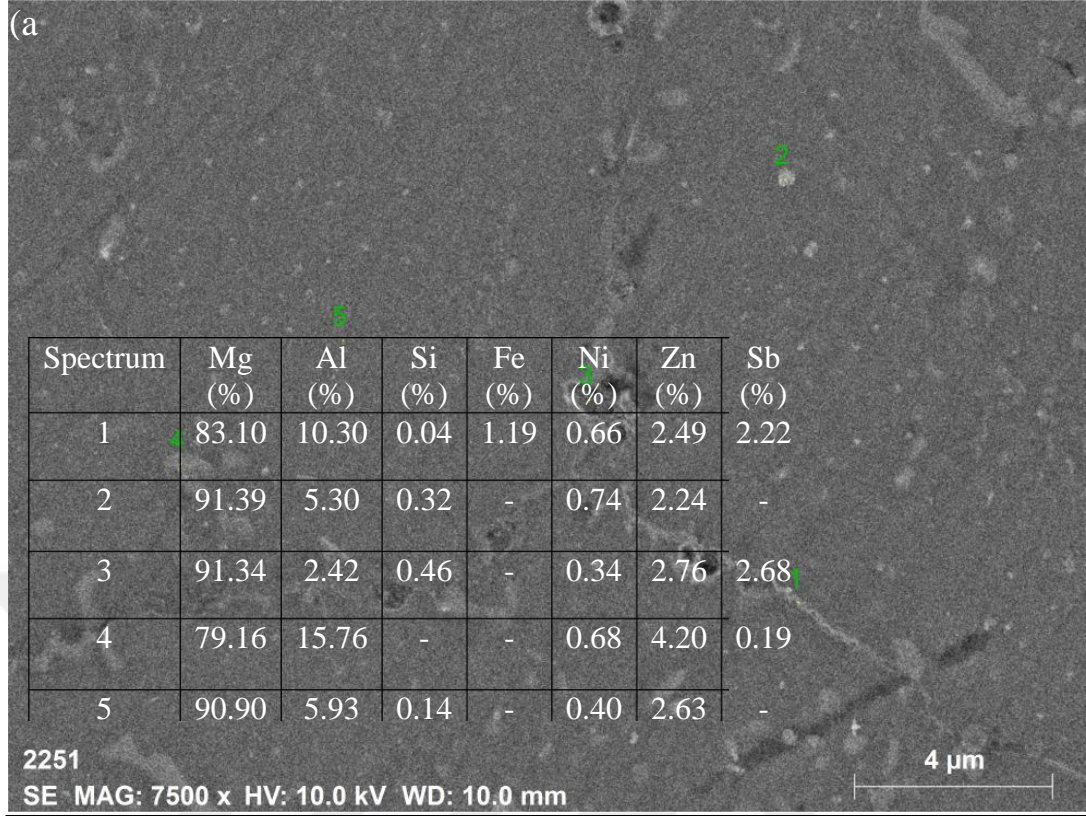


Şekil 6.13. Yüzde (%) 0.5 Si içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 2 EDX analizi.

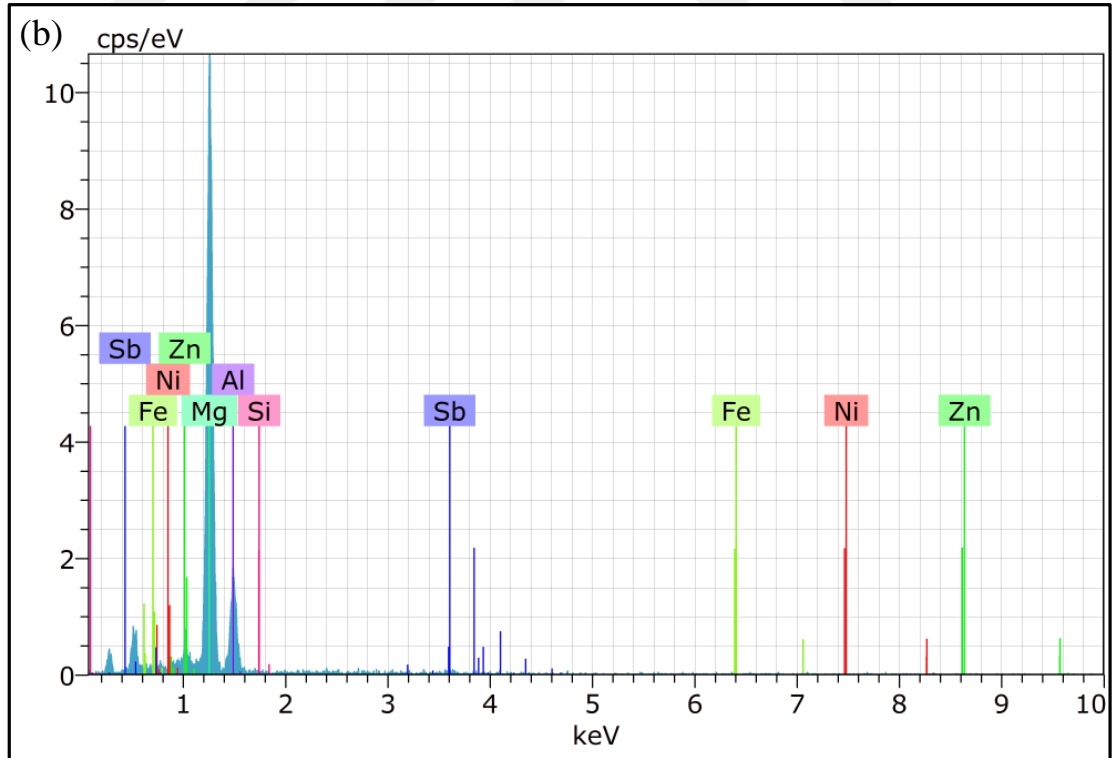
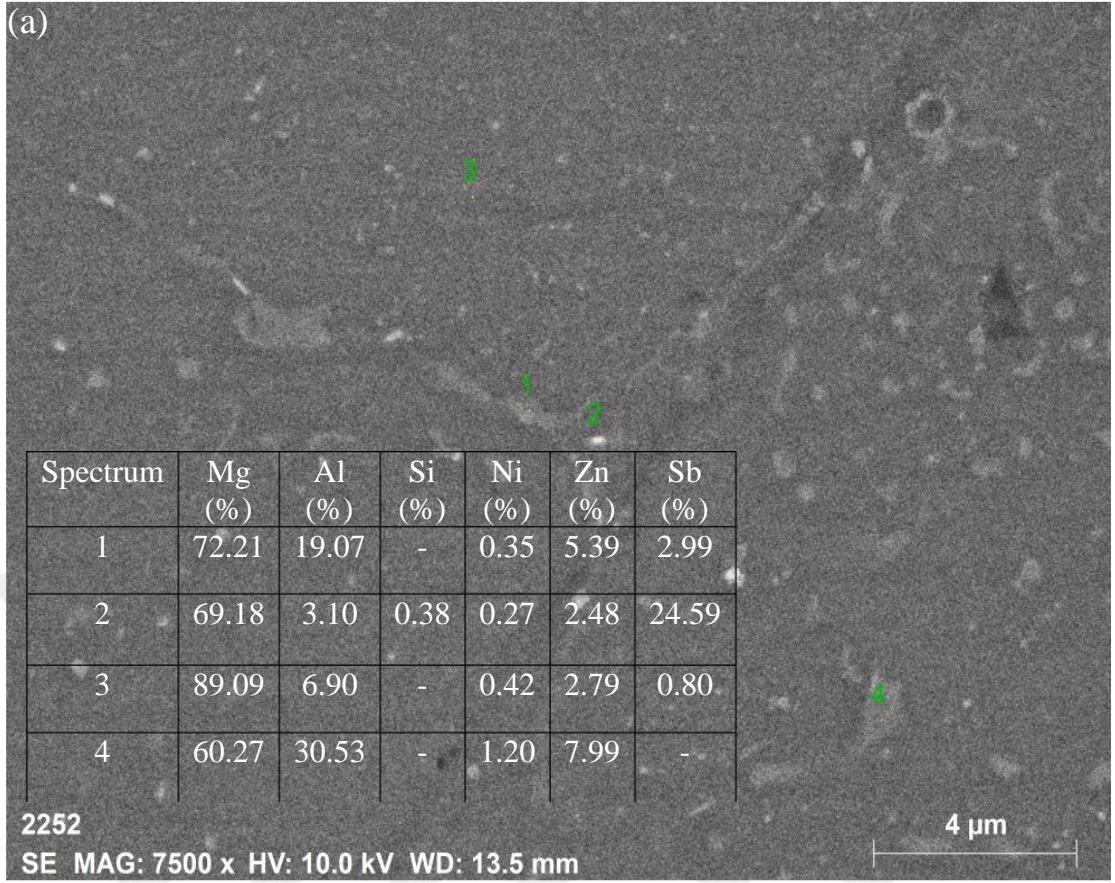
Sb ilaveli A1-A5 numuneleri için de Si ilaveli numunelerde yapıldığı gibi SEM görüntüleri alınmıştır. İlave yüzdesi arttıkça farklı fazların oluşumunun gözle görülür şekilde arttığı Şekil 6.14'deki 1000x oranında büyütülmüş SEM görüntülerinde açıkça gözlemlenebilmektedir. Şekil 6.14'te verilen görüntülerdeki yüzeylerin üzerinden belirli noktalarda alınan EDX ölçümleri sonuçları incelendiğinde A1 numunesinde sadece Si ilaveli numunelerde görülen β -Mg₁₇Al₁₂ fazlarının yanı sıra Mg₃Sb₂ arafazlarının oluşumunun başladığı görülmektedir (Şekil 6.15). Şekil 6.16'daki parlak 2 noktası incelendiğinde, % 0.2 Sb ilaveli A2 numunesinde Mg₃Sb₂ fazının oluşumuna devam ettiği tespit edilmiştir. Şekil 6.17'deki A3 numunesinde ise 2 ve 3 noktalarında Mg₂Si arafazlarına rastlanılmıştır. Şekil 6.18. ve Şekil 6.19.'da da β -Mg₁₇Al₁₂ fazlarıyla birlikte Mg₂Si ile Mg₃Sb₂ arafazlarının varlığı açıkça görülmektedir. Sb ilavesinin artmasıyla birlikte Mg₂Si arafazlarının daha fazla ortaya çıkması, Sb elementi ve Mg₃Sb₂ tanelerinin Mg₂Si fazlarını tane sınırları arasında daha homojen bir şekilde dağılmasını sağladığı ortaya çıkmıştır.



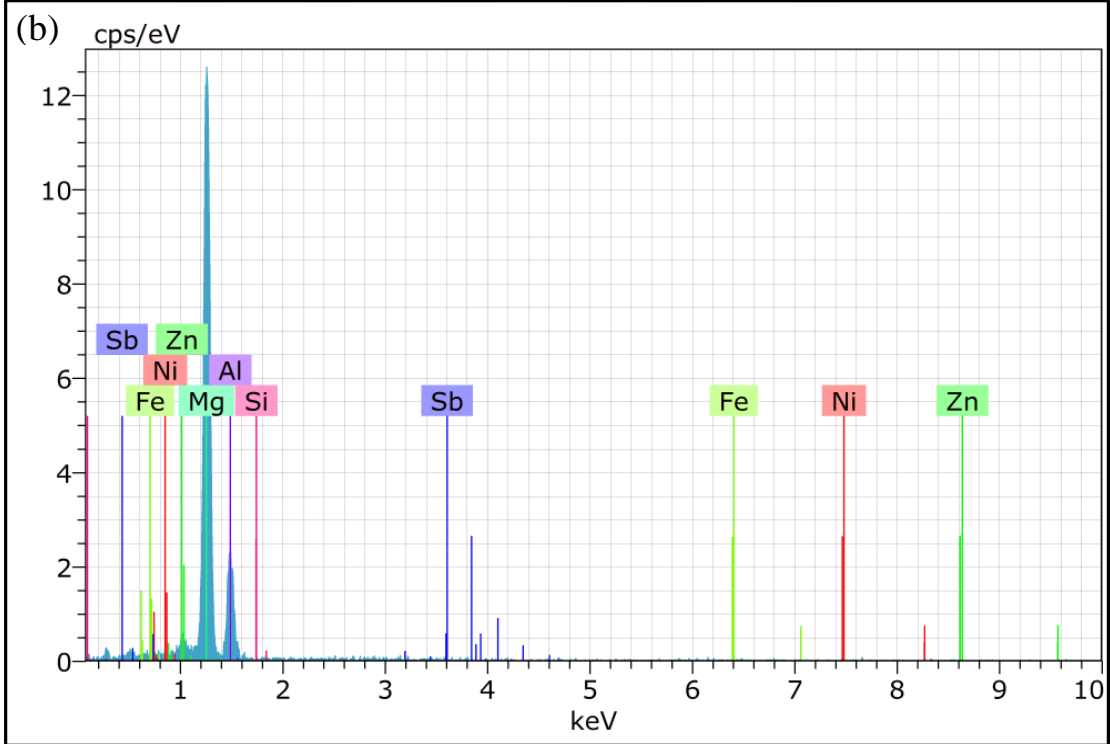
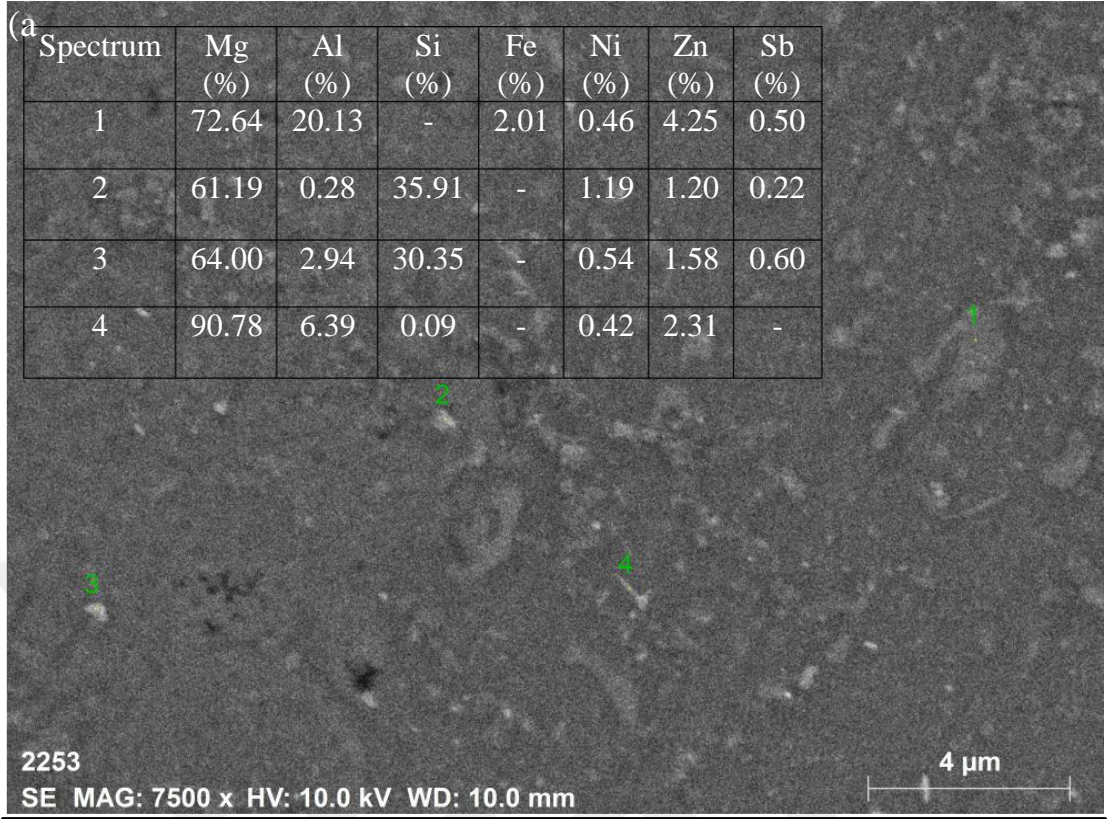
Şekil 6.14. Üretilen Si+Sb ilaveli numunelerin SEM görüntüleri (1000X).



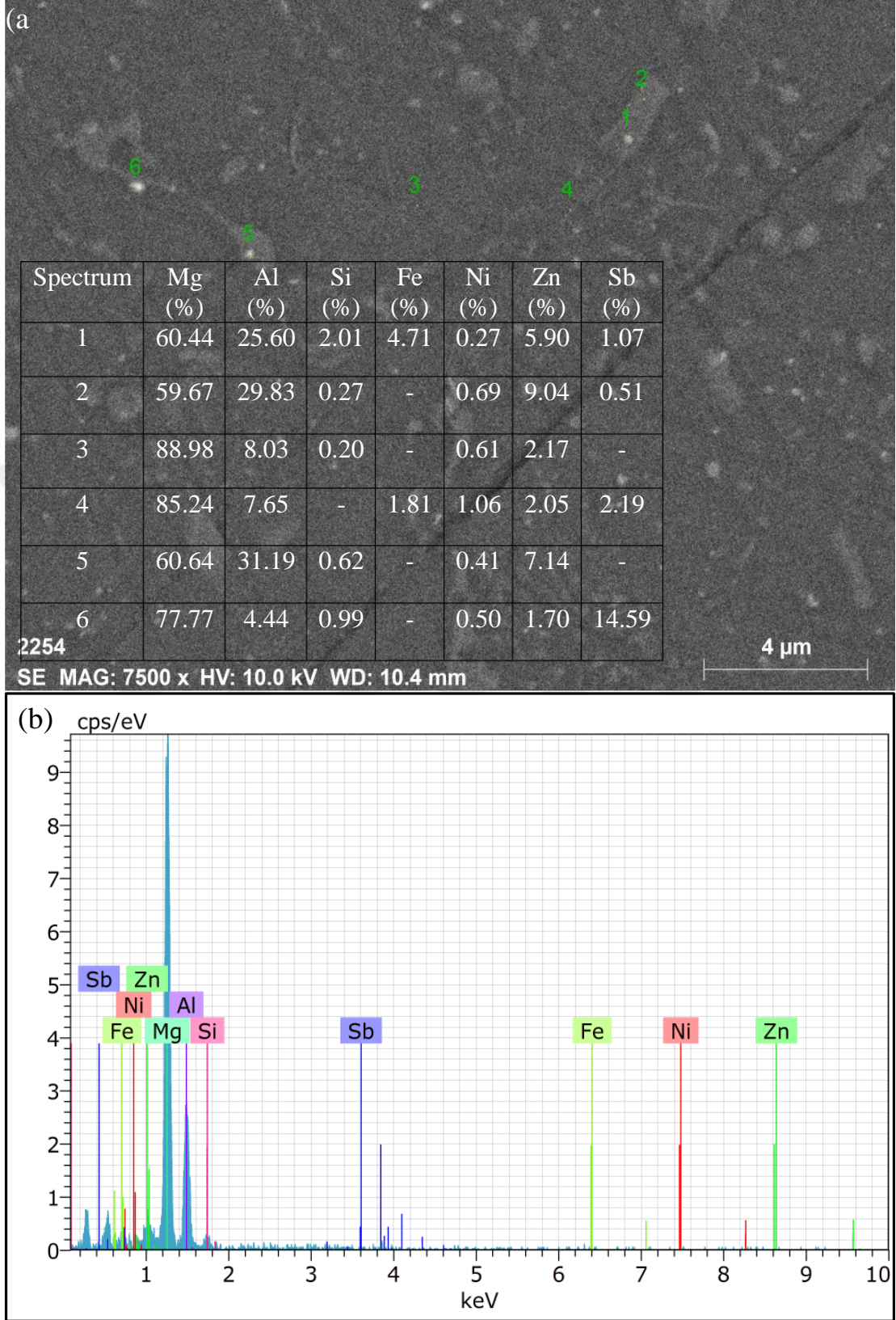
Şekil 6.15. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.1 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.



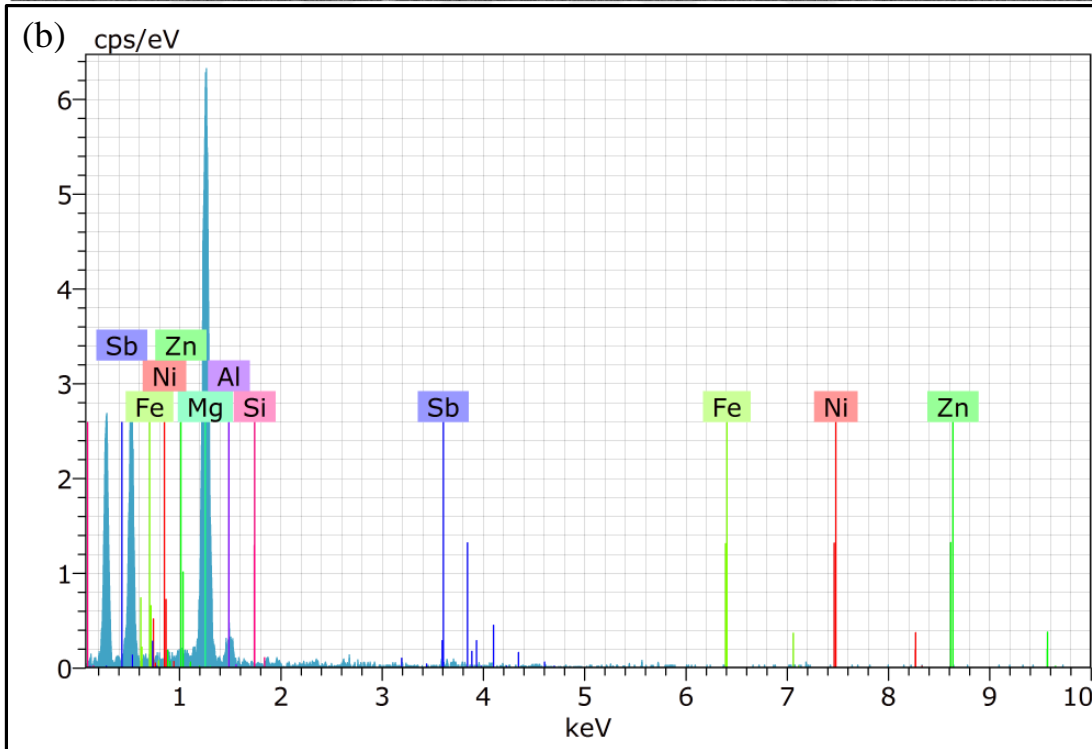
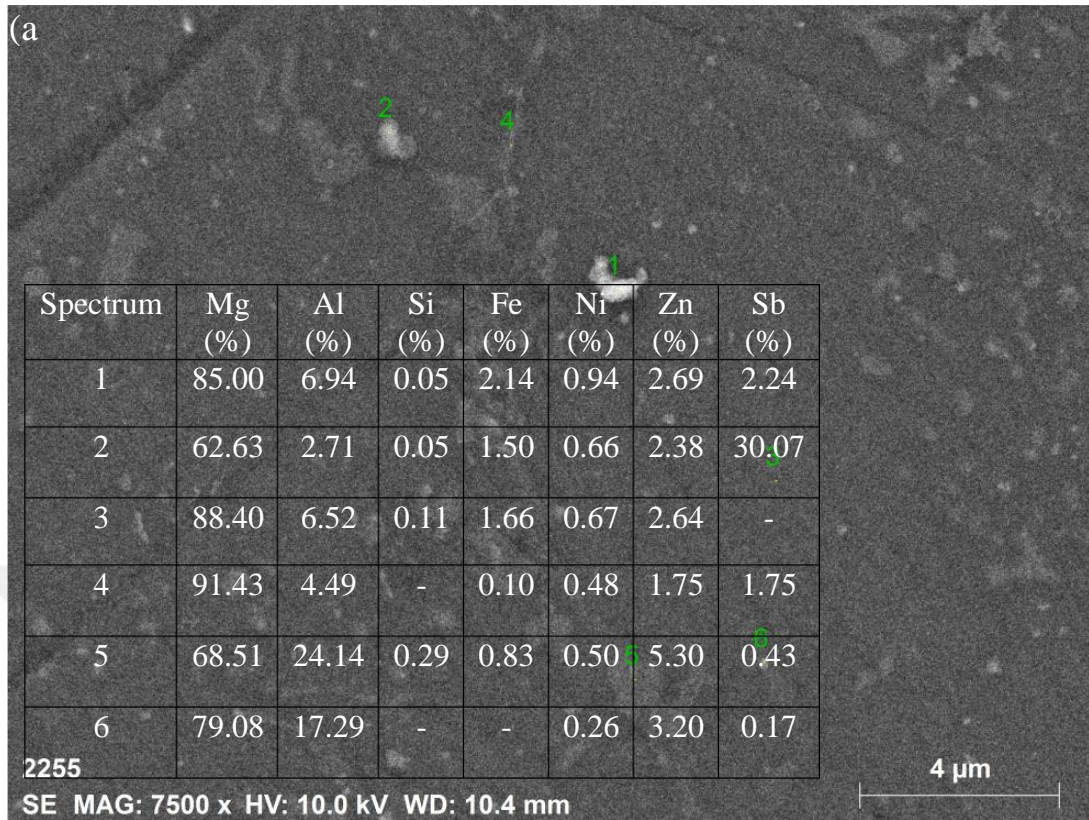
Şekil 6.16. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.2 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analiz.



Şekil 6.17. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.3 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.



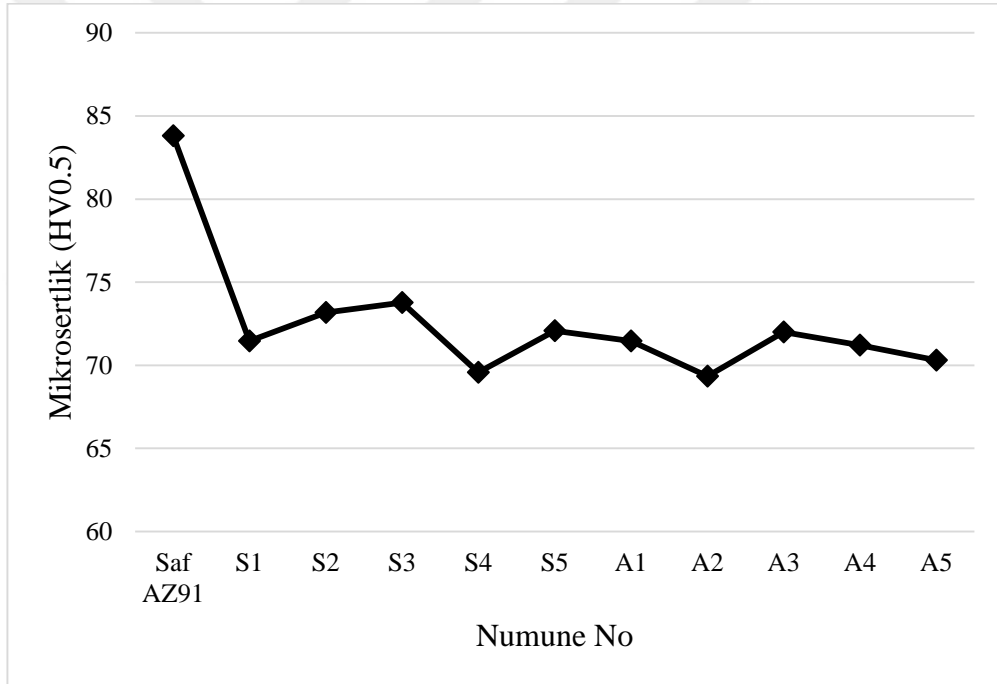
Şekil 6.18. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.4 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.



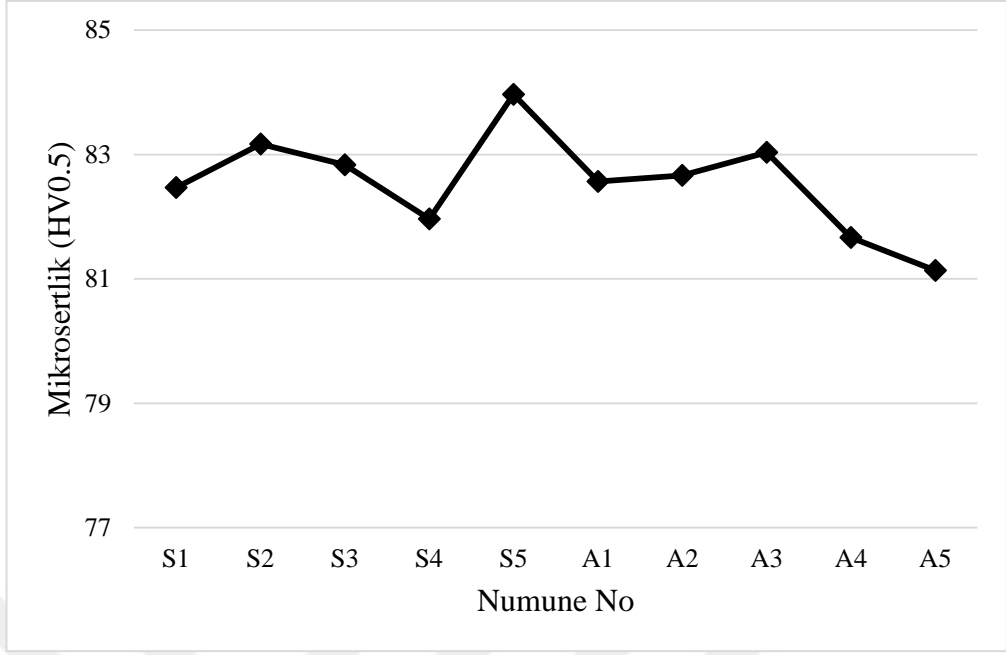
Şekil 6.19. AZ91 + % 0.3 Si + % 0.5 Sb içeren numunenin; a) SEM görüntüsü ve b) spectrum 1 EDX analizi.

6.5. NUMUNELERİN SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

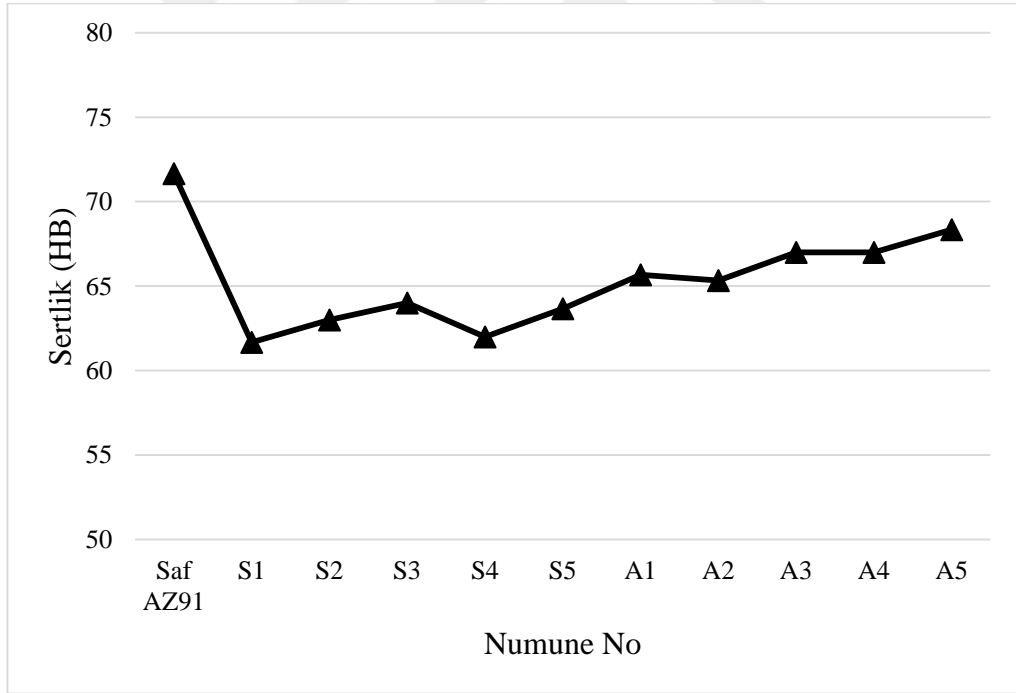
Si ve Sb ilavelerinin AZ91 alaşım tozlarına ilavesinin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemek için malzemelerde mikro ve makro sertlik deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.20-6.22). Deney sonuçlarına göre Si ilavesi AZ91 alaşımının sertlik değerlerini düşürmüştür. Mikro sertlik sonuçları incelendiğinde % 0.3 Si ilaveli S3 numunesinin en sert sade Si ilaveli numune olduğu gözlemlenmiştir. Makro sertlik sonuçlarında da benzer durum ortaya çıkmıştır. Sonrasında ilave edilen Sb ilaveleriyle birlikte malzemenin sertliği devamlı bir şekilde artmış ve eski sertlik değerlerine yaklaşmıştır. Buna rağmen ilave elementler sonrasında α -Mg ve Si fazlarının sertliği hiçbir zaman değişmemiştir.



Şekil 6.20. Üretilen numunelerin α -Mg fazı mikrosertlik (HV_{0.5}) değerleri.



Şekil 6.21. Üretilen numunelerin Si fazı mikrosertlik (HV_{0.5}) değerleri.



Şekil 6.22. Üretilen numunelerin sertlik (HB) değerleri.

Srinivasan vd. [5,6,8,9] yaptığı çalışmalarda döküm teknolojisiyle üretilen numunelere Si mikro ölçekte, yani % 0.1-0.5 arasında ilave edilmiştir. Malzemeye ilave edilen mikro ölçekteki Si elementi, AZ91 alaşımının dayanım ve sertlik değerlerini düşürmüştür. En yüksek dayanım değeri % 0.3 Si ve % 0.5 Sb ilaveli numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar yapılan çalışmadaki değerlerle örtüşmektedir. Benzer sonuçlar elde edilmesine rağmen Srinivisan vd. yaptıkları çalışmada % 0.3 Si ve % 0.5 Sb ilavesi ile saf AZ91'e göre daha yüksek sertlik ve dayanım değerleri elde etmiştir. Bunun sebebi döküm yöntemiyle üretilen bu numunelerde Sb ilavesinin β -Mg₁₇Al₁₂ fazlarının dağılımını daha düzgün ve homojen bir şekilde α -Mg fazları arasında dağılmasını sağlaması sayesinde. Toz metalürjisiyle üretim yönteminde bu şekilde bir oluşum gözlenememiştir.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AZ91 magnezyum alaşımı tozlarına ilave edilen Si ve Sb tozlarının malzemenin mekanik özelliklerine ve mikroyapılarına olan etkilerini incelemek amacıyla belirli karışım oranlarında numuneler hazırlanmış ve incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Bu çalışmanın başlangıcında 325 mesh boyutlarındaki AZ91, Si, Sb tozları Nanografi firmasından satın alınarak temin edilmiştir.
2. Öncelikle AZ91 tozları 500 °C'de 1 saat boyunca sıcak preslenmiş ve üretilen numunenin bağıl yoğunluk değeri % 99.17 şeklinde not edilmiştir.
3. Üretilen AZ91 numunesinin sertlik değerlerine bakılmış ve 83.8 HV_{0.5} mikro sertlik değeri ile 71.67 HRB sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür.
4. Si ilavesinin mikro düzeyde ilavesinin mekanik özelliklere olan etkisini incelemek amacıyla sırasıyla kütlece % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 oranlarında AZ91 alaşım tozları ile karıştırılmış ve üretilen karışımlar 500 °C'de 1 saat boyunca sıcak preslenmiştir. Numunelerin bağıl yoğunluklarının Si ilavesinin artışıyla birlikte çok küçük de olsa azaldığı ortaya çıkmıştır.
5. Numunelerin içeriklerini belirlemek amacıyla XRD ile XRF analizleri yapılmış ve bu analizler sonucunda içeriklerde büyük değişiklikler olmadığı görülmüştür. Bu sonuç toz metalürjisinin avantajlarından biri olan üretim sonrası minimum malzeme kaybını kanıtlamıştır.

6. Numunelerin mikroyapıları optik mikroskop yardımıyla görüntülenmiştir. Çekilen görüntülerde tozlar arasında difüzyon bağları sayesinde sertleştiği net bir şekilde gözlemlenmiştir. Saf AZ91 numunesinde ve Si ilaveli numunelerde β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazlarının tane sınırları etrafında dağıldığı görülmüştür. Buna ek olarak Si ilaveli numunelerde Si taneciklerinin Mg tanecikleri etrafında dizildiği de açık bir şekilde gözlemlenmiştir.
7. Mikroyapıları incelenen numuneler elektron mikroskobu yardımı ile SEM görüntüleri alınmış ve EDX analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazları ortaya çıkmış fakat Mg₂Si fazlarına rastlanılamamıştır.
8. Si ilaveli numuneler arasında en yüksek sertlik değerleri 73.76 HV_{0.5} ile 64 HRB sonuçlarına sahip olan % 0.3 Si ilaveli S3 numunesinde gözlemlenmiştir. Ayrıca Si ilaveli tüm numunelerin sertlik değerlerinin saf AZ91 numunesinin değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerlerindeki düşüşlerin Si elementinin α -Mg fazları ve β -Mg₁₇Al₁₂ fazları etrafında düzensiz bir şekilde dağılarak dayanımı düşürmesinden dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir.
9. Kütlece % 0.3 Si içeren AZ91 alaşımlarına sırasıyla Si ilavelerinde olduğu gibi % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 Sb ilave edilmiş ve tüm numuneler 500 °C'de 1 saat boyunca sıcak preslenmiştir. Sb ilaveleriyle birlikte çok düşük de olsa bağıl yoğunluklar azalmaya devam etmiştir.
10. XRF ve XRD analizleri sonucu sıcak pres sonrasında malzeme karışım oranlarında değişiklik olmadığı görülen Sb ilaveli numunelerin optik mikroskoplar yardımıyla mikro görüntüleri alınmıştır. Çekilen görüntülerde tane sınırları etrafında daha düzenli ve daha homojen dağılan arafazların olduğu gözlemlenmiştir. Numuneler üzerinden alınan SEM görüntülerinde yapılan EDX analizleri sonucu bu arafazların β -Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Si ve Mg₃Sb₂ oldukları ortaya çıkmıştır.

11. Yapılan mikro vickers ve Brinell sertlik deneyleri sonucunda Sb ilavesiyle birlikte sürekli olarak numunelerin makro sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Buna rağmen en yüksek sertlik değerleri A5 numunesinde 70.3 HV_{0.5} ve 68 HRB şeklinde ölçülmüştür. Saf AZ91 numunesinin sertlik değerlerine ulaşamamıştır.
12. Sb ilavesi ile birlikte makro sertlik değerlerindeki artış, intermetalik fazların Sb ilavesi arttıkça daha homojen ve daha düzenli bir şekilde α -Mg tane sınırları etrafında dağılması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Si ve Sb ilave değerleri ne olursa olsun mikro sertlik değerlerinin büyük değişimler göstermediği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Görmüş, I. Z. S., Ergene, N., “Magnezyumun Klinik Önemi”, *Genel Tıp Derg.*, 14(2): 69-75 (2004).
2. Öztürk, F., Kaçar, İ., “Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 1: 12-20 (2012).
3. Mathis, K., Gubicza, J., Nam, N.H., “Microstructure And Mechanical Behavior Of AZ91 Mg Alloy Processed By Equal Channel Angular Pressing”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 394, Issues 1–2: 194-199 (2015).
4. Roodposhti, P.S., Sarkar, A., Murty, K.L., “A Review of the Influence of Production Methods and Intermetallic Phases on the Creep Properties of AZ91.” *Magnesium Technology 2014*: 59-64 (2014)
5. Srinivasan, A., Pillai, U.T.S., Pai, B.C., “Microstructure And Mechanical Properties Of Si And Sb Added AZ91 Magnesium Alloy”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 36, Issue 8: 2235-2243 (2005).
6. Srinivasan, A., Ningshen, S., Kamachi Mudali, U., Pillai, U.T.S., Pai, B.C., “Influence Of Si And Sb Additions On The Corrosion Behavior Of AZ91 Magnesium Alloy”, *Intermetallics*, Volume 15, Issue 12: 1511-1517 (2007).
7. Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Gül, F. ve Candan E., “AZ91 magnezyum alaşımının döküm ve mekanik özelliklerine silisyum ilavesinin etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, (2009)
8. Srinivasan, A., Ningshen, S., Kamachi Mudali, U., Pillai, U.T.S., Pai, B.C., “Influence Of Si And Sb Additions On The Corrosion Behavior Of AZ91 Magnesium Alloy”, *Intermetallics*, Volume 15, Issue 12: 1511-1517 (2007).
9. Srinivasan, A., Ajithkumar, K.K., Swaminathan, J., Pillai, U.T.S., “Creep Behavior of AZ91 Magnesium Alloy”, *Procedia Engineering*, Volume 55, 109-113 (2013).
10. Trojanova, Z., Gartnerova, V., Jager, A., Namesny, A., Chalupova, M., Palcek, P., Lukac, P., “Mechanical and fracture properties of an AZ91 Magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles”, *Composites Science and Technology*, Volume 69, Issue 13: 2256-2264 (2009).

11. Sheng, Ding, S., Chen, Ding, Chen, Zhen-Hua “Effects of Si addition on microstructure and mechanical properties of RS/PM (rapid solidification and powder metallurgy) AZ91 alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 470, Issues 1-2, 20: L17-L20, (2009).
12. Sun, M.X., Wenwen, Y.D., Feng, X., “Effects of Ca,Si and RE additions on the microstructures and mechanical properties of AZ91 based alloys”, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 03: 141-149, (2002).
13. Huang, Z., Guo, X., Zhang, Z. and XU, C., “Effects of Si on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91D Magnesium Alloy”, *Journal of Materials Engineering*, 06: 421-424, (2004).
14. Eraslan, Y., Akça, C., “WEAR BEHAVIOR OF AZ91D MAGNESIUM COMPOSITE”, *Sigma J Eng & Nat Sci*, 33(3), 465-471 (2015).
15. Bao, C.M., Dahlborg, U., Adkins, N. and Calvo-Dahlborg, M., “Structural characterisation of Al-Ni powders produced by gas atomisation”, *Journal of Alloys and Compounds*, 481: 199–206 (2009).
16. Zdujic, M., and Uskokovic, D., "Production of atomized metal and alloy powders by the rotating electrode process", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 29.9: 673-683 (1990).
17. Ünal, R., “The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 291–295 (2006).
18. Aydın, M. ve Ünal, R., “Laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1): 69-76 (2007).
19. Sofuoğlu, A., “Investigation of the production parameters of gas atomised aluminium and tin powders: experimental and numerical study”, *International Symposium on Computing in Science & Engineering. Proceedings*, GEDİZ University, Engineering and Architecture Faculty, p. 86. (2013).
20. Akgün, M., Özger, G. ve Ulaş H.B., “Döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(5): 323-328 (2014).
21. Persson, F., Eliasson, A. and Jönsson, P., “Prediction of particle size for water atomised metal powders: parameter study”, *Powder Metallurgy*, 55 (1): 45-53 (2012).
22. Uslan, İ. ve Küçükarslan S., “Kalay tozu üretimine gaz atomizasyonu parametrelerinin etkisinin incelenmesi” *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 25, No (1): 1-8 (2010).

23. Duygulu, Ö., Yücel, O. ve Kaya A.A., “Magnezyum levha alaşımlarının üretimi ve geliştirilmesi”, *itüdergisi/d*, Cilt:9, Sayı:4, 133-138 (2011).
24. Dunkley, J., “Blown to atoms: how to make metal powders”, *Metal Powder Report*, 57 (11): 18-19 (2002).
25. Denigris, J., “Higher quality, better process economics: using continuous particle sizing to improve gas atomization processes”, *Metal Powder Report* 70 (6): 297-299 (2015).
26. Oğuz, Ş., Öztürk, Z., Uzun, E., Kurt, A. ve Boz, M., “Gaz atomizasyonu yöntemi ile kalay tozu üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekline etkisi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elâzığ, 565-568 (2011).
27. Öztürk, F. ve Kaçar, İ., “Magnezyum alaşımları ve kullanım alanlarının incelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 1 Sayı 1: 12-20 (2012).
28. Wang, Q., Chen, W., Ding, W., Zhu, Y., Mabuchi, M., “Effect of Sb on the Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloy”, *Metallurgical And Materials Transactions A*, Volume 32, Issue 13: 787-794 (2001).
29. Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U.T.S., “Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 457: 275-281 (2007).
30. Chen, Y., Liu, H., Ye, R., Liu, G., “Effects of the addition of Ca and Sb on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium”, *Materials Science & Engineering A*, 587: 262-267 (2013).
31. Bobby, A., Ravikumar, K.K., Pillai, U.T.S., Pai, B.C., “Effect of Antimony and Yttrium Addition on the High Temperature Properties of AZ91 Magnesium Alloy”, *6th International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction [CF-6]*, India, 98-102 (2013).
32. Zhou, W., Aung, N.N., Sun, Y., “Effect of antimony, bismuth and calcium addition on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91 magnesium alloy”, *Corrosion Science*, Volume 51, Issue 2: 403-408 (2009).
33. Çetin, T., “Gaz Atomizasyon Yöntemiyle Am60 Tozu Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Karabük 35-41 (2019).
34. Akkaş, M., “Gaz Atomizasyon Yöntemi İle Az91 Tozu Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Karabük 27-38 (2018).
35. Ünlü, B.S., Kurgan, N., Yılmaz, S.S., “Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri”, *Mühendis ve Makine*, 50(588): 11-12 (2008).

36. Boz, M., Kurt, A., "Toz Metal Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Performansı Üzerine Çinkonun Etkisi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 21, No 1, 115-121, (2006).
37. Somunkıran, İ, " Kobalt esaslı alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretimi, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması " Doktora Tezi *Fırat Üniversitesi*, Elâzığ, 27-34 (2006).
38. Akra, K., "The Production Of AZ31 Alloys By Gas Atomisation Method And Its Characteristics", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Karabük 23-25 (2019).
39. Kaya, M., Orhan, N., Kurt, B., "Gözenekli NiTi Şha'ın Toz Metalurjisi İle Üretimi Ve Ön Isıtma Sıcaklığının Gözenek Oluşumu Üzerindeki Etkisi", *Doğu Anadolu Bölgesi Çalışmaları*, Cilt 1 Sayı 1: 154-158 (2008).
40. Dawes, J., Bowerman, R., Ross, T., "Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain", *Johnson Matthey Technology Review*, Volume 59, Number 3: 243-256 (2015).
41. Newkirk, J.W. and Kosher, R.A., Designing with Powder Metallurgy Alloys, *in Handbook of Mechanical Alloy Design*, Eds. Totten, G.E., Xie, L. and Funatani, K.M., Dekker, New York (2004)
42. Sarıtaş, S., and Doğan, C., Metal powder production by centrifugal atomization, *Int. J. Powder Metallurgy*, 30, 419 – 427 (1994)
43. Gökmeşe, H. and Bostan B., "Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B₄C composite by mechanochemical method." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 0954408916629106, (2016)
44. Ersümer, A., "Toz Metalürjisi", *İ.T.Ü. Makine Fakültesi*, İstanbul (1970).
İnternet: Toz Üretimi http://mf.dumlupinar.edu.tr/~runal/toz/tozuretimi/powder_product.html, (2008/
45. Demirkesen, E., "Kompozit Malzemeler Ders Notları", *İstanbul Teknik Üniversitesi* (2003).
46. Sarıtaş, S., Türker M., Durlu, N., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, Ankara, (2007).
47. Clyne, T.W., Metal Matrix Composites: Matrices and Processing, in Encyclopaedia of Materials: Science and Technology, Ed. *Mortensen, A., Elsevier* 785-801 (2001)
48. Yıldız, E.S., "Gaz Atomizasyonu İle Metal Tozu Üretiminde Nozul Geometrisinin Toz Boyutuna Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 5-14 (2007)

49. İnternet: ÜNAL, R., “Kişisel web sayfası”, https://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html.
50. German, R.M., “*Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation*”, USA 567-572 (1994).
51. Sarıtaş, S., *Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı*, MMO, 2. Baskı, I.Cilt: 421-427 (1994). Upadhyaya G. S., “Powder Metallurgy Technology”, *Cambridge Ambridge International Science Publishing*, Hindistan, 31 (2002).
52. Koch, C.C., “Milling of brittle and ductile materials”. In ASM Handbook, *ASM International Publishers*, 53 – 66 (1998).
53. Kurt, A., “Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1992).
54. SubTech, Graphite Manufacturing Process, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite_manufacturing_process, (2016).
55. Yandouzi, M., Böttger, A.J., Hendrikx, R.W.A., Brochu, M., Richer, P., Charest, A. ve Jodoin, B., “Microstructure and Mechanical Properties of B4C Reinforced Al-Based Matrix Composite Coatings Deposited by CGDS and PGDS processes”, *Surface & Coatings Technology*, 205:2234–2246, Kanada (2010).
56. Ekşi, A. ve Kurt, A.O., “Metal ve seramik tozlarının bilgisayar kontrollü tek eksenli kalıpta preslenmesi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, ODTÜ*, Ankara, 557-563 (1999).
57. Bahçeci, E., “Al matrisli α -Si₃N₄ takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-20 (2006).
58. Matik, U., “Akımsız nikel kaplamalarda ısı işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50 (2010).
59. Ünlü, M. D., “SiC Esaslı Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu”, (Doktora tezi) *Istanbul Technical University* (2014).
60. German R.M., “Liquid Phase Sintering”, *Plenum Press*, New York, 1-3 (1985).
61. Suk-Joong L. and Kang, “Sintering Densification, Grain Growth and Microstructure”, *Keyword Group*, İngiltere, 1-4 (2005).

62. Cho, K., Sano, T., Doherty, K., Yen, C., Gazonas, G., Montgomery, J., Moy, P., Davis, B. And DeLorne, R., Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles, *Army Research Laboratory* (ARL), (2009)
63. Deng, K.K., Li, J.C., Nie, K.B., Wang, X.J., Fan, J.F. “High temperature damping behavior of as-deformed Mg matrix influenced by micron and submicron SiCp”, *Mater. Sci. Eng. A* 624, 62e70 (2015).
64. Mordike, B.L. and Luka, P., “Chapter 3-Physical metallurgy, in: Magnesium Technology”, *Springer*, 63 (2006).
65. Czerwinski, F. “Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications”, *Corros. Sci.* 86, 1e16 (2014).
66. Yıldırım, M., and Özyürek, D., "The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys." *Materials & Design* 51, 767-774 (2013).
67. Neite, G., Kubota, K., Higashi, K. and Hehmann, F., “Chapter 4-Magnesium-Based alloys, in: R.W.” Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer (Eds.), *Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, vol. 8, pp. 113e212 (1996).
68. Qian, M. and Das, A., *Scripta Mater.*, 54, 881 (2006).
69. Vinotha, D., et al. "Grain refining mechanisms in magnesium alloys—An overview." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62.6, 521-532 (2009).
70. StJohn, D.H., Qian, M., Easton, M.A., Cao, P. and Hildebrand, Z., *Metall. Mater. Trans. A*, 36A, 1669 (2005).
71. Kulekci, M. K., “Magnesium and its alloys applications in automotive industry”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 851-865 (2008).
72. Colombié, M., “Chapitre 13-Magnésium et alliages de magnésium”. *Matériaux Métalliques*, Dunod, Paris, 679-726 (2000).
73. Cizek, L., Greger, M., Pawlica, L., Dobrzanski, L.A. and Tanski, T., “Study of selected properties of magnesium alloy AZ91 after heat treatment and forming”. *J. Mater. Process. Technol.*, 157-158, 466-471 (2004).
74. Mordike, B. L., Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, *Materials Science and Engineering*, A 302, 37-45 (2001).
75. ASM Handbook, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, 2, *ASM International*, Materials Park, USA (1990).

76. Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai, J. and Dias, G., "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials", *Biomaterials*, 27, 9, 1728-1734 (2006).
77. Akdoğan, E. A., "Magnezyum ve alaşımları". www.yildiz.edu.tr, Erişim tarihi: 17.08.2016 (2008).
78. Eliezer, D., Aghion, E. and Sam Froes, F.H., "Magnesium science, technology and applications." *Advanced Performance Materials* 5.3, 201-212 (1998).
79. Akdoğan, E. A., "Korozyon ve Korozyondan Korunma", www.yildiz.edu.tr, Erişim Tarihi: 21.08.2016 (2008).
80. Barber, L.P., "Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys", Yüksek Lisans Tezi, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 10-46 (2004).
81. Erçayan Y., İrizalp S. G. Ve Saklakoğlu N., A380 "Alaşımında Yarı-Katı Şekillendirmenin Kompozit Yapılara Etkisinin İncelenmesi". *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir (2011).
82. ASM Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", 2, ASM International, *Materials Park*, USA (1990).
83. Tzamtzis, S., "Solidification Behaviour and Mechanical Properties of Cast Mg-alloys and Al-based Particulate Metal Matrix Composites Under Intensive Shearing", Doktora Tezi, Brunel University, *Brunel Centre for Advanced Solidification Technology* (2011).
84. Dahle, A.K., Lee, Y.C., Nave, M.D., Schaffer, P.L. and St.John, D.H., "Development of as the cast microstructure in magnesium-aluminium alloys", *Journal of Light Metals*, 1, 61-72 (2001).
85. Baram, J., "Pressure Characteristics at The Pour- Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization", *Materials Science And Engineering*, 98: 65-69 (1988).
86. Friedrich H.E., Mordike B.L. Magnesium Technology: Metallurgy, Design, Data, Applications, *Springer Science & Business Media* (2006).
87. German, R. M. "Sintering theory and practice. *Solar-Terrestrial Physics* (Solnechno-zemnaya fizika)", 568 (1996).
88. Matei, G., Matei, D., Moraru, V., Studies on the metal and alloys atomization methods, *I. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 67-89 (1996).
89. Turan, H., "Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara (1993).

ÖZGEÇMİŞ

Atakan Oğuz OCAK 1989 yılında Samsun’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sakarya İlköğretim Okulu’nda tamamladı. 2007 yılında Samsun Fen Lisesi’nden mezun oldu. 2014 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2015 yılında başladığı Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Yüksek Lisans Eğitimi’ne halen devam etmektedir.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Adres: Karabük Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
İmalat Mühendisliği Bölümü C06 No’lu Oda
Merkez/Karabük

E- mail: aocak@karabuk.edu.tr