

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMINA FARKLI
ORANLARDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN
İLAVESİ İLE UYGULANAN ISIL İŞLEMİN
MİKROYAPI VE SERTLİK ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

Ayşegül ENGİN

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMINA FARKLI
ORANLARDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN İLAVESİ İLE UYGULANAN
ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ayşegül ENGİN

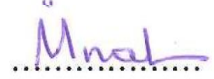
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2013**

Ayşegül ENGİN tarafından hazırlanan “AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMINA FARKLI ORANLARDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN İLAVESİ İLE UYGULANAN ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜNAL

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

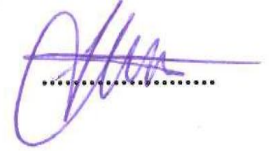

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/06/2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)


.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)


.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜNAL (KBÜ)

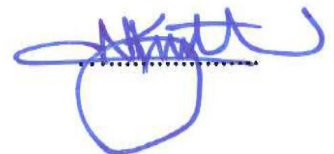

.....

.../.../2013

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

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

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.”

Ayşegül ENGİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMINA FARKLI
ORANLARDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN İLAVESİ İLE UYGULANAN
ISIL İŞLEMİN MİKROYAPI VE SERTLİK ÜZERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ayşegül ENGİN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:
Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜNAL
Haziran 2013, 99 sayfa**

Bu çalışmada; otomotiv, savunma ve havacılık sanayinde parça üretiminde kullanılan AZ91 ileri teknoloji magnezyum alaşımlarının mukavemet ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin zayıf olmasından dolayı; alaşıma ağırlıkça % 0,2, % 0,5 ve % 1 oranlarında Bi, Sb, Sr ve Sn elementleri ilave edilerek 420 °C’de homojenleştirme ve 8, 16, 32 saat yaşlandırma ısıl işlem yöntemleri uygulayarak temel sertlik özellikleri ve mikro yapı çalışmaları yapılmıştır. AZ91 magnezyum alaşımlarının 420 °C homojenleştirme ısıl işlemi ile döküm sonrası düzensiz oluşum ikinci fazlar matris içinde çözülmüş ve yapı homojen hale gelmiştir.

8 ile 16 saat yaşlandırma ısığ işlemine maruz bırakılan alaşımlarda ikincil fazların daha iyi bir dağılım gösterdiği, süre fazlaştığıca ikincil fazların kabalaştığı gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Magnezyum, AZ91, mikroyapı, mekanik özellikler, ısığ işlem.

Bilim Kodu : 710.3.011

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AN INVESTIGATION OF EFFECT OF HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS WITH THE ADDITION OF ALLOYING ELEMENTS IN DIFFERENT PROPORTIONS OF AZ91 MAGNESIUM ALLOY

Ayşegül ENGİN

**Karabuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy Education**

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Mehmet ÜNAL

June 2013, 99 pages

In this study, AZ91 magnesium alloy that is used in automotive, defence and aerospace defence industry have been investigated due to its low strength and low formability properties. Hardness properties and microstructure studies of the alloys have been done with added Sn, Bi, Sr, Sb elements in the ranges between 0,2- 0,5- 1,0wt. % after performing heat treatments such as aging process 8h, 16h, 32h and homogenization at 420⁰C.

Secondary phases which were non-uniform after casting were dissolved in the matrix and structure became homogeneous. It was observed that distribution of secondary phases was more homogenous after aging heat treatment and also as increasing duration they were become coarse.

Key Words : Magnesium, AZ91, microstructure, mechanical properties, heat treatment.

Science Code : 710.3.011

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince katkı ve yardımları ile beni yönlendiren, çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜNAL'a ve Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarından dolayı Arş. Gör. Erkan KOÇ'a ve KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi olan değerli dostum Levent ELEN'e teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmalarım esnasında her konuda bana yardım eden ve benim için çok değerli olan İbrahim ERDEM'e teşekkür ederim.

Bu tez Karabük Üniversitesi 11/2-YL-032 no.lu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ile desteklenmiştir, bu vesileyle desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkürlerimi arz ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan saygıdeğer aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	3
2.1. MAGNEZYUM.....	3
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI	7
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	12
2.3.1. Havacılıkta ve Otomotiv Sektöründe Magnezyum	13
2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN Mg ALAŞIMLARINA ETKİLERİ	18
2.4.1. Alüminyum.....	21
2.4.2. Kalay	21
2.4.3. Kurşun	22
2.4.4. Çinko	23
2.4.5. Mangan.....	23
2.4.6. Stronsiyum	24
2.4.7. Toprak Alkali Elementler (RE).....	25

	<u>Sayfa</u>
2.5. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	25
2.5.1. Magnezyum-Alüminyum-Silisyum Alaşimleri	26
2.5.2. Magnezyum-Alüminyum-Toprak Elementi Alaşimleri	26
2.5.3. Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşimleri.....	27
2.5.4. AZ91 Alaşimleri	28
2.5.5. AZ61 Alaşimleri	30
2.5.6. AM60 Alaşimleri	30
BÖLÜM 3	32
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜM YÖNTEMLERİ.....	32
3.1. KUM KALIBA DÖKÜM.....	33
3.2. KOKİL KALIBA DÖKÜM.....	33
3.3. BASINÇLI DÖKÜM.....	34
3.4. YARI KATI DÖKÜM YÖNTEMİ	35
3.5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ERGİTİLMESİ VE DÖKÜMÜ.....	36
3.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ	38
BÖLÜM 4	40
ISIL İŞLEM.....	40
4.1. HOMOJENLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ.....	40
4.2. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ.....	41
4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ	44
BÖLÜM 5	48
DENEYSEL SONUÇLAR.....	48
5.1. ATMOSFER KONTROLLÜ ERGİTME ÜNİTESİ	48
5.2. ERGİTME VE ALAŞIMLAMA PRATİĞİ.....	49
5.3. KALIP UYGULAMASI.....	50
5.4. MALZEME.....	51
5.5. ISIL İŞLEM UYGULAMASI.....	52
5.6. MİKROYAPI VE SERTLİK ÇALIŞMALARI.....	53

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	55
6.1. MİKROYAPI SONUÇLARI	55
6.1.1. AZ91 Alaşımı	55
6.1.1.1. Isıl İşlem Öncesi	55
6.1.1.2. Isıl İşlem Sonrası	56
6.1.2. AZ91 + Bi Alaşımı.....	58
6.1.2.1. Isıl İşlem Öncesi	58
6.1.2.2. Isıl İşlem Sonrası	59
6.1.3. AZ91 + Sb Alaşımı	65
6.1.3.1. Isıl İşlem Öncesi	65
6.1.3.2. Isıl İşlem Sonrası	67
6.1.4. AZ91 + Sr Alaşımı	72
6.1.4.1. Isıl İşlem Öncesi	72
6.1.4.2. Isıl İşlem Sonrası	73
6.1.5. AZ91 + Sn Alaşımı	79
6.1.5.1. Isıl İşlem Öncesi	79
6.1.5.2. Isıl İşlem Sonrası	81
6.2. SERTLİK DENEY SONUÇLARI	86
6.2.1. AZ91 + Bi Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları.....	86
6.2.2. AZ91 + Sb Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları	87
6.2.3. AZ91 + Sr Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları.....	88
6.2.4. AZ91 + Sn Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları	89
BÖLÜM 7	91
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	91
7.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	91
7.2. SERTLİK DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	92
BÖLÜM 8	93
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Magnezyum üretimi yapan ülkeler ve oranları	5
Şekil 2.2. Yıllara göre ABD ve Avrupa'da magnezyum kullanımı	6
Şekil 2.3. 2001 yılında Avrupa'da Mg' un kullanım alanları.....	7
Şekil 2.4. Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki.....	15
Şekil 2.5. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar	16
Şekil 2.6. Mg alaşımı döküm parçaları	16
Şekil 2.7. AZ91 alaşımı döküm parçaları.....	17
Şekil 2.8. WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu	17
Şekil 2.9. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları.....	18
Şekil 2.10. Elementlerin uygun atomik boyutları	20
Şekil 2.11. Mg-Al denge diyagramı.....	21
Şekil 2.12. Mg-Sn denge diyagramı	22
Şekil 2.13. Mg-Pb denge diyagramı	22
Şekil 2.14. Mg-Zn denge diyagramı	23
Şekil 2.15. Mg-Mn denge diyagramı	24
Şekil 2.16. Mg-Sr denge diyagramı.....	24
Şekil 2.17. Si'li Mg alaşımının mikroyapısı	26
Şekil 2.18. Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirlik alaşımları	27
Şekil 2.19. AZ91 alaşımının mikroyapısı	29
Şekil 2.20. AZ91 alaşımının mikroyapıda tane görünüşü.....	30
Şekil 3.1. Mg alaşımları basınçlı döküm makinesi	34
Şekil 3.2. Yarı-katı sıcaklık ve durumu.....	35
Şekil 3.3. Yarı-katı döküm yöntemi.....	35
Şekil 3.4. Kullanılan gaz karışımlarına göre çelik potanın durumu	37
Şekil 3.5. Mg alaşımı dökümlerinde gaz kullanımı	37
Şekil 3.6. AZ91'in basınçlı ve kokil dökümünün gerilim-uzama diyagramı	39
Şekil 3.7. Mg alaşımlarının gerilim-uzama eğrileri	39
Şekil 4.1. Çözündürme ve yaşlandırma aşamaları	42

Sayfa

Şekil 4.2. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı	43
Şekil 5.1. Deneyleerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi	48
Şekil 5.2. Ergitme işleminde kullanılan çelik pota resmi.....	49
Şekil 5.3. Isıl işlem fırını	50
Şekil 5.4. Kalıp ısıtma fırını kesit resmi	51
Şekil 5.5. Metal kalıp kesit resmi	51
Şekil 5.6. Mikro yapı ve sertlik numunesi	53
Şekil 6.1. AZ91 alaşımının mikroyapı görüntüleri.....	55
Şekil 6.2. AZ91 alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi	56
Şekil 6.3. Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının mikroyapı görüntüleri.....	57
Şekil 6.4. Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının homojenleştirme görüntüsü.....	57
Şekil 6.5. AZ91 + Bi Alaşımının mikroyapı görüntüleri.....	58
Şekil 6.6. AZ91 + Bi alaşımının SEM görüntüleri	59
Şekil 6.7. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Bi alaşımının mikroyapısı	60
Şekil 6.8. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Bi alaşımının SEM görüntüsü.....	61
Şekil 6.9. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,5 Bi alaşımının mikroyapısı.....	62
Şekil 6.10. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Bi alaşımının mikroyapısı.....	63
Şekil 6.11. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Bi alaşımının SEM görüntüsü.....	63
Şekil 6.12. AZ91 + Sb alaşımının mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 6.13. AZ91 + Sb alaşımının SEM görüntüleri.....	66
Şekil 6.14. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sb alaşımının mikroyapısı	67
Şekil 6.15. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sb alaşımının SEM görüntüleri.....	68
Şekil 6.16. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,5 Sb alaşımının mikroyapısı	69
Şekil 6.17. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sb alaşımının mikroyapısı	70
Şekil 6.18. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sb alaşımının SEM görüntüleri.....	70
Şekil 6.19. AZ91 + Sr alaşımının mikroyapı görüntüleri	72
Şekil 6.20. AZ91 + Sr alaşımının SEM görüntüleri	73
Şekil 6.21. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sr alaşımının mikroyapısı.....	74
Şekil 6.22. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sr alaşımının SEM görüntüleri	75
Şekil 6.23. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,5 Sr alaşımının mikroyapısı.....	76
Şekil 6.24. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sr alaşımının mikroyapısı.....	77

Sayfa

Şekil 6.25. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sr alaşımının SEM görüntüleri	77
Şekil 6.26. AZ91 + Sn alaşımının mikroyapı görüntüleri.....	79
Şekil 6.27. AZ91 + Sn alaşımının SEM görüntüleri.....	80
Şekil 6.28. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sn alaşımının mikroyapısı	81
Şekil 6.29. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Sn alaşımının SEM görüntüleri.....	82
Şekil 6.30. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,5 Sn alaşımının mikroyapısı	83
Şekil 6.31. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sn alaşımının mikroyapısı	84
Şekil 6.32. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Sn alaşımının SEM görüntüleri.....	84
Şekil 6.33. AZ91 + Bi alaşımı sertlik değişimleri	86
Şekil 6.34. AZ91 + Sb alaşımı sertlik değişimleri.....	87
Şekil 6.35. AZ91 + Sr alaşımı sertlik değişimleri	88
Şekil 6.35. AZ91 + Sn alaşımı sertlik değişimleri.....	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Saf magnezyumun fiziksel özellikleri.....	3
Çizelge 2.2. Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 2.3. Alaşım elementleri ve kısaltmaları.....	7
Çizelge 2.4. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri	9
Çizelge 2.5. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımları	10
Çizelge 2.6. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımlarının mekanik özellikleri	10
Çizelge 2.7. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum alaşımlarının özellikleri	14
Çizelge 2.8. Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar ve çözünebilirlikleri.....	19
Çizelge 2.9. Katı fazlar, sembolleri ve ergime dereceleri	28
Çizelge 2.10. Magnezyuma ilave edilen bazı elementlerin etkileri	31
Çizelge 3.1. Mg alaşımlarının oda sıcaklığında mekanik özellikleri.....	38
Çizelge 3.2. Mg alaşımlarının oda sıcaklığında fiziksel özellikleri.....	38
Çizelge 4.1. Al: %0,6; Zn: %0,3; Mn: %0,35 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri.....	45
Çizelge 4.2. Al: %8,5 ; Zn: %0,4 ; Mn: %0,25 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri	45
Çizelge 5.1. AZ91 alaşımına deneysel çalışmalarda ilave edilen alaşım elementleri ve % miktarları.....	52
Çizelge 5.2. Deney parametreleri ve testleri	54
Çizelge 6.1. Deneyleerde kullanılan alaşımların sertlik değerleri.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ce	: Seryum
Ln	: Lantanyum
Nd	: Neodmiyum
RE	: Toprak Alkali Elementleri
SF ₆	: Sülfür hexaflorür
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Zn	: Çinko
Sr	: Stronsiyum
Th	: Toryum
Si	: Silisyum
Pb	: Kurşun
Cd	: Kadmiyum
Bi	: Bizmut
Sb	: Antimuan
Sn	: Kalay

KISALTMALAR

ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu
DIN	: Alman Norm Enstitüsü
HFC	: Hidroflorokarbon
HSP	: Hegzagonal sıkı paket
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde çevrenin korunması ve enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanılması bağlamında başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok ticari firma yakıt tüketiminde zorunlu kısıtlamalara gitmektedir. Bu amaçla tüm dünya da birçok AR-GE (Araştırma Geliştirme) çalışmaları yapılmaktadır. Bu amaçla araç lastiklerinde sürtünmenin azaltılması, ağırlıkta azalma, motor ve transmisyon verimliliğinin artırılması, araç ön alanının küçültülmesi ve aerodinamik tasarım gibi yaklaşımlarla çalışılmaktadır. Örneğin bunlardan en önemlisi olan araç ağırlığında yaklaşık 100 kg'lık bir azalma ile 100 km'de 0,5 litre bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır [1,2]. Ağırlıktan 40 kg'lık azalma, atmosfere verilen eksoz gazlarında da azalma sağlamaktadır [2]. Bu bağlamda Avrupa Birliği ülkeleri önümüzdeki yüzyılda motorlu araçlarda yakıt tüketiminde 3 litre/100km hedefine ulaşmak için karar almışlardır. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin mutlaka hafif fakat aynı zamanda güvenilir malzeme kullanması zorunludur. Bu kapsamda özellikle otomobil üretiminde ağırlıktan azalma üretici firmaların en önemli hedefi haline gelmiştir [1]. Otomotiv endüstrisindeki Mg kullanımındaki artış, geçen 10 yıl içerisinde her yıl %15 olarak gerçekleşmiştir. Bu artışın önümüzdeki 10 yıl içerisinde %12'lik oranla artmaya devam edeceği beklenmektedir [3,4].

Ağırlığın düşürülmesi kadar önemli olan geri dönüşebilirlik dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmiştir. Günümüzde konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde Magnezyum (Mg) en hafif olanıdır. Ağırlık olarak Mg, Alüminyum (Al)'dan %36, Demir (Fe) ve çelikten %78 daha hafiftir [5]. Avrupa Komisyonu Avrupa otomobillerinde kullanılacak malzemelerin 2007 yılına kadar %85, 2015 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzemelerden üretilme hedefleri

getirirken, Japonya'da yeni otomobillerde 2007 yılına kadar %90, 2015 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir. Mg bugün Japon taşıtlarında çok hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde de otomobil üretiminde Mg kullanımı artarak gelişmektedir. Bu konudaki gelişmeler Alman otomobilleri için de geçerlidir [1].

Yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Ayrıca Mg, mühendislik plastiklerine göre çok daha rijit ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir [1,3,5].

Mg ve Mg alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra, iyi süneklik, dayanım ve iyi korozyon direncine sahip demir dışı metaldir. Ancak, kristal yapısının hegzagonal sıkı paket (HSP) olmasından kaynaklanan şekillenebilirlik ve ergitme sırasında yanma gibi döküm problemleri nedeni ile üzerinde Al kadar çalışmalar yapılamamıştır. Ancak daha önce belirtildiği üzere ekolojik denge, yakıt tasarrufu vb. konular son 10 yılda hızla gündeme geldiğinden, Mg kullanımı üzerinde daha fazla yoğunlaşma göze çarpmaktadır. Alaşımlandırma veya farklı döküm yöntemleri kullanılarak göreceli olarak şekillenebilirlik geliştirilebilmektedir [6].

Mağnezyum alaşımları çekme, akma ve çarpma dayanımlarındaki kayda değer mekanik özellikler sebebiyle daha fazla ilgi odağı oluşturmaktadır. AZ91 alaşımı ile ilgili literatürde araştırma ve bilgi bulunurken AM60 alaşımının geliştirilmesi ve soğuma hızları ile ilgili literatür de çok az bilgi bulunmaktadır.

Dolayısıyla bu çalışmanın ana hedefi, AZ91 Mg alaşımlarına element ilavesi (Bi, Sb, Sr ve Sn) ve ısıl işlem şartlarına göre mekanik özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

2.1. MAGNEZYUM

Magnezyum (Mg) yapısal uygulamalarda kullanılabilir en hafif metaldir [7]. Düşük yoğunluğundan kaynaklanan düşük eylemsizliği, hızlı hareket eden parçalar için bir avantajdır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir [1]. Element ilk olarak Sir Humphrey Davey tarafından 1808 yılında keşfedilmiştir. Mg'nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir [7,8]. Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2'de verilmiştir.

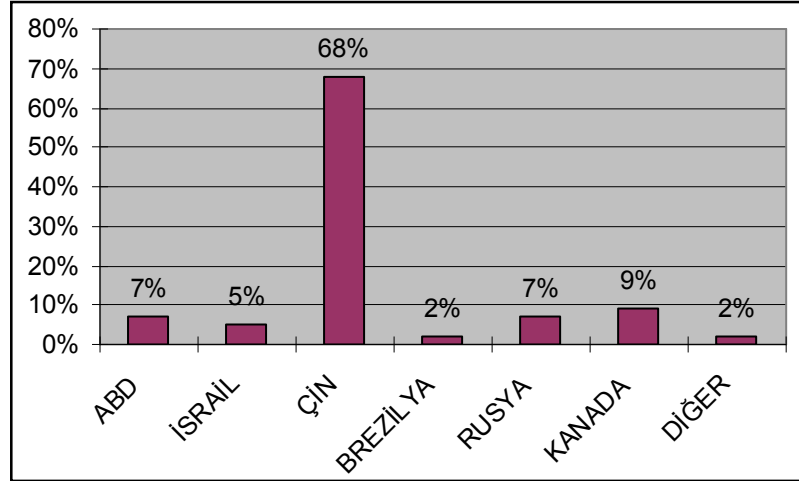
Çizelge 2.1. Saf magnezyumun fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Ergime Noktası (°C)	650 ± 2
Kaynama Noktası (°C)	1107 ± 10
Ergime Gizli Isısı (MJ/kg)	0,37
Yanma Isısı (MJ/kg)	25,1
Elektriksel Direnci 20°C'de ($\mu\Omega$ cm)	4,45
Isıl İletkenliği 25°C'de (W/(kg K))	155
Isıl Genleşme Katsayısı (Lineer) 20°C'de	$25,2 * 10^{-6} K^{-1}$
Yoğunluk (g/cm^3)	
20°C'de	1,738
650°C'de (katı)	1,65
650°C'de (sıvı)	1,58
Katılaşma Sırasında Hacimsel Değişim (%)	4,2
Soğuma Sırasında Hacimsel Değişim (650–20°C) (%)	5

Çizelge 2.2. Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özellikleri.

Özellik (20°C)	Magnezyum	Alüminyum
Atom numarası	12	13
Atom ağırlığı	24,3	26,98
Kafes tipi	HSP	Y K
Ergime noktası	650 °C	659 °C
Kaynama noktası	1103 ± 8 °C	2447 °C
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,738	2,699
Elektrik iletkenliği (m/ΩK)	22,2	37,6
Termal iletkenlik (W/m.K)	154	222
Özgül Isı Kapasitesi (J/kg.K)	1047	930
Hacimsel Isı Kapasitesi (J/m ³ .K)	1783	2430
Ort. Isıl Gen. Kat (10 ⁻⁶ m/m.K)	26 (0-100°C)	23,86 (0-10 °C)
Elastisite modülü (10 ³ N/mm ²)	44,5	6,6

Magnezyum; yerkabuğunun %2,7'sinde ve okyanusların %0,13'ünde bulunması sebebiyle Mg elementi yer kabuğunda yaygın olarak bulunan, periyodik tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir [3]. Mg üretiminin büyük bir kısmı, I. Dünya Savaşı'ndan önce fişekçilik sektöründe kullanılmakta idi. I. Dünya Savaşı sırasında güçlü askeri talep nedeniyle fabrikalar Britanya, Kanada ve A.B.D.'ye yayılmıştır [9]. Şekil 2.1'de 2004 yılında Mg üretimi yapan ülkeler ve oranları verilmiştir.



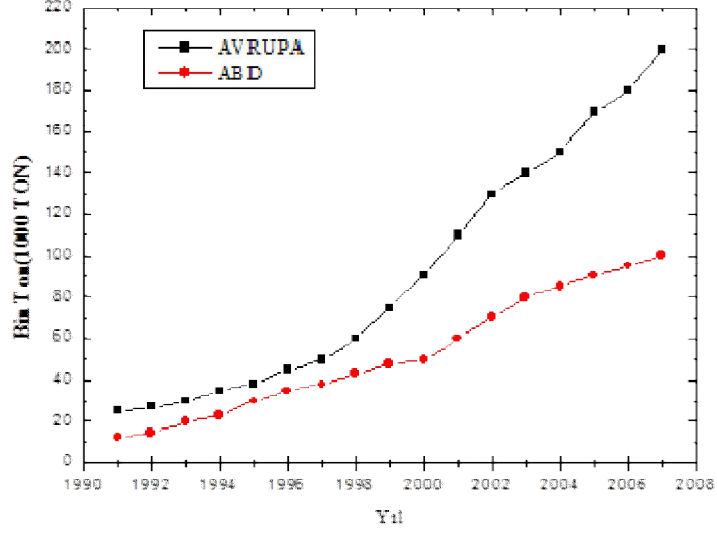
Şekil 2.1. 2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretimi ve oranları [10].

Mg metali magnezit ($MgCO_3$), karnolit ($K_2MgCl_4 \cdot 6H_2O$), veya dolomit $MgCa(CO_3)_2$ cevherlerinden, tuz depozitlerinden, doğal yeraltı ve yapay tuzlu sulardan ya da deniz suyundan üretilir. Mg üretimi ergimiş Magnezyumklorürün ($MgCl_2$) indirgenme prensibine göre elektrolizi, dolomitten kimyasal yollarla çökeltme ve arıtma yöntemleri ile veya doğrudan tuzlu sulardan Magnezyumoksitin (MgO) termal redüksiyonu ile üretimi yapılır [1].

Mg'nin üretildiği başka bir metod ise MgO 'in Silisyum (Si) ile redüksiyonudur. Bu işlemde Ferrosilis katı halde MgO ile reaksiyona girer ve yüksek sıcaklık, düşük basınç koşullarında Mg gaz hale geçer, reaktörün soğutucularında Mg kristalleri yoğunlaşırlar. Bu kristaller ergitilip, ingotlar halinde dökülür. Mg üretimi, düşük enerji maliyetinin olduğu ve/veya çok zengin yatakların bulunduğu bölgelerde yapılmaktadır. En büyük üretim bölgeleri İsrail, Avustralya, Norveç, Kanada, Çin ve Rusya'da bulunmaktadır. Norsk-Hydro dünyadaki en önemli 13 üreticiden biridir. İki önemli yatakta üretim yapmaktadır. Bunlardan biri Norveç ve diğeri Kanada'dır. Bu firmanın birinci Mg üretimi Kanada yatağı ile birlikte yıllık üretimi 80 000 tonu bulmaktadır [1].

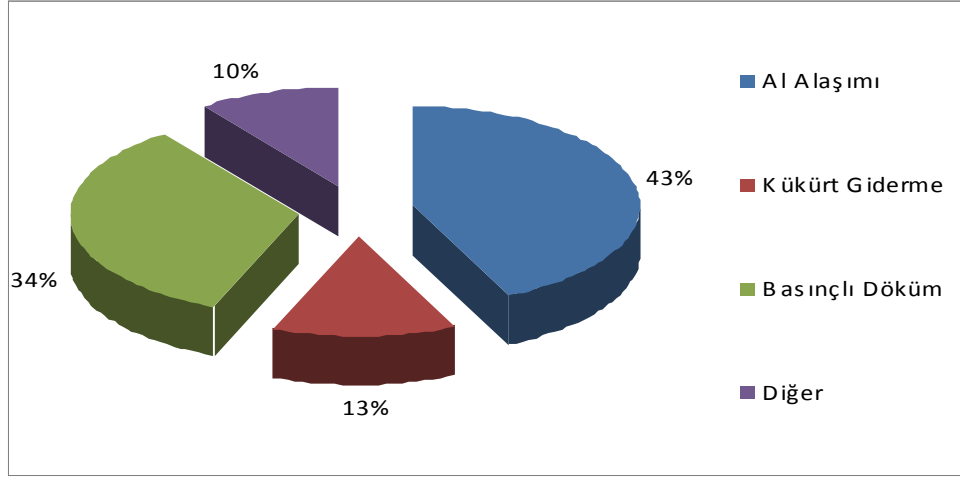
Mg alaşımlarında tane inceltici etkisi ile ilgili 1938 yılındaki önemli buluşlar ve Manganezin (Mn) Mg-Al-Zn alaşımlarının korozyona karşı direncini artırabilecek etkilerinin 1925 yılında keşfedilmesi, Mg'nin yapısal uygulamalarda kullanılmasını

teşvik etmiştir [9]. Şekil 2.2’de 1991-2007 yılları arasında Avrupa ve ABD’de Mg kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. 1991-2007 yılları arasında Avrupa ve ABD’de Mg kullanımı [11].

II. Dünya Savaşı sırasında Mg’ya olan talep yükselmiştir. Yalnızca A.B.D.’de üretim 1943 yılında, 1938 yılındaki üretim rakamının 8 katından biraz yüksek olan 184 000 ton’a ulaşmıştır. Yapısal uygulamalar savaş esnasında askeri amaçlı kullanımlarla, hava taşıtları öncelikli olmak üzere sınırlıydı. Bunun tipik uygulamaları motor parçaları, uçak iskeletleri ve iniş takımlarıdır. II. Dünya Savaşı sürecinde sağlanan Mg üretimi ve tasarımına ilişkin bilgilerdeki artış bunun sivil amaçlı kullanımında da önemli bir potansiyel oluşturmuştur [9]. Şekil 2.3’de Batı ülkelerinin 1997’deki Mg metalinin kullanım alanlarını göstermektedir.



Şekil 2.3. 2001 yılında Avrupa’da Mg’nin kullanım alanları (330 000 ton) [12].

1997 yılında en büyük kullanım alanı 146 150 ton/yıl ile Al-alaşımlandırma, 95 300 ton/yıl ile basınçlı döküm ve 47 950 ton/yıl ile kükürt giderme işlemidir.

2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI

Mg alaşımları ASTM (A275) standard sistemi tarafından belirlenmiştir. Yöntem iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. İki harf, iki en büyük elemanına verilmiş olan harf kısaltması ve rakamlar ise bu alaşımların en yakın tam sayıya yuvarlanmış yüzdeleridir. Çizelge 2.3’de yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir.

Çizelge 2.3. Alaşım elementleri ve kısaltmaları [3,5,6,7,9].

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	Yi	Ca	Zn

Örnek AZ91 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir;

A→ Al'yi yani Mg'den sonra alaşımdaki en fazla elementi ifade eder.

Z→ Zn'yi yani 2.olarak en fazla kullanılan elementi ifade eder.

9→ Alaşımdaki Al oranının yaklaşık 8,6- 9,4 arasında olacağını ifade eder.

1→ Alaşımdaki Zn oranının yaklaşık 0,6- 1,2 arasında olacağını ifade eder.

Magnezyum alaşımları ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94 de göre standartları Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) [9,13].

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

ASTM, EN, DIN, AFNOR standartlarında da havacılık endüstrisi için kullanılan standartlar bulunmasına rağmen son yıllardaki hızlı gelişmeler nedeni ile havacılık endüstrisi üretici firmalarca çeşitli Mg alaşımları geliştirilmiştir [14,15]. Firmalarca geliştirilen bu alaşımların bileşimleri Çizelge 2.3 ve mekanik özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımları (ASTM B80) [14].

Alaşım adı	Alaşım elementleri (%)							
	Zn	RE	Y	Zr	Ag	Cu	Ne	Mg
RZ5	3,5-5	0,8-1,7	-	0,4-1	-	-	-	Kalan
WE43	-	2,4-4,4	3,7-4,3	0,4 min.	-	-	-	Kalan
MSR-B	-	2-3	-	0,4-1	2-3	-	-	Kalan
EQ21	-	1,5-3	-	0,4-1	1,3-1,7	0,05-0,1	-	Kalan
WE54	-	1-2	4,75-5,5	4 min.	-	-	1,5-2	Kalan

Çizelge 2.6. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımlarının mekanik özellikleri [7,14].

Alaşım adı	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama max. (%)	Akma gerilmesi (MPa)	Sertlik (BSD)
RZ5	200	3	135	55-70
EQ21	240	2	175	64-98
ZRE1	140	3	95	50-60
MSR-B (Afnor)	240	2	185	64-98
WE43	220	2	172	68-98
WE54	255	2	185	80-90

RZ5, toprak alkali elementleri Zn ve Zr içeren Mg döküm alaşımlarıdır. Düşük yoğunluk, iyi mekanik özellikleri sebebiyle helikopter vites iletim ve pervane motorlarının dökümlerinde tercih edilen bir alaşımdır. Gelişmiş korozyon özelliklerine sahiptir [15].

WE43, yüksek dayanımlı ve korozyona dayanıklı ve yüksek sıcaklıklarda uzun süre dayanabilme özelliğine sahip Mg bazlı alaşımdır. WE43, uçak motorlarında,

helikopter vites kutularında ve yüksek performans gerektiren araçlarda kullanılmaktadır [15,16].

MSR, en fazla kullanılan Mg alaşımıdır. MSR, yüksek sıcaklık uygulanmalarına dayanıklıdır ve gümüş ile nadir toprak elementleri içerir. Hava taşıtlarının motorlarında ve vites kutularının dökümlerine kullanılmaktadır [15,16].

EQ21, Ag ve RE elementleri içerir. Fakat bileşiminde MSR'den daha az gümüş bulundurmaktadır. EQ21 alaşımları yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Uçak, otomobil ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır [15,16].

Araştırma sonuçları AZ91 alaşımına sırasıyla Si (%1), RE/nadir toprak (%1), ve Ca (%0,2) eklenmesinin sürünme direncini geliştirdiğini göstermektedir. Ancak Si ve RE eklenmesi yeterli miktarda değildir ve bu üç katkı maddesinin eklenmesi sünekliliği düşürmektedir. Diğer bir alaşım olan Mg, %8 Al, %1 Ca alaşımı sürünme direncini kolayca karşılayabilmesine rağmen, bu alaşımın döküm problemleri tatmin edici bir şekilde çözülememiştir. Bu döküm problemine sıcak yırtılma örnek verilebilir [9,15].

1966-1975 yıllarında alaşımlarla ilgili en başarılı gelişme AS41, AS21 ve AS11 alaşımlarının bulunmasıdır. AS41, AZ81 (yaklaşık 30°C)'den daha yüksek bir döküm sıcaklığına sahiptir. Bununla birlikte, AS21 ve AS11 alaşımları daha yüksek sürünme direnci sunabilmesine rağmen, düşük döküm performansı, basınçlı döküm uygulamalarında kullanımını kısıtlamıştır [9,15].

1970'li yılların ilk bölümünde, üç alaşım, ZA124 (%4 Al, %0,4 Mn, %12 Zn), ZA102 (%2 Al, %0,7 Mn, %10 Zn) + %0,3 Ca ve AZ88 (%8 Al, %0,2 Mn, %8 Zn) NL Industries tarafından geliştirilmiştir [15]. ZA124, AS41'in sürünme direncine benzer bir sürünme direnci sunmaktadır. ZA124 alaşımı iyi korozyon direncine ve akışkanlığa sahiptir. Yüksek Zn'li alaşıma az bir miktar Ca eklendiğinde sürünme direncinin önemli oranda geliştirilebildiği bulunmuştur. ZA102 (%0,3 Ca)'nin alaşımının sürünme direnci, AS21 alaşımının sürünme direncine benzer ve ZA124

alaşımının sürünme direncinden daha yüksektir. Bunun ötesinde, bu alaşımlara Ca eklendiğinde, sıcak yırtılma problemleri en aza inmiştir. Geliştirilen diğer bir başarılı alaşım da AM60 alaşımıdır. Bu alaşım AZ91 alaşımının sünekliğinden daha yüksek bir süneklilik sunabilir ve yüksek performanslı araçların jant üretiminde kullanılmaktadır [9,15].

Mg alaşımlarının korozyon direncine ilişkin büyük gelişmeler 1975-1990 yılları arasında olmuştur. Mg alaşım üreticileri impüriteleri çökelten teknolojiler geliştirmişlerdir. Böylece alaşımda bulunan Fe impuritesini 100-200 ppm'den 20 ppm'e kadar düşürerek ticari olarak üretilmesini sağlamışlardır. Bu durum yüksek saflıktaki alaşımların korozyon direncinin 100 kat gelişmesinin, büyük ölçekli ve artan bir şekilde Mg alaşımlarının kullanılmasının esas nedenidir. Bu dönemde geliştirilen yeni alaşım AE42'dir ki, bu oldukça yüksek sıcaklık özelliklerini sunabilen ve sürünme direnci AS21'in sürünme direncini aşan bir alaşımdır [9,15].

Derwent Dünya Patent Endeksi 1963-1996 dönemi magnezyum alaşımı anahtar sözcüğü ile araştırıldığında, 1648 patent arasında 27 adet basınçlı döküm ile ilgili patent vardır [17]. Bu buluşların bir çoğu Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Al, Mg-Al-Si, ve Mg-Zn-Nadir toprak elementleri (RE) üzerine temellendirilmiştir. Dökümdeki gelişmeler yüksek sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında mekanik özellikleri geliştirmek için genellikle Mg ile Al, Zn, Mn, Si, Ca, Seryum (Ce), Yitrium (Yi), Çinko (Zr), Cu, Ni, Gümüş (Ag) vb. ile alaşım haline getirilmiştir. Son zamanlardaki alaşım ile ilgili gelişmelerin birçoğu Mg-Al alaşımına Zn, Ca, Si veya RE eklemek sureti ile değiştirilmesi temellidir [9].

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi de kolay olmamış, alüminyuma göre daha maliyetli olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Devamında düşen maliyetler neticesinde magnezyum da endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır [18].

2.3.1. Havacılıkta ve Otomotiv Sektöründe Magnezyum

Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkar [19].

Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde kullanılan metallerde istenilen temel özellikler; hafiflik, dayanıklılık ve korozyona karşı dirençtir. Ayrıca bazı özel kullanım alanları için metallerin diğer özellikleri de önemlidir. Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde yaygınlıkla kullanılan metaller; Magnezyum, Alüminyum, Titanyum ve Bakır'dır [20].

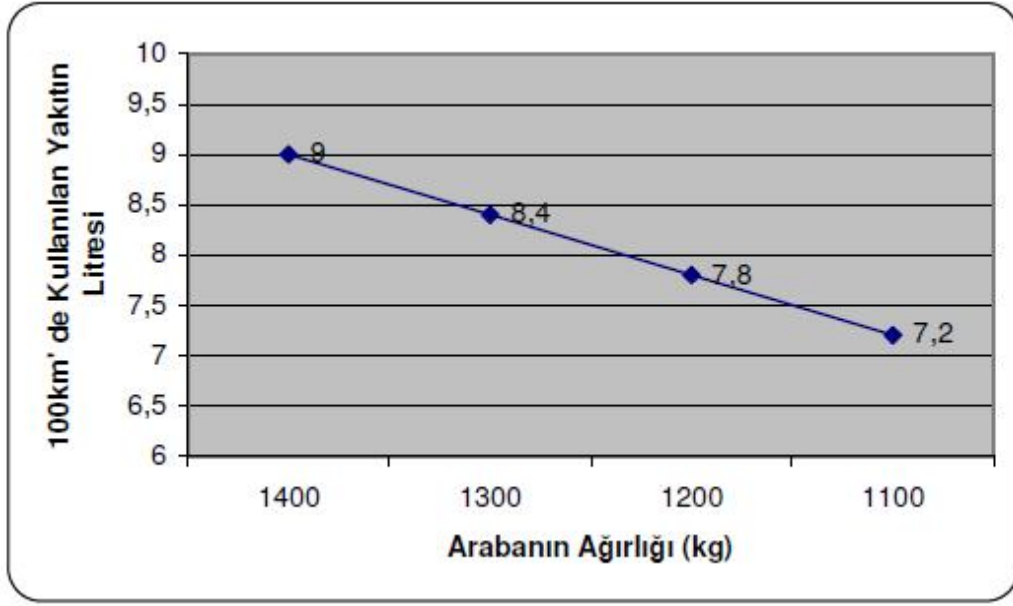
Günümüzde Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi otomotiv sektöründen gelmektedir. Bunun başlıca nedeni, hafif Mg alaşımlarının kullanımı ile araç ağırlığında yapılan azalmanın yakıt ekonomisi sağlaması ve bunun sonucu olarak gaz emisyonlarının da azaltılabilecek olmasıdır. Özellikle otomotivde hafif metalik malzemelere yönelik sadece günümüzün otomobilleri ile ilgili değildir. Güneş enerjisi, elektrik veya hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları ile çalışacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik bugünküne kıyasla çok daha önemli bir gereksinimdir. Önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi 3 litre/100 Km gibi zorlu bir hedeftir ve bunun için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma gerekmektedir [19]. Şekil 2.4'de araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Mg'nin Al ve çelikle karşılaştırıldığında yüksek fiyatlı olmasına rağmen, net şekle yakın döküm parçalar üretildiğinden otomobillerde kullanımı fazladır [16]. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum alaşımlarının özellikleri Çizelge 2.4.'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Otomotiv sektöründe kullanılan Mg alaşımlarının özellikleri [20].

ALAŞIM		AZ91D	AM50A	AM60B
Alüminyum (%)		8,5-9,5	4,5-5,3	5,6-6,4
Manganez (%)		0,17-0,3	0,28-0,50	0,26-0,50
Çinko (Zn) (%)		0,45-0,9	0,20 max	0,20 max
Silikon (%)		0,05 max	0,05max	0,05max
Bakır (%)		0,025 max	0,008max	0,008max
Nikel (%)		0,001 max	0,001max	0,001max
Demir (%)		0,004 max	0,004max	0,004max
Berilyum (%)		0,0005-0,0015	0,0005-0,0015	0,0005-0,0015
Diğer (%)		0,01max	0,01max	0,01max
FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
Yoğunluk ($\text{kg/m}^3 \times 10^3$)		1,81	1,79	1,78
Termal Genleşme Sabiti $\mu\text{m/m}^\circ\text{K}$		25	26	25,625
Isıl İletkenlik ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)		72	62	62
Özgül Isı ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)		1050	1050	1050
Rijitlik Modülü (Kayma ve burulma 10^6 psi)		2,4	-	-
Elastite Modülü (GPa)		45	45	45
Ergime oranı ($^\circ\text{C}$)		470-595	543-620	540-615
Brinell Sertliği (100mm bilya, 500 kgf yük)		75	57	62
Ortam Sıcaklığında	ÇEKME ÖZELLİKLERİ			
	%0,2 Akma Mukavemeti (MPa)	150	120	130
	Kopma Mukavemeti (MPa)	230	220	220
	% Uzama	3	6-10	6-8
	BASMA ÖZELLİKLERİ			
	%0,1 Akma Mukavemeti (MPa)	165	-	130
	Kopma Mukavemeti (MPa)	400	-	-
	KAYMA ÖZELLİKLERİ			
	Kayma Mukavemeti (MPa)	140	-	-
	DARBE ÖZELLİKLERİ			
	1/4" Çentiksiz Charpy (j)	2,2	9,5	6,1
	YORULMA ÖZELLİKLERİ			
	Dönel Eğme Testi (5×10^7 devir)	70	70	70

Mg-Al-Zn (AZ91) alaşımları, çoğunlukla otomobil parçalarının dökümü için kullanılır. Diğer Mg alaşımlarıyla karşılaştırıldığında; AZ91 Mg alaşımı daha iyi döküm, daha iyi dayanım özellikleri göstermektedir.



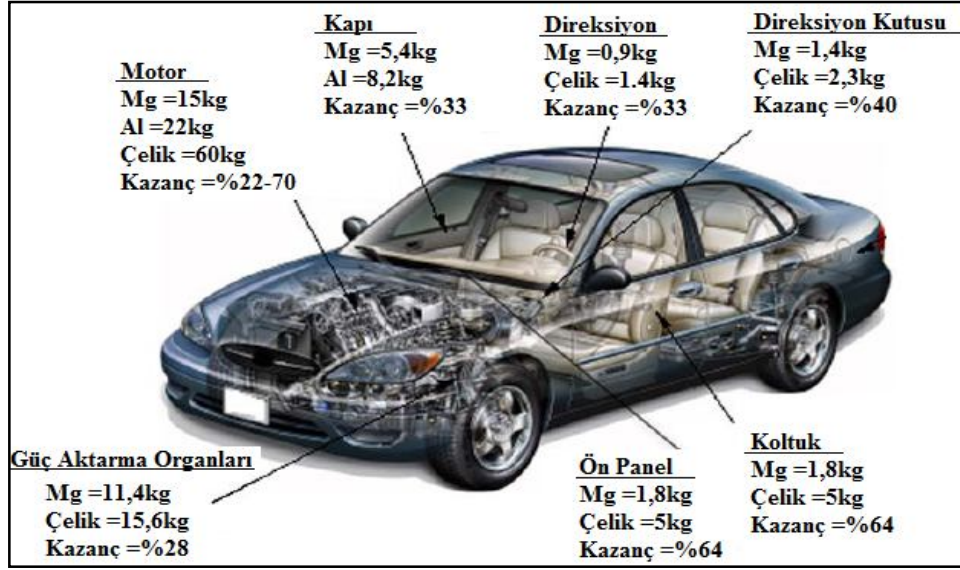
Şekil 2.4. Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki [18,21].

Son yıllarda, Mg'nin otomobil parçalarında kullanılması hızla artmıştır. Otomobillerde kullanılan birçok parça, basınçlı döküm ile Mg'den imal edilmiştir.

Mg'nin otomobil parçalarında kullanımı yaklaşık olarak son 80 yıldadır. 1930 yılında Louse Chevrolet tarafından bir prototip arabada Mg pistonları ve Volkswagen Beetle motorunda ve aktarma organlarında 20 kg'dan fazla Mg kullanılmıştır [19]. Bu süreç zarfında, Mg genellikle sınırlı potansiyele sahip özel bir materyal olarak varsayılmıştır. 1970'lerdeki petrol krizinden beri Mg, otomobil endüstrisinde çok daha önemli bir rol oynamıştır. Şekil 2.5'de otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı gösterilmiştir.

Basınçlı döküm metodu en çok kullanılan üretim metodu olarak göze çarpmaktadır. Yüksek miktarlı talepler düşük maliyetli basınçlı döküm metodu için itici bir kuvvet olmuş ve basınçlı döküm metodu hızla gelişmiştir [16,19].

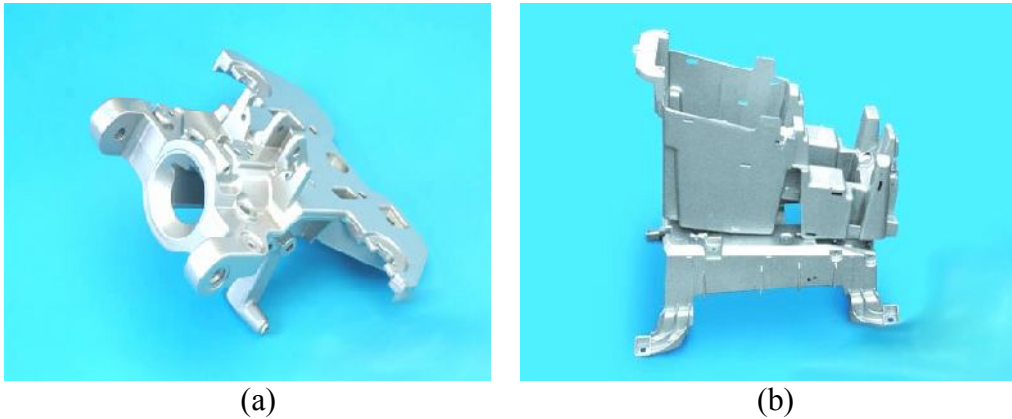
1930'lardan 1965'lere kadar, yalnızca ticari olarak kullanılan alaşımlar Mg-Al-Zn-Mn esaslıdır. Parçaların çoğunluğu AZ91 alaşımından üretilmiştir. Bu alaşım, gerilme kuvvetini biraz düşmesine rağmen, yüksek yumuşaklık ve darbe etki direncini sağlamıştır [9,15].



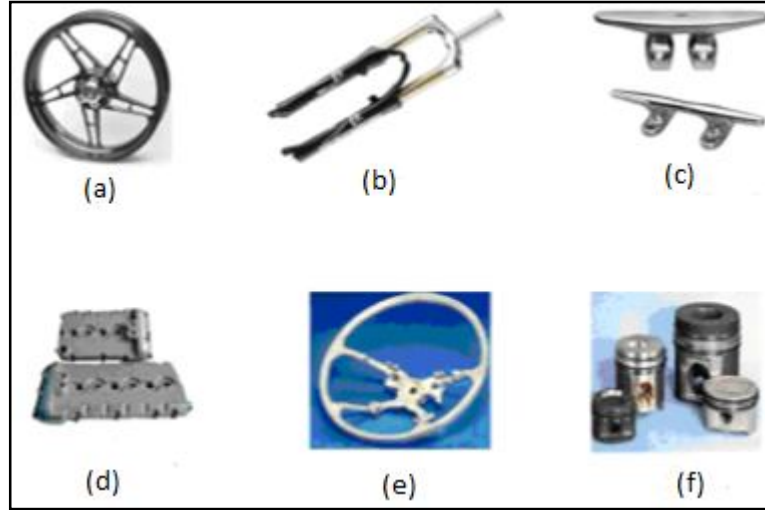
Şekil 2.5 Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar [22,23].

Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar (AM50, AM60) iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler [8]. AS41, AS21 (Mg-Al-Si-Mn) ve AE42 (Mg-Al-Re) alaşımları artan sıklıkla, Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarından daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçaları imalı için kullanılır [9].

Şekil 2.6'da Mg alaşımından üretilmiş döküm parçalar görülmektedir. AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar ve mobil telefonlarda kullanılır [1]. Şekil 2.7'de AZ91 alaşımından üretilmiş döküm parçalar görülmektedir.

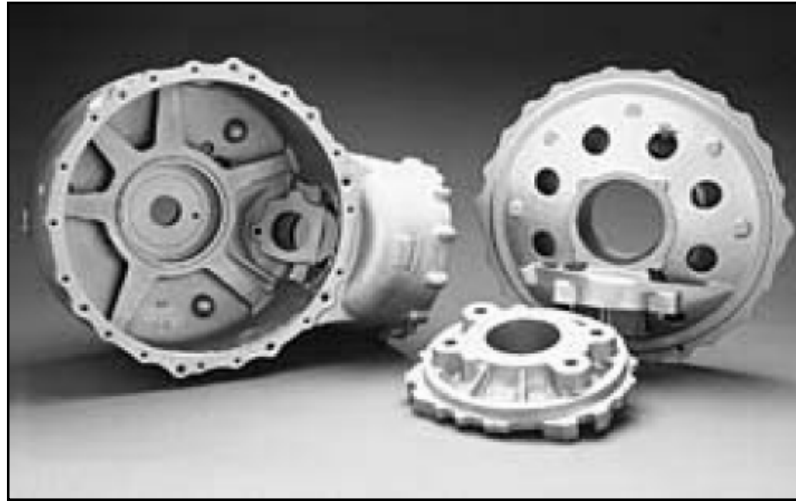


Şekil 2.6. Mg alaşımı döküm parçaları a) Direksiyon kolunu braketi, b) Orta konsol [18,24].



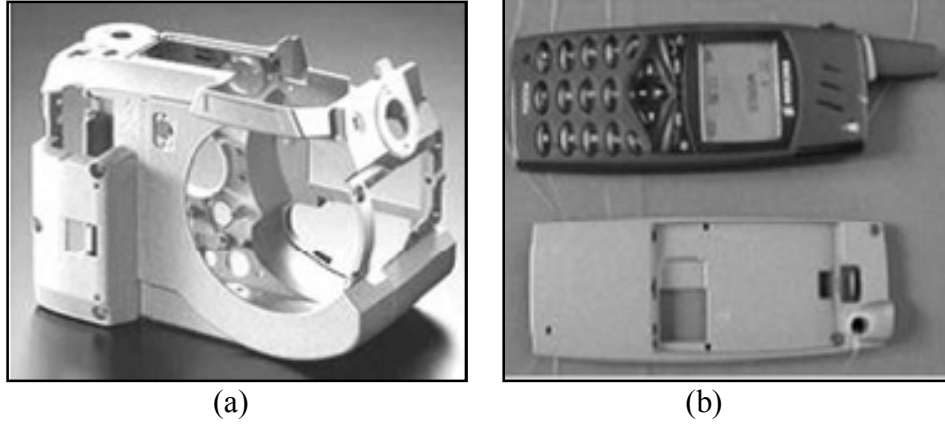
Şekil 2.7. AZ91 alaşımı döküm parçaları a) Tekerlek jantı, b) Bisiklet çatalı, c) Güverte desteği, d) Silindir ana kapağı, e) Direksiyon, f) İçten yanmalı motor pistonları [2].

AE42 alaşımları 200°C 'nin üzerindeki servis koşullarında, transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılır [1]. Şekil 2.8'de WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu görülmektedir.



Şekil 2.8. WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu [15,25].

Süper hafif Mg-Li esaslı alaşımlar bilgisayar elemanı olarak plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir [1,2]. Şekil 2.9'da Li esaslı Mg alaşımından dökülmüş kamera ve cep telefon kutusu görülmektedir.



Şekil 2.9. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları a) kamera kutusu, b) cep telefonu kutusu [2].

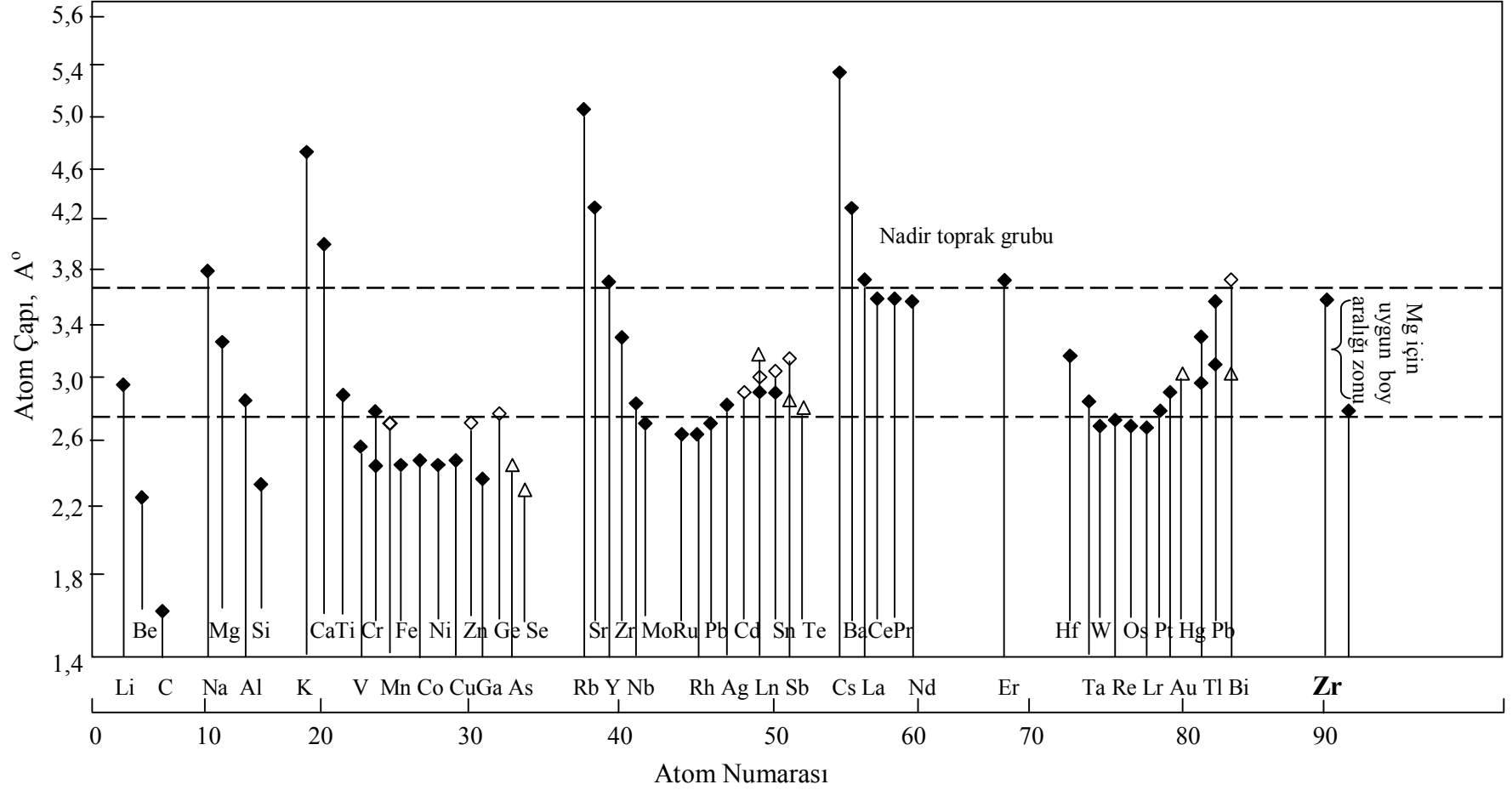
2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ETKİLERİ

Mg'nin özelliklerini geliştirmek için alaşım elementleri katılarak döküm ürünler elde edilmektedir. Mg hegzagonal bir kafes yapısına sahiptir ve sahip olduğu tane çapı da çok fazla sayıda elementle katı çözünebilirliğe müsaade eder. Alaşımlandırılmadığı esas prensip malzemenin dayanım özelliklerinde belirli gelişimler sağlamaktır. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, Mn, RE, Ag, Th, Ce, Zn ve Zr gibi elementler katılarak alaşımlandırılır. Bu elementlerin biri veya birkaçı ile alaşımlandırıldığı zaman alaşımın genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur. Mg alaşımındaki en çok kullanılan alaşım elementi Al'dir [3,9,26].

Mg alaşımaları için katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi iki önemli sertleştirme mekanizmalarıdır. Hume-ruthery kurallarına göre; Eğer çözünen ve çözen atomların atomik çapları arasındaki fark %14-15'i aşarsa, katı çözeltili oluşmayabilir. Ayrıca, katı çözeltili oluşturabilmek için iki elementinde aynı kristal yapıya sahip olması gerekir [9,15]. Çizelge 2.5'de ikili Mg alaşımında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik verileri, Şekil 2.10'da elementlerin uygun atomik boyutları verilmiştir.

Çizelge 2.8. Mg alaşımlarında oluşan intermetalik fazlar ve çözünebilirlikleri [15].

Sistem	Max. Çöz.		Faz	Ergime noktası (°C)	Sistem	Max. Çöz.		Faz	Ergime noktası (°C)
	(% ağı.)	(% at.)				(% ağı.)	(% at.)		
Mg-Al	12,7	11,6	Mg ₁₇ Al ₁₂	402	Mg-Sm	5,8	0,99	Mg ₆₂ Sm	-
Mg-Ca	0,95	0,58	Mg ₂ Ca	714	Mg-Gd	23,5	4,53	Mg ₆ Gd	640
Mg-Sc	25,9	15,9	MgSc	-	Mg-Tb	24,0	4,57	Mg ₂₄ Tb ₅	-
Mg-Mn	2,2	1,0	Mn	1245	Mg-Dy	25,8	4,83	Mg ₂₄ Dy ₅	610
Mg-Zn	8,4	3,3	MgZn	347	Mg-Ho	28,0	5,44	Mg ₂₄ Ho ₅	610
Mg-Ga	8,5	3,1	Mg ₅ Ga	456	Mg-Er	32,7	6,56	Mg ₂₄ Er ₅	620
Mg-Y	12,0	3,6	Mg ₂₄ Y ₅	620	Mg-Tm	31,8	6,26	Mg ₂₄ Tm ₅	645
Mg-Zr	3,6	0,99	Zr	1855	Mg-Yb	3,3	0,48	Mg ₂ Yb	718
Mg-Ag	15,5	4,0	Mg ₃ Ag	492	Mg-Lu	41,0	8,80	Mg ₂₄ Lu ₅	-
Mg-In	53,2	19,4	Mg ₃ Ln	484	Mg-Hg	3,0	0,4	Mg ₃ Hg	508
Mg-Sn	14,85	3,45	Mg ₂ Sn	770	Mg-Tl	60,5	15,4	Mg ₅ Tl ₂	413
Mg-Ce	0,74	0,13	Mg ₁₂ Ce	611	Mg-Pb	41,7	7,75	Mg ₂ Pb	538
Mg-Pr	1,7	0,31	Mg ₁₂ Pr	585	Mg-Bi	8,85	1,12	Mg ₃ Bi ₂	821
Mg-Nd	3,6	0,63	Mg ₄₁ Nd ₅	560	Mg-Th	5,0	0,49	Mg ₂₃ Th ₆	772

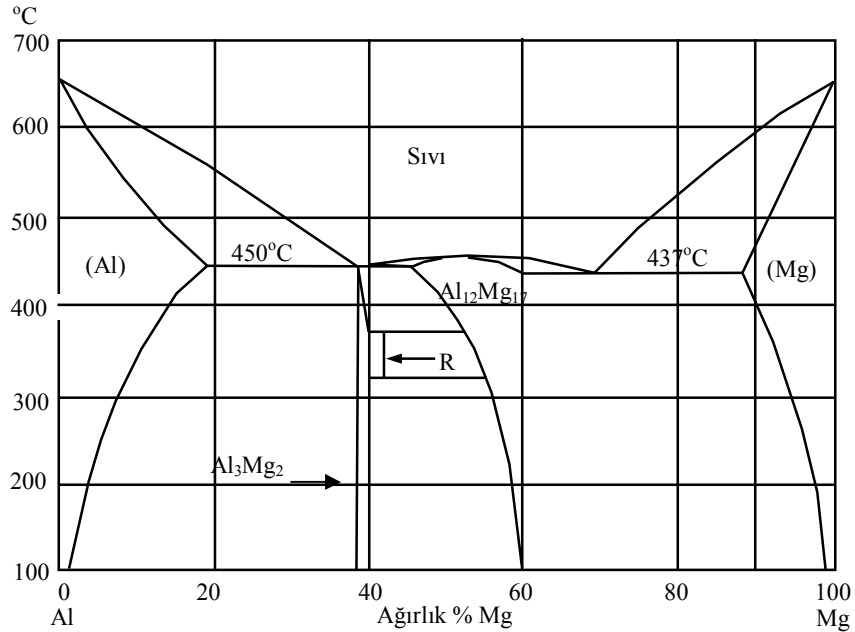


Şekil 2.10. Elementlerin uygun atomik boyutları [9].

Ticari Mg alaşımlarında kullanılan farklı alaşım elementlerinin etkisi kısaca aşağıda belirtilmiştir.

2.4.1. Alüminyum (Al)

Mg esaslı alaşımlarda Al, Mg'nin katı çökelti dayanımını, ergiyin dökülebilirliğini geliştirir ve döküm alaşımlarının mikro gözeneklerini azaltır. Al katkısı alaşımın sertliğini, dayanımını ve katılma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini azaltmaktadır. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalığı düşük sıcaklıklarda ($\leq 120^{\circ}C$) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir. Bununla birlikte, fazla miktarda Al içeren alaşımlar mikro gözeneklere karşı eğilimlidirler [3,9,26,27]. Şekil 2.11'de Mg-Al denge diyagramı görülmektedir.

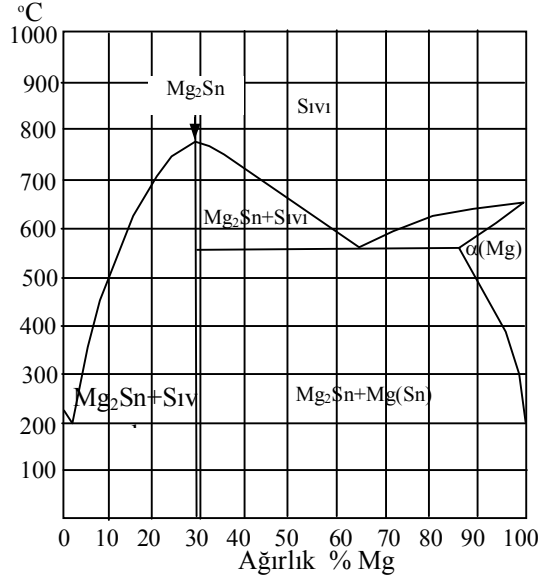


Şekil 2.11. Mg-Al denge diyagramı [28,29].

2.4.2. Kalay (Sn)

Sn, sünek bir element olmakla beraber, Mg'den daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve Mg'den daha az akıcılığı olan bir elementtir [30]. Sn içeren alaşımda Mg_2Sn intermetalik faz oluşumu soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızlarında çubuk

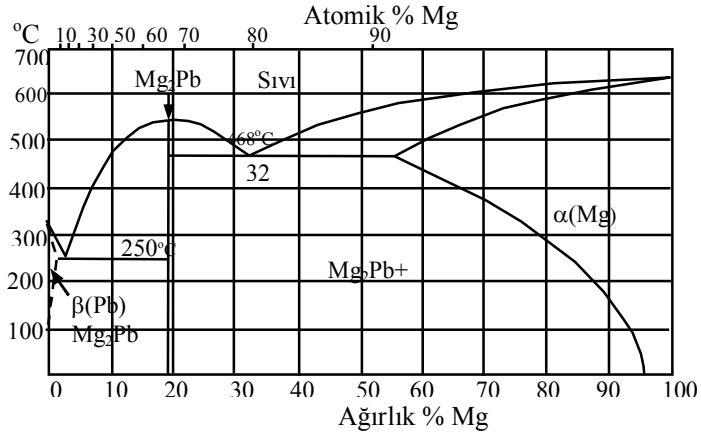
tipi Mg_2Sn partiküllerin gözlenmesi Mg matrisi ile birlikte olur [31]. Şekil 2.12’de Mg-Sn denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.12. Mg-Sn denge diyagramı [29,30].

2.4.3. Kurşun (Pb)

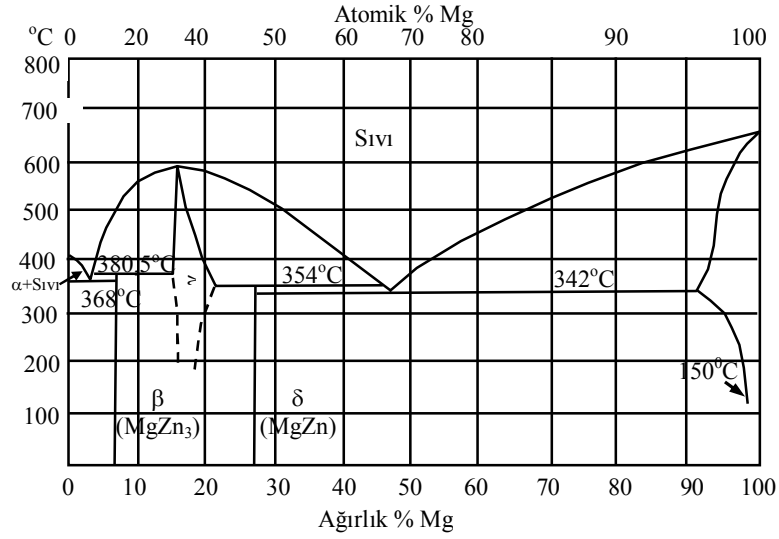
Alaşıma ilave edilen Pb iyi bir çözünürlüğe sahip olduğundan; yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 460⁰C) %40’a kadar Pb çözünmekte ve ayrı faz olarak ortaya çıkmamaktadır. Şekil 2.13’de verilen Mg-Pb denge diyagramı incelendiğinde alaşım sıcaklığı azaldıkça $Mg_2Pb+\alpha$ fazı oluşmaktadır. Pb, iyi bir çözünürlüğe sahip element olduğundan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazını inceltmektedir [32].



Şekil 2.13. Mg-Pb denge diyagramı [29].

2.4.4. Çinko (Zn)

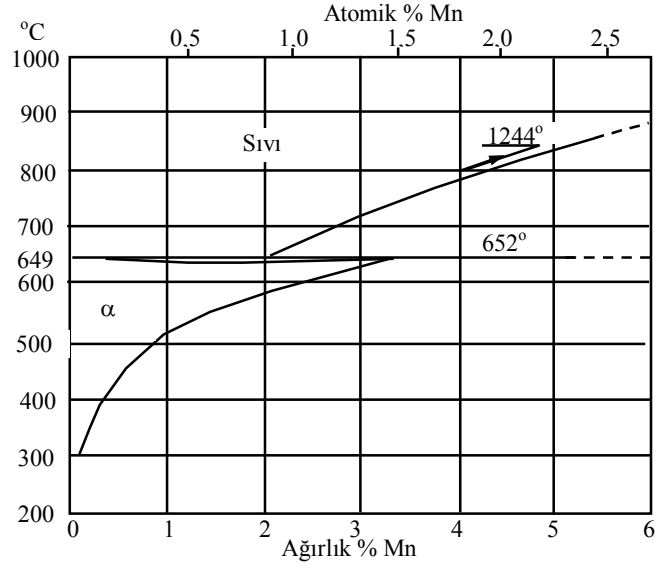
Zn, tane sınırlardaki ötektik miktarını artırarak, alaşımın katılaşma sıcaklığını düşürmektedir. Korozyon özelliklerinde Cu'nun kötü etkisini yok etmek için Zn ilave edilmektedir [3,22,27]. Zn, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında dayanımı ve aynı zamanda ergiyeğin akıcılığını artırmakla birlikte, tane sınırlarına çökmesi ile sıcak yırtılma oluşturduğu için %2 ile sınırlıdır. Malzeme, segregasyonlu bölgenin ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda deforme edildiğinde, tane sınırları boyunca ayrışır [3,9]. Şekil 2.14'da Mg-Zn denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.14. Mg-Zn denge diyagramı [9,27].

2.4.5. Mangan (Mn)

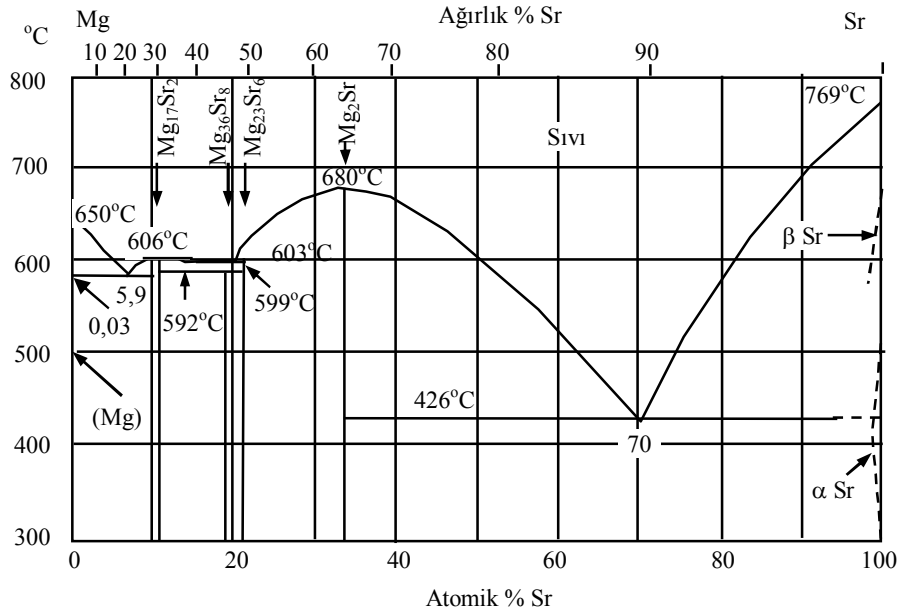
Alaşıma ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini artırmak için kullanılır. Mn'in Mg alaşımlarında, korozyon direncine etkisi fazladır. Fe-Mn çökeltisinde, Fe'in kontrolü için Mn kullanılır. Mn, Mg alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ve Fe'in etkisini azalttığı için, korozyonu engeller. Fakat, Mg alaşımlarının dayanımında Mn'in etkisi azdır [3,8,9,27]. Şekil 2.15'da Mg-Mn denge diyagramına göre Mn, Mg içerisinde %3,4'e kadar sıcaklığa bağlı olarak katı eriyik oluşturabilmektedir.



Şekil 2.15. Mg-Mn denge diyagramı [29].

2.4.6. Stronsiyum (Sr)

Stronsiyum'un (Sr) mikrogözeneklerin dağılmasında etkisi vardır ve Mg alaşımlarının porozite eğilimini azaltır. Sürünme direncini artırır. Sr ilavesinin Mg alaşımlarında korozyona etkisi çok azdır [9]. Şekil 2.16'de Mg-Sr denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.16. Mg-Sr denge diyagramı [9,29].

2.4.7. Toprak Alkali Elementleri (RE)

RE elementleri yüksek ısı dayanımını ve sürünme direncinin artırdığını ve döküm porozitesini azalttığı araştırmalar sonucunda bilinmektedir [3,9].

RE elementleri dökülebilirliği iyileştirir ve Mg alaşımlarında mikroporoziteyi azaltır. Oda sıcaklıklarında ve yüksek sıcaklıklarda alaşımda katı eriyik ve çökeltme sertleşmesi yaparlar. Bu elementler, dayanım özelliklerini iyileştirir ve yükselen sıcaklıklarda alaşımların iyi sürünme dirençleri sayesinde kararlı çökeltileri matriste ve tane sınırlarında dağılır. Sodyum (Na), Potasyum (K), Li gibi RE elementleri korozyon özelliklerini de iyileştirir [3,6,9].

2.5. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

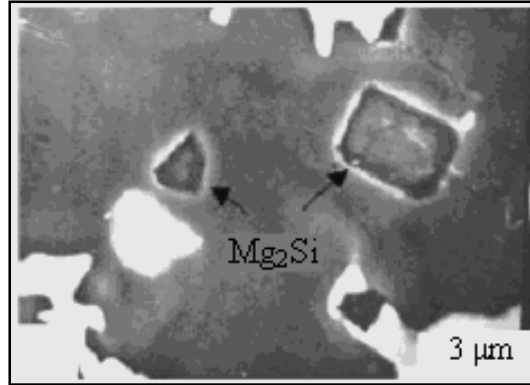
Mg-Al ikili sistemi en eski ve en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. AZ91, AM50 ve AM60 gibi alaşımlar tüm Mg alaşım dökümünün büyük bir bölümünü kapsamaktadır [3,9]. Şekil 2.11’de verilen ikili Mg-Al diyagramı incelendiğinde ötektik reaksiyon, bir başka deyişle $Sıvı \rightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha (Mg)$ dönüşümü, 437°C gibi düşük bir sıcaklıkta olduğu gözlenmektedir. Bu sıcaklıkta Al’nin maksimum çözünebilirliği %12,7’dir. Alaşım %2’den fazla Al içerdiğinde, dökümün mikroyapısında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik bileşiği oluşur. Eğer alaşımdaki Al içeriği %8’in üzerinde olursa $Mg_{17}Al_{12}$ bileşiği tane sınırları boyunca yayılır ve sonuçta şekillenebilirlik hızla azalır. Çözünme işlemi, 420°C civarında $Mg_{17}Al_{12}$ bileşiğinin yayınmasıyla sonuçlanır ve şekillendirebilirlik yükselir. $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltmesi 150°C’de yaşlanmaya neden olur ve bu çökelti dayanımı geliştirir. Zn, Mn, Si gibi diğer elementler Mg-Al sistemi içerisinde alaşımlandırılarak özelliklerinin gelişimi için kullanılır [3,6,8,9]. Magnezyuma ilave edilen bazı elementlerin etkileri ise Çizelge 2.6’da verildiği gibidir.

Mg-Al ikili alaşımları oldukça iyi döküm özelliklerine ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Mg-Al alaşımları Mn, Zn, RE ve Si gibi ilave elementlerle üçlü ve dörtlü alaşımlar oluştururlar. Bu ilave elementler daha önce de belirtilen özellikleri geliştirilerek alaşımların dökümünü daha uygun hale getirirler. Fakat ilave edilen bu

elementler alaşımın katılaşma davranışını zorlaştırırlar [3,7,9]. En fazla kullanılan alaşım elementleri Al, Zn, Mn ve Zr dir. RE, Yi ve Ca genellikle yksek sıcaklıklar için kullanılır [6,9].

2.5.1. Magnezyum-Alüminyum-Silisyum Alaşımları

Mg alaşımlarında 150 °C'ye kadar sürünme direncini geliştirmek için AS41 (%4,2 Al, %1 Si, %0,35 Mn) basınçlı döküm alaşımı geliştirilmiştir [9]. Bu alaşımın dayanımı, hızlı katılaşma sonucu ince taneli yapıya sahip olan Mg₂Si fazından kaynaklanmaktadır. Alaşım kuma döküm uygulamalarında kullanılamamıştır. Çünkü, kuma döküm işleminde yavaş soğumadan dolayı Mg₂Si fazı kaba taneli olmuştur. Alaşımın kaba taneli olmasından dolayı, süneklilik ve çekme dayanımı azalmaktadır [33]. Şekil 2.17'da Si'li Mg alaşımlarının mikroyapısı görölmektedir.



Şekil 2.17. Si'li Mg alaşımının mikroyapısı [33].

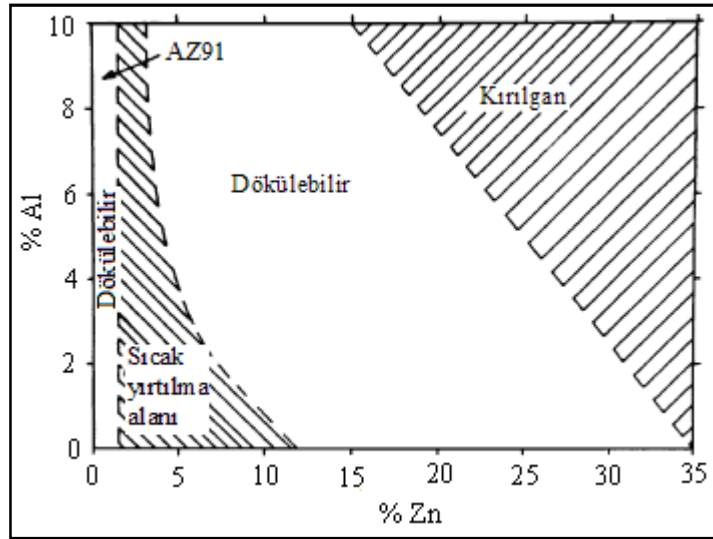
2.5.2. Magnezyum-Alüminyum-Toprak Elementleri Alaşımları

1930'larda RE'nin Mg alaşımlarının özellikleri üzerinde yararlı etkileri olduğu keşfedilmiştir. RE'nin %1'den fazla eklenmesiyle, Mg-Al esaslı alaşımların sürünme dirençlerinde iyileşme olduğu görölmüştür. Belli başlı toprak alkali elementler RE, kararlı Mg₁₂RE intermetalik bileşiği oluşturduğundan; hem oda sıcaklığında hem de yksek sıcaklıklarda kararlıdırlar ve düzenli bir matris yapısına sahiptirler. Artan Al içeriği ile birlikte dökülebilirliğin yükselmesine rağmen, RE'nin sürünme dirençlerindeki etkisi, bir dereceye kadar Al ilavesini sınırlı kılar [9]. RE miktarı

AZ91 ve AM60'a %0,1'e kadar sıcak yırtılmayı artırmakta ve mikro sertliği geliştirmektedir. RE miktarı arttıkça sıcak yırtılma eğilimi azalmaktadır [34].

2.5.3. Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımları

Mg-Al-Zn alaşım sistemi, Mg döküm alaşımlarında önemli bir yere sahiptir. 1913 yılında keşfedilen bu alaşım sistemi daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir [9,35]. Şekil 2.18'de Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirlik aralıkları verilmiştir.



Şekil 2.18. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi [6,35,36].

Diyagram incelendiği zaman dört bölgeden oluştuğu görülmektedir.

- 1) Düşük Zn'de dökülebilir bölge : α (Mg) ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazları vardır ve AZ alaşımı bu bölgededir.
- 2) Sıcak yırtılma bölgesi
- 3) Yüksek Zn'da dökülebilir bölge: Yüksek Zn'li alaşımın dökülebilirliğini gösterir ve $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ intermetalik bileşiği bu bölgededir.
- 4) Kırılgan bölge

Çizelge 2.9. Katı fazlar, sembolleri ve ergime dereceleri [9].

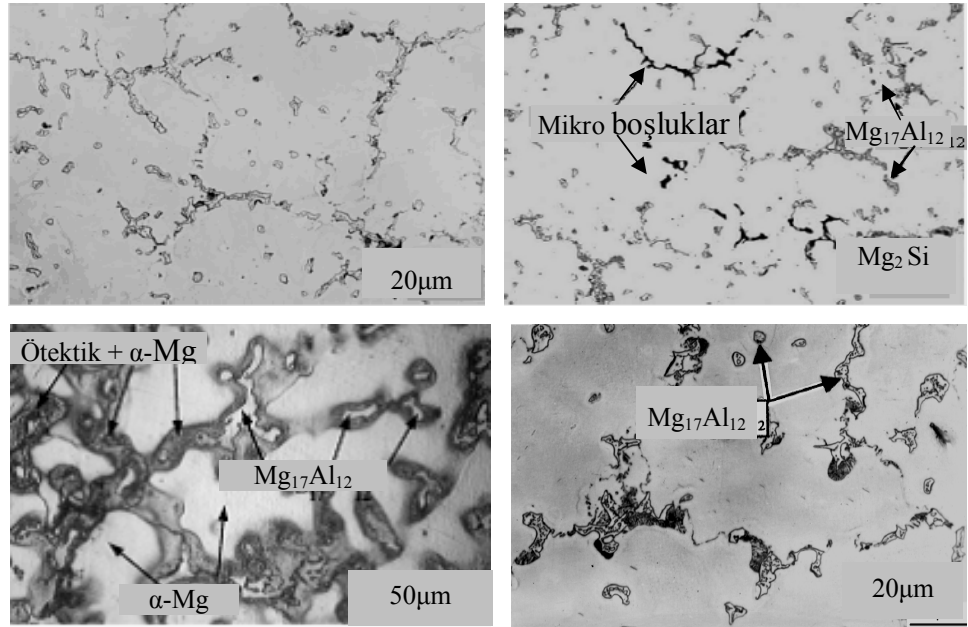
Faz	Sembol	Ergime derecesi °C
Al	-	<660,5
Mg	-	<650
Zn	-	<419,6
Mg ₂ Al ₃	β	<453
Mg ₂₃ Al ₃₀	X	450 – 428
Mg ₄₈ Al ₅₂	Y	-
Mg ₁₇ Al ₁₂	γ	<460
Mg ₇ Zn ₃	δ	342 – 325
MgZn	ε	<347
Mg ₃ Zn ₃	ξ	<416
MgZn ₂	η	<590
Mg ₂ Zn ₁₁	θ	<381
Mg ₃₂ (Al,Zn) ₄₉	τ	<535
Al ₁₂ Mg ₅ Zn ₂	φ	393 – 535

Mg-Al-Mn ya da AZ91(%9 Al, %0,7 Zn, %0,2 Mn) ve AM60 (%6 Al, %0,2 Mn) gibi alaşımlar en sık kullanılan Mg alaşımlarıdır. Bu alaşımlar; iyi dökülebilirliğe, iyi mekanik özelliğe ve korozyon direncine sahiptirler. Ancak, bu alaşımlar 120°C üzerindeki sıcaklıklarda düşük sürünme dirençlerinden dolayı kullanılmazlar [9,15].

2.5.4. AZ91 Alaşımları

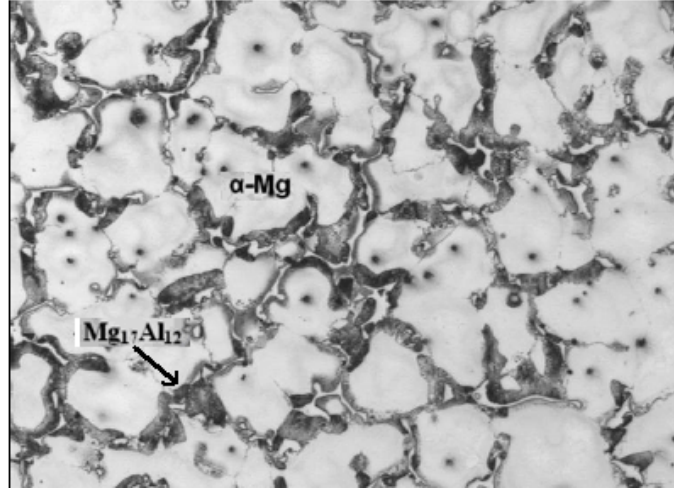
AZ91 serisi iyi döküm özelliği ve mekanik özelliği olmasından dolayı en çok kullanılan ticari, yapısal Mg alaşımıdır. AZ91 alaşımı otomotiv endüstrisinde kokil kalıp döküm olarak kullanıldığından son yıllarda incelenmek için ilgi çekmektedir. Alaşımın özelliklerini ve mikroyapılarını geliştirmek için değişik alaşımlamalar uygulanmaktadır. Örneğin; bu alaşım elementlerinden biri olan Ca'un oksidasyonu azalttığı, sızıntı emniyetini artırdığı, sıcak uygulamalara (130 -150°C) olan yeteneği artırdığı fakat %0,2 den fazla olduğu zaman, alaşımı kırılganlaştırdığı ve sıcak yırtılma eğilimini artırdığı gözlenmiştir [9,37]. Yorulma dayanımı, sürünme direnci ve gerilim direnci çok iyidir. Bununla birlikte AZ91 için en iyi sürünme direnci oda sıcaklığında gerçekleştiği rapor edilmiştir [9].

Mg-Al alaşımlarında Zn/Al oranı 1/3 oranını aştığında mikroyapıda üçlü Mg-Al-Zn fazı görülür [15]. Böylece faz oluşumu ve alaşımın denge katılaşma karakteristikleri ikili Mg-Al faz diyagramı ile anlaşılabilir (şekil 2.11). AZ91'in dengeli katılaşması, birincil Mg olan α (Mg) katı eriyik çekirdeklenmesi ile yaklaşık 600 °C'de başlar. Bu çekirdekler büyür ve katılaşma 470 °C'de son bulur [3,9]. α (Mg) ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazından oluşmuş ayrık bir ötektik oluşumu mikroyapıda görülür. Böylece denge dışı AZ91'in mikroyapısı α (Mg) ve bir intermetalik faz olan $Mg_{17}Al_{12}$ 'den oluştuğu anlaşılır. şekil 2.19'de AZ91 alaşımının mikroyapıları görülmektedir.



şekil 2.19. AZ91 alaşımının mikroyapısı [38].

Normal dökülen AZ91'deki tane sınırları baskın bir şekilde $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı ile çevrili olduğu için ısıl işlem sonucu tane sınırları kolayca görülmektedir [30]. şekil 2.20'de AZ91 numunelerinin mikroyapıda tanelerinin resmi görülmektedir.



Şekil 2.20. AZ91 alaşımlarının mikroyapıda tane görünüşü [2].

Kokil kalıba döküm numunelerinin kaba tane boyutu, basınçlı dökümün yaklaşık olarak 10 katı kadardır. Bu hızlı katılaşma hızlı soğumadan dolayı olur ve ergiyik birçok çekirdeklenme oluşturur. Ayrıca tane artışı, kalıp dolumu sırasında ince tanelerin oluşumuna katkıda bulunur. Enjekte edilmiş ergiyiğin yüksek hızı ergiyikte türbülans oluşturur. Bu türbülans, kalıp yüzeyinde henüz çekirdeklenmemiş dendritlerin kırılmasına neden olur ve sonunda tane sayısı artmaktadır. Bundan başka, kalıp boşluğu bazı döküm teknikleri ile hızlı bir şekilde doldurulduğu zaman oluşan damlacıklar yeni çekirdeklenme yüzeyleri oluşturabilmektedirler [9].

2.5.5. AZ61 Alaşımları

AZ61 serisi magnezyum alaşımları iyi döküm özelliği ve mekanik özelliğinin iyi olmasından dolayı magnezyum alaşımları içinde en çok kullanılan alaşımlardandır. Özellikle havacılık ve uzay sanayi ile otomotiv sektöründe sıkça kullanılmaktadır. AZ61 alaşımlarının Mikroyapısı genelde α -Mg ana matrisi içerisinde tane sınırları boyunca uzanan ötektik ve intermetalik fazlarından meydana gelmektedir.

2.5.6. AM60 Alaşımları

Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorblama özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti

yapımında kullanılır AM60 alaşımları iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Bu alaşımlar; iyi dökülebilirliğe, iyi mekanik özelliğe ve korozyon direncine sahiptirler. Ancak, bu alaşımlar 120°C üzerindeki sıcaklıklarda düşük sürünme direncine sahiptirler. AM60 alaşımının mikroyapısı genelde α -Mg ile $Mg_{17}Al_{12}$ fazlarından meydana gelmektedir.

Çizelge 2.10. Magnezyuma ilave edilen bazı elementlerin etkileri [1,18].

Alaşım El.	Ergitme ve Döküm Özellikleri	Mekanik ve Teknolojik Özellikler
Ag		Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımlarını iyileştirir.
Al	Dökülebilirliği iyileştirir	Katı eriyik sertleştiricidir
Ca	Etkili tane incelticidir, ergimiş metalin oksidasyonunu önler.	Sürünme özelliklerini iyileştirir.
Fe	Magnezyum çelik kalıplarla çok yavaş reaksiyona girer.	
Si	Dökülebilirliği artırır.	
Th	Mikroporoziteyi bastırır.	Yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme dayanımlarını iyileştirir.
Zn	Ergimiş metalin akışkanlığını artırır.	Çökeltme sertleşmesi ortam sıcaklığında dayanımı artırır.
Zr	Etkili tane incelticidir.	Ortam sıcaklığında çekme iyileştiricidir.
Toprak Alkali	Dökülebilirliği iyileştirir	Yüksek sıcaklıklarda çökeltme sertleşmesini iyileştirir.

BÖLÜM 3

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Mg alaşımlarının dökülmesindeki ana problem, oksitlenme ve yanma kaybıdır. Havacılıkta kullanılan Mg esaslı parçaların büyük oranının döküm yoluyla üretildiği göz önüne alınırsa parça üretiminde döküm problemlerinin çözümü ana öncelikler arasında yer almaktadır [3,9].

Magnezyum döküm alaşımları genellikle, dışarıdan ısı uygulamalı bir çelik karbon ($0,12C$) potada ergitilir. Çelik pota çok yaygın olarak kullanılır, çünkü magnezyum normal döküm sıcaklıklarında (magnezyum $650^{\circ}C$ 'de ergir) çelikle çok yavaş reaksiyona girer. Ergiyik magnezyum prosesi için yaygın uygulama metali aynı anda ergitme ve potadan dökmezdür. Kalıptaki demir sıvı magnezyum alaşımı içinde daha az çözüldüğünden, alaşımın kalıba yapışma eğilimi alüminyum alaşımlarına göre daha azdır. Buna bağlı olarak kalıp ömrü alüminyum parçalara kıyasla 2-3 kat daha uzundur.

Ancak ergiyik magnezyum ve alaşımları havada oksitlenme ve yanma eğilimindedirler ve bu nedenle ergiyik magnezyum yüzeyleri hava ile oksidasyondan korunmalıdır. Bugün çoğu modern dökümhaneler, hava-kükürt hexaflorür gaz karışımı (SF_6) şeklinde bir örtüsüz proses kullanmaktadır [1,18].

Mg döküm teknikleri 4 grupta toplanır [1,3,9].

- 1) Kum kalıba döküm
- 2) Kokil kalıba döküm
- 3) Basıncılı döküm
- 4) Yarı-katı döküm

Döküm süreçlerinden birinin seçimi diğer döküm malzemelerine benzer bir şekilde büyüklük, gerekli tolerans ve üretim miktarına göre belirlenir. Son yıllarda basınçlı döküm alaşımlarının kullanımı hızla yükselmektedir [1,39].

3.1. KUM KALIBA DÖKÜM

Kum kalıp dökümü, bilinen geleneksel döküm yöntemidir. Bu yöntemde kum aralarından hava alacağından Mg'nin yanma tehlikesine karşı önlemler alınmalıdır. Kalıp boşluğu koruyucu gaz ile korunmalıdır. Mg alaşımlarında bilinen ve uygulanan en iyi kum döküm yöntemi kabuk kalıplıdır. Bu kalıpta kumlar arasında reçine tabaka oluşturduğundan Mg'nin kalıp içinde yanma tehlikesi azalmış olacaktır.

Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımları genelde kolay dökülmelerine rağmen, belli durumda sınırlılıkları vardır. Kum kalıba döküldüklerinde mikro çekme gösterirler ve 95°C'nin üzerindeki sıcaklıklardaki uygulamalar için uygun olmadığı gözlenmiştir. Mg-RE-Zr alaşımları bu sınırlamaların üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. EZ33A alaşımında kuma dökümler çok iyi dayanım gösterirler [39].

3.2. KOKİL KALIBA DÖKÜM

Kokil kalıp döküm, iki ya da daha fazla parçadan oluşan metal kalıba döküm teknolojisidir. Aynı şekilli birçok parçanın dökümü hızlı bir şekilde yapılabilir. Sıvı metal yer çekimi etkisiyle kalıba girer. Kokil döküm özellikle yüksek yoğunluklu parça üretimi için uygundur. Kum dökümle kıyaslandığında kokil kalıp dökümünün üstünlüğü; boyutsal toleransları ve yüzey kalitesi sayesinde, daha uniform döküm parçaların üretiminin sağlanmasıdır. Döküm işleminin süresinin uzaması ile ergimiş metal kalıba keskin bir türbilans ve sıçrama ile girer. Ergimiş metalin uzun sürede düşmesini önlemek amacıyla eğik döküm makinesi, üretimde sıklıkla kullanılmaktadır [9,40]. Eğik döküm işleminde kokil kalıp dikey yönlenmiş parçalarla kalıp içerisine yerleştirilir.

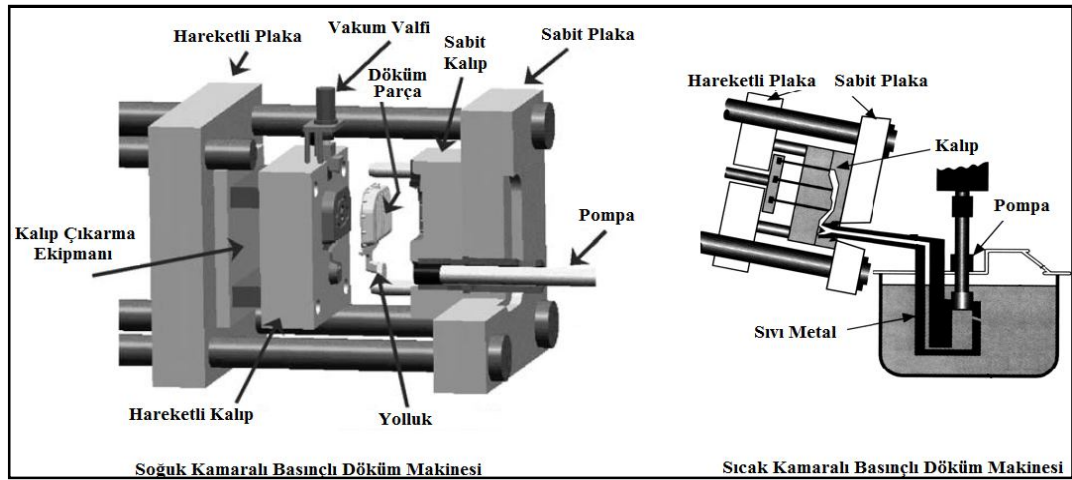
Mg-Al-Zn tipi metaller kokil döküm yöntemiyle üretilen alaşımlardır. Bu yöntemde Mg alaşımları Al alaşımlarından çok daha hızlı dökülür. Al alaşımlarına göre kalıp

ömrü daha uzundur. Çünkü Mg’de kalıp yüzeyine yapışma daha az Al’de ise daha fazladır. Mg kalıpları, Al kalıplarından 2 kere daha fazla dayanır. Doğru bir biçimde kullanıldığında ve korunduğunda, koruyucu kaplama yöntemleri ile de kalıp ömrü daha da çok artırılabilir. Mg alaşımının farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri Al ile karşılaştırıldığında farklı pota malzemeleri kullanılır. Ergimiş Mg, ergimiş Al’de olduğu gibi Fe ile reaksiyona girmez bu nedenle Mg ve alaşımları Fe ve çelik potalarda ergitilebilir ve tutulabilir [39].

3.3. BASINÇLI DÖKÜM

Mg alaşımları genellikle yerçekimi veya basınçlı döküm ile üretilirler. Basınçlı döküm hidrolik sistem yardımıyla yüksek hızda ergimiş metali metal kalıbın içine doldurma işlemidir. Basınçlı dökümün soğuk kamaralı ve sıcak kamaralı olmak üzere iki ana işlemi vardır. Sıcak kamaralı işlemde düşük ergime noktalı malzemeler kullanılır. Sıcak kamaralı işlemde hidrolik sistemde sıvı metalin transferi sırasında ergimiş metaldeki türbilans, ısı kaybı ve oksitlenmeye yol açar. Bu işlemde metalin kalıp içerisine enjeksiyon yoluyla ilerlemesi sağlanır [9].

Mg alaşımlarının döküm yöntemlerinden düşük basınçlı döküm tekniğinde tamamen kapalı sistemde kaliteli temiz alaşım üretimi sağlanır. Şekil 3.1’de soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm sisteminin şematik resmi görülmektedir.

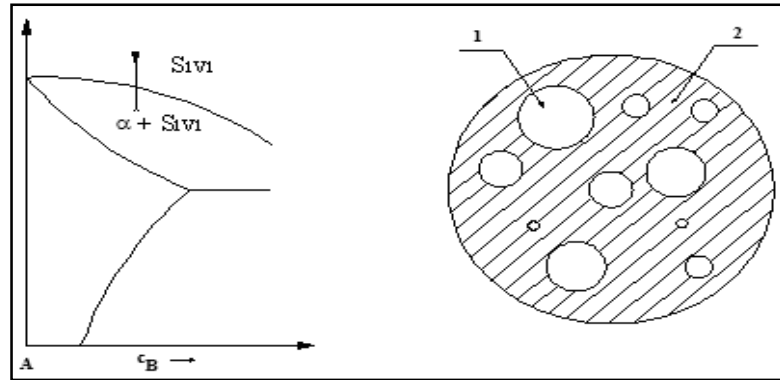


Şekil 3.1. Mg alaşımları basınçlı döküm makinesi [1,41].

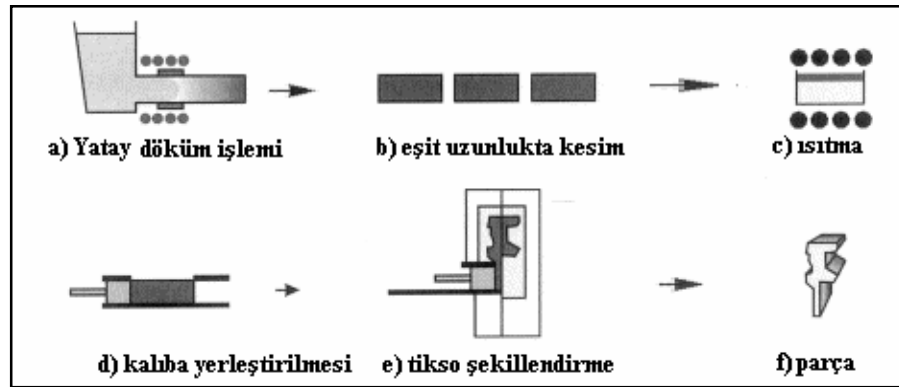
Sıcak kamaralı döküm işleminde, ergimiş metalin türbilansı azalmaktadır. AZ91, basınçlı dökümde kullanılan en önemli Mg alaşımıdır. AZ91 basınçlı döküm numunelerinin çekme özellikleri kokil ve kum döküme göre daha iyidir.

3.4. YARI-KATI DÖKÜM YÖNTEMİ

Mg alaşımlarının kullanımı, esas olarak döküm teknolojisine ve yarı-katı şekillendirmeye bağlıdır. Otomobil üreticileri, otomotiv saclarının yapımında çelik ve Al yerine yarı-katı üretilmiş Mg alaşımlarının uygunluğu üzerine çalışmalar yapmaktadır [42]. Alaşım sıvı durumdan soğutulur ve sıvı-katı sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıkta tutularak bir karıştırma hareketi uygulanırsa, normal dendritik büyüme durdurulur ve burada kaba, küresel, farklı dendrit parçacıkları oluşur. Şekil 3.2’de yarı-katı durum şematik olarak, Şekil 3.3’de yarı-katı döküm yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yarı-katı sıcaklık ve durumu (1) katı, (2) sıvı [1].



Şekil 3.3. Yarı-katı döküm yöntemi [11].

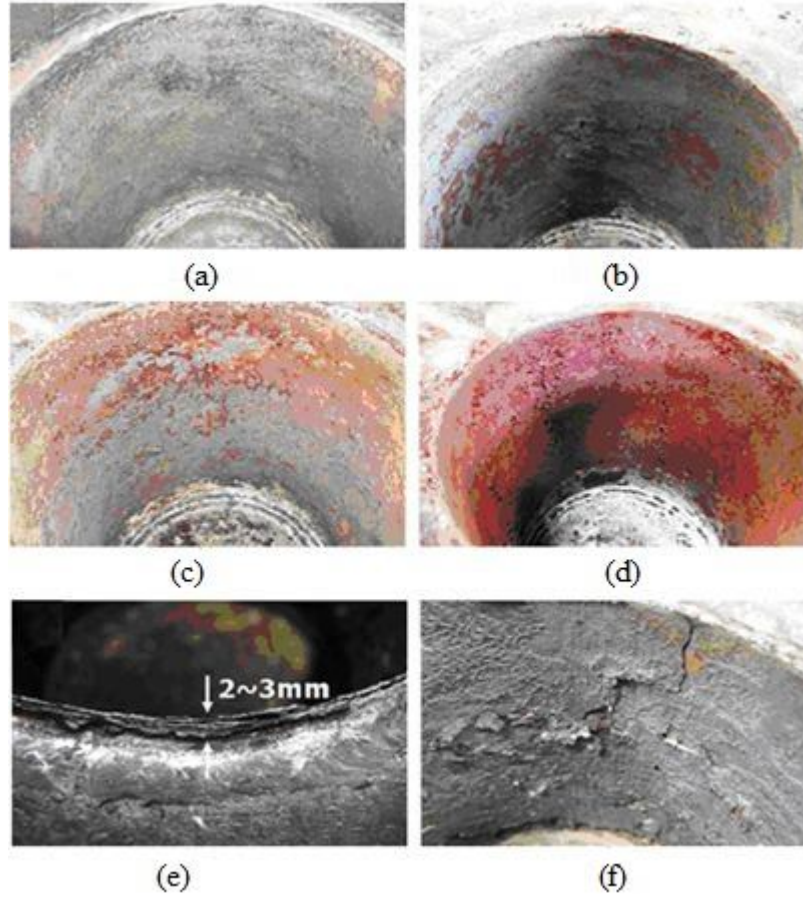
Yarı-katı yöntemlerle üretilmiş bir alaşımda iyi mekanik özelliklerin yanında düşük gözenek miktarı elde edilir. Mg alaşımlarının yarı-katı yöntemiyle yüksek kaliteli, ince taneli ürünler, basınçlı döküme nazaran daha ucuz bir şekilde üretilir. Buradaki esas amaç HSP yapıya sahip Mg ana matrisini küresel hale getirip nispeten şekillenebilen Mg-x fazı ile çevrelendirip tok bir malzeme elde etmektir [1,42].

3.5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ERGİTİLMESİ VE DÖKÜMÜ

Önlem alınmazsa Mg oksitlenmeye meyillidir. Ergimiş Mg alaşımları Al'den farklı olarak davranır. Ergiyik üzerinde oksijen geçirgen ince bir film oluşturur ve oksitlenme artar. Bu oluşum oksijenin içeriye girmesini ve oksit tabakası altında yanmanın oluşmasına sebep olur. Oksitlenmenin önlenmesi için ergimiş metalin korunmasında ve dökümünde koruyucu gazlar kullanılır. Mg alaşımının ergitilmesinde ve dökümünde koruyucu olarak kullanılan gazların (Ar, SF₆, N ve HFC-134a) etkileri araştırmacıların ilgisini çekmektedir [43]. Döküm malzemesi içindeki curuf kalıntıları korozyon dayanımını düşürmektedir. Günümüzde SF₆ içeren gaz karışımları sıvı Mg'yi korumak için daha sık kullanılmaktadır. Tipik koruyucu gaz karışımı için aşağıda üç örnek verilmiştir [1,44].

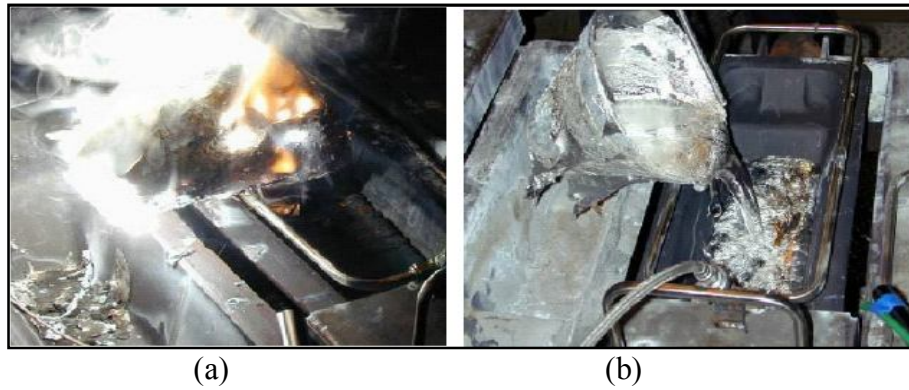
- 1) AZ91 650-725⁰C → Hava+%2 SF₆
- 2) AZ91 650-725⁰C → %75 Hava+%25 CO₂+%0,2 SF₆
- 3) AZ91 650-725⁰C → %50 Hava+%50 CO₂+%0,3 SF₆

SF₆ %5'in üstündeki konsantrasyonlar da kullanıldığında Mg için çok iyi bir koruyucu olmakta, ancak çelik kalıplarla ve pota ile reaksiyona girmektedir. Mg alaşımlarına çok az miktarda berilyum ilavesi alaşımın yanmasını engelleyici ekisi vardır [1]. Alaşımların ergitilmesinde özel olarak dizayn edilip hazırlanmış ergitme ocakları kullanılmaktadır. Bu ocaklarda Mg alaşımları atmosfer ortamından tamamen uzak ve koruyucu gaz altında ergitmeler yapılmıştır. Şekil 3.4'de 6,5 saat 720⁰C'de gaz atmosferine maruz kalmış potaların içi görülmektedir. SO₂ ve SF₆ gaz karışımlarındaki potalarda önemli değişiklikler yoktur. Kullanılan çelik potanın yüzeyi hafif şekilde zarar görmüştür. Fakat HFC-134a gaz karışımına maruz kalan pota ciddi şekilde zarara uğramıştır. 2-3 mm kalınlığında olan oksit tabakalar kabarmış ve soyulmuştur [43].



Şekil 3.4. Kullanılan gaz karışımlarına göre çelik potanın durumu a) Potanın ilk hali, b) 720⁰C'de, 5 saat atmosfer ortamında, c) 720⁰C'de, 5 saat SF₆ gaz ortamında, d) 720⁰C'de, 5 saat %0,3 SO₂/hava gaz ortamında, e) ve f) 720⁰C'de, 5 saat %0,3 HFC-134a gaz ortamında [43].

Şekil 3.5'de Mg alaşımlarında döküm yapılırken atmosfer ortamı ve SF₆ gazı kullanımı görülmektedir.



Şekil 3.5. Mg alaşımı dökümlerinde gaz kullanımı a) atmosfer ortamı, b) SF₆ [43].

3.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Mg alaşımlarının oda sıcaklığında mekanik özellikleri (basınçlı döküm) [13,45].

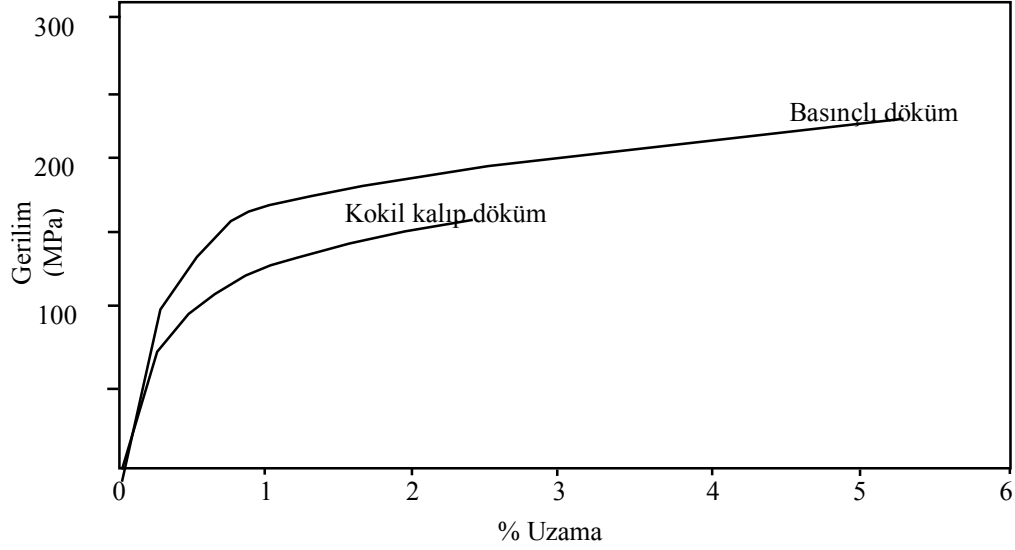
Özellik	Mg alaşımları						
	AZ91	AM60	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
Max. Gerilme Day. (MPa)	230	247	237	206	240	230	237
Akma Dayanımı (MPa)	148	123	116	94	130	120	130
Kopma Uzaması (%)	6	12	14	16	10	12	13
Elastik Modül (GPa)	45	45	45	45	45	45	45
Brinell Sertlik (BSD)	70	65	60	45	60	55	60
Darbe Dayanımı (J)	6	17	18	18	4	5	5

Çizelge 3.2. Mg alaşımlarının oda sıcaklığında fiziksel özellikleri (basınçlı döküm) [13,45].

Özellik	Sıcaklık °C	Mg alaşımları						
		AZ91	AM60	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
Yoğunluk (g/cm ³)	20	1,81	1,80	1,77	1,75	1,77	1,76	1,79
Ergime derecesi (°C)	-	598	615	638	638	617	632	625
Isı iletim kats. (µm/mK)	20-100	26	26	26	26	26,1	26,1	26,1
Isı iletkenliği (W/Km)	20	51	61	65	94	68	84	84
Elektrik iletkenliği (MS/m)	20	6,6	-	9,1	13,1	-	10,8	11,7

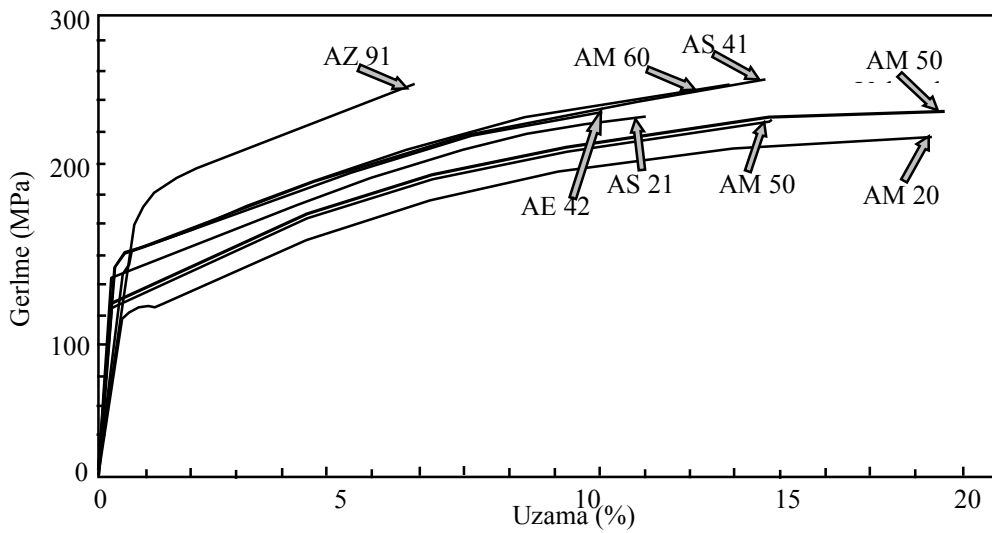
Çekme özelliklerinden genellikle, maksimum çekme dayanımı, uzama ve elastik modülü gibi bilgiler malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Şekil 3.6’da kokil kalıp döküm ve basınçlı döküm için tipik bir gerilme - gerinim test eğrileri verilmiştir. Bu verilen iki eğri, sınırlı bir elastik deformasyonu göstermektedir. Özellikle eğri, kokil döküm numuneleri için uygundur. Bu durum

dentritler arası kollar ve tane sınırları boyunca yayılan çekme gözeneklerden kaynaklanmakta ve gözenekler tane sınırlarının dayanımını zayıflatmaktadır [9].



Şekil 3.6. AZ91'in basınçlı ve kokil dökümünün gerilim-uzama diyagramı [9].

Genellikle, Mg alaşımları belli bir akma göstermezler ve akma dayanımları bazen %0,2 uzamaya karşı gelen dayanım olarak alınır. Mg alaşımlarında tane boyutunun küçülmesiyle akma dayanımı artmaktadır [46]. Bazı Mg basınçlı döküm alaşımlarının gerilim-uzama diyagramı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Mg alaşımlarının gerilim-uzama eğrileri (basınçlı döküm) [9,13,15].

BÖLÜM 4

ISIL İŞLEM

Genel anlamda ısıtma işlemi, metal veya alaşımlara istenilen özellikleri kazandırma amacıyla, katı halde uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanır. Türk Standartlarındaki tanımı ise, katı haldeki metal ve alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir [47].

4.1. HOMOJENLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ

Difüzyon (yayınım) da denilen homojenleştirme işlemi iç yapıda var olan kimyasal bileşim farklılıklarının yüksek sıcaklık ve sürelerde yayınma yoluyla dengelenmesi amaçlanır. Tek fazlı yapı sıcaklıklarında ve 6 - 48 saat gibi uzun sürelerde gerçekleştirilir. Genelde hadde öncesi yapılan bir işlemdir [48].

Homojenleştirme işleminde amaç, dendritik yapıdaki konsantrasyon farklılıklarını giderilmesi, katılaşma sırasında oluşan dengersiz fazların çözülmesi ve alaşımın ekstrüzyon parametrelerinin olumlu yönde etkileyen denge parçacıklarının oluşturulmasıdır. Karmaşık alaşım sistemlerinde dengersiz bileşiklerin yanında malzemenin sünekliliğini azaltan çözünmez denge fazlarda bulunur. Homojenleştirme işlemi ile bu fazların yuvarlaklaşması sağlanarak süneklilik artırılır [49].

Metal malzemelerin dökümden sonraki primer yapısı, genel olarak dendritik haldedir ve büyük ölçüde bileşim farklılıkları nedeni ile yapıda homojensizlik vardır. Difüzyon olaylarının etkin olduğu homojenleştirme işlemiyle yapı homojen hale gelir. Bölgesel bileşim farklılıkların - özellikle impurite- dengeye getirilmesi ve dendritik yapının olumsuz etkilerinin giderilmesi arzulanır. İşlem süresini mümkün

olduğunca kısaltmak amacıyla, malzeme katılaşıma sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır.

Çok yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesine karşılık, bu sıcaklıkta bekleme süresi diğer tavlama yöntemlerine oranla oldukça uzundur. Bir taraftan yapıdaki bileşim farklılıkları dengelenirken, bir taraftan da tane sınırlarındaki son katılaştıran ergiyikteki impuritelere, bu sıcaklıkta çözünebilirler çözülerek tane içerisinde homojen olarak dağılır. Bu sıcaklıkta çözünmeyenler ise kısmen parçalanarak küresel forma dönüştürülür ve malzemedeki olumsuz etkileri büyük ölçüde azaltılır. Ancak, hem sıcaklığın hem de tavlama süresinin fazla olması nedeniyle, tavlama sırasında istenilmediği halde malzemedeki tane kabalaşması meydana gelebilir [50,51].

4.2. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

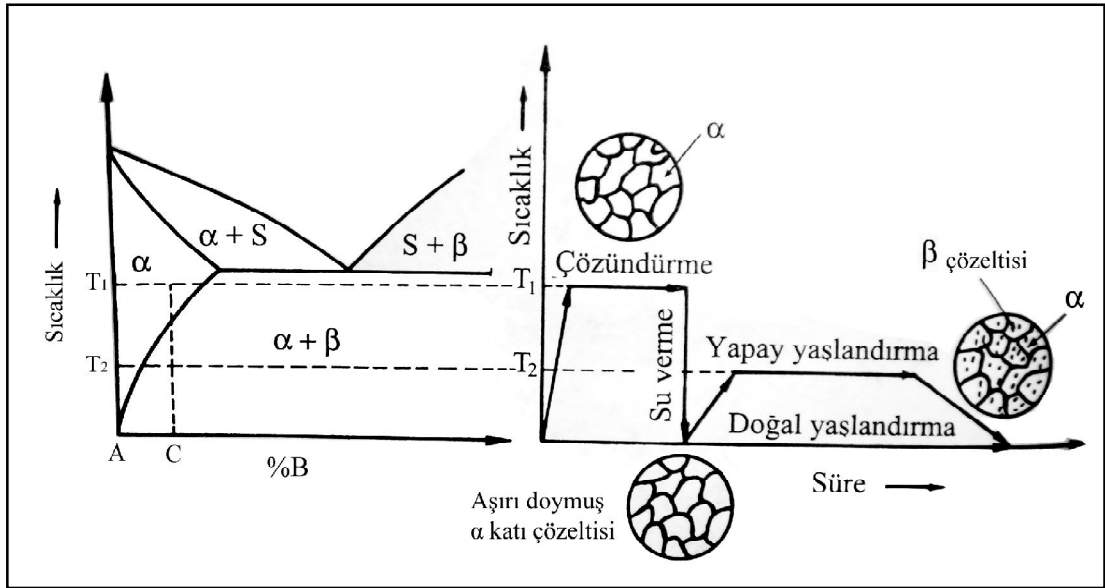
Yaşlandırma ısıl işlemi, yumuşak ve sünek matriste; ince, sert ve matrisle uyumlu çökeltilerin oluşumunu sağlamak için uygulanır [52,53]. Matris içinde uygun şekilde dağılan çökeltiler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek, alaşımların mukavemet değerlerinde artışa neden olurlar. Yaşlandırma ısıl işlemi ile, magnezyum alaşımlarının, bakır alaşımlarının ve ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının sertleşmesi sağlanır ve dayanımları artırılır. Yaşlandırma ısıl işlemi, üç aşamadan meydana gelmektedir;

Solüsyona alma ısıl işlemi

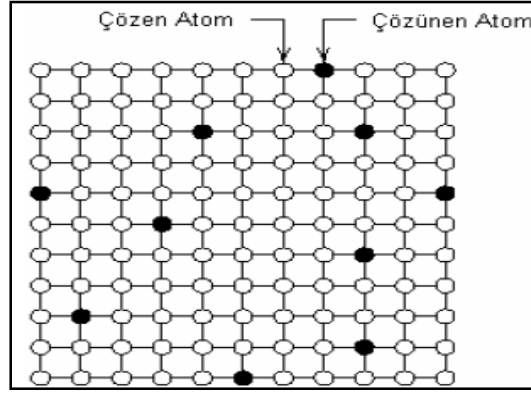
Sıvı durumda her oranda, katı durumda ise kısmen çözünen yapıya sahip bir alaşım (Şekil 4.1), tek fazlı bir yapı (α) elde etmek amacıyla, alaşımın faz diyagramında belirtilen, solvüs sıcaklığının üzerinde, T1 (420°C) sıcaklığına kadar (Şekil 4.1) ısıtılır ve bu sıcaklıkta alaşımdaki bütün fazların (α ve β) tek faz içinde çözünmesi sağlanıncaya kadar bekletilir. Bekleme süresi, alaşımların yapısına göre değişiklik gösterir. Alaşımlara uygulanan bu işleme çözündürme uygulaması veya solüsyona alma ısıl işlemi denir [47,53].

Su verme

Su verme işlemi, solüsyona alma ısıl işlemi ile elde edilen tek fazlı (α) katı çözeltilisini, çökeltilerin oluşmasına izin vermeyecek şekilde, T_1 (420°C) sıcaklığından süratle soğutmaktan ibarettir (Şekil 4.1). T_1 (420°C) sıcaklığındaki malzemenin, ani olarak bir akışkan içerisinde soğutulması nedeni ile aşırı doymuş bir yapı elde edilir. Aşırı doymuş yapı, malzeme içinde bulunan çözenin (Şekil 4.2) (örneğin alüminyum alaşımlarında alüminyum, magnezyum alaşımlarında magnezyum), denge koşullarında, alaşım elementinin çözebileceği miktardan daha fazla madde çözmesi anlamına gelir ve kararsız bir durumdur. Kararlı bir yapının oluşması, orta dereceli dayanıma ve önemli oranda sünekliğe sahip bu yapının yaşlandırılması ile mümkündür. Su verme işleminden sonra ısıtılarak gerçekleştirilen yaşlandırmaya yapay yaşlandırma, oda sıcaklığında kendiliğinden olan yaşlandırmaya ise doğal yaşlandırma adı verilir [47].



Şekil 4.1. Çözüldürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökelme sertleşmesini gösteren şekil [47].



Şekil 4.2. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı.

Çökeltme sertleşmesi

Solüsyona alma ısıl işleminde elde edilen, orta dereceli dayanıma ve önemli oranda süneklığe sahip aşırı doymuş yapının mukavemet değerleri, çökeltme sertleşmesi ile daha da arttırılabilir. Yaşlandırmanın ilk aşamasında, aşırı doymuş yapı içerisindeki fazlalık atomları kümeleşir ve ilerleyen aşamalarda, çekirdekleşme mekanizmasının etkin hale gelmesiyle, β fazının (çökeltler) çekirdeklerini oluşturur (Şekil 4.1) [47]. Çökeltme sertleşmesinin oluşumu, matris içinde, çözünen atomların meydana getirdiği uyumlu çökeltlerin oluşmasına bağlıdır. Uyumlu bir çökelti oluştuğunda, çökelti kafesinin atom düzlemleri ile matris kafesinin düzlemleri arasında süreklilik oluşur. Süreklilik oluşumu, çökelti etrafında geniş bir gerilme alanı oluşturur ve bu alan içerisinden geçen dislokasyonların hareketleri zorlaşır [52]. Alaşımın matris yapısı ile uyumlu çökeltler, dislokasyon hareketlerine engel olarak, alaşımın sertliğini ve mukavemetini önemli ölçüde arttırırlar. Ancak, aşırı yaşlandırma durumunda, çökeltler daha da büyüyerek, matristen bağımsız olarak kendi kristal yapılarını oluşturur ve kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz bir yapı meydana getirirler. Bu durumda malzemenin mukavemet değerlerinde düşüş görülür.

Buna ilave olarak, çökeltme sertleşmesinde, alaşımın sertliğini ve dayanımı arttıran bir diğer etken ise çökelti boyutlarıdır. Yaşlandırma zamanı arttırıldığında, çökeltler büyüyerek aralarındaki mesafe azalır ve bu ise dislokasyon hareketlerini engelleyerek sertlikte artışa neden olurlar. Çökelti boyutları aşırı derecede artar ise, dislokasyonlar çökeltiyi kesebilir ve bu durumda sertlikte düşüşe neden olur.

4.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

Sınaî ultra-hafif alaşımlara tekabül eden denge diyagramlarının çoğu, magnezyumdan yana zengin, yaygınlığı sıcaklığa bağlı bir eriyik içerir. Bu alaşımlarda, dolayısıyla su verme ve içyapısal çökeltme ile iyileşme olanağı vardır. Bununla birlikte bu ısıl işlemler burada, alüminyum esaslı hafif alaşımlarda gösterdikleri etkinliği bütünüyle gösterememekte ve dolayısıyla da, daha az genelleşmişlerdir. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımları, aşağıdaki sınırlar içinde ısıl işlem kabul edebilirler:

Mg-Al alaşımları: $\%7 < Al < \%12$

Mg-Al-Zn alaşımları: $\%7 < Al + Zn < \%13$ ve $Al \geq \%5$

Belli Mg_4Al_3 bileşiminde kristallerin tam katı eriyik haline getirilmelerini sağlamak üzere yeterli derecede yüksek bir sıcaklıkta uzunca süre ısıtılmadan sonra alaşım havada soğutulacak olursa soğuma hızı, pratik olarak stabil kalan homojen, fazla doymuş bir katı eriyik'i oda sıcaklığında tutmak için genellikle yeterli olur ve alaşım homojenleşmiş (stabil) durumdadır denir. Homojenleştirme işleminin sonuçları R ve A'nın bir belirgin artışı, yorulma sınırının yükselmesi ve elastik sınırla sertliğin hafifçe artması şeklinde olur [55].

Önceden homojenleştirilmiş (stabilize edilmiş) alaşımın $150^{\circ}C$ mertebesinde uzun süreli bir menevişe tâbi tutulması halinde katı eriyik ayrışır ve fazla doymuşluk halinde bulunan Mg_4Al_3 bileşim bölümünün içyapısal çökeltmesi gerçekleşir ve alaşım tavlanmış haldedir denir. Bu tamamlayıcı işlem kopma mukavemetini, elastik sınır ve sertliği daha da artırır; etki özellikle bu son iki karakteristik için belirgindir. Buna karşılık yorulma sınırı ve kopma uzaması düşer ve hatta dökme parçalarda dökümden çıkmış haldekinin altına bile inebilir. Çizelge 4.1'de Al: $\%6,0$; Zn: $\%3,0$; Mn: $\%0,35$ bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri görülmektedir. Çizelge 4.2'de Al: $\%8,5$; Zn: $\%0,4$; Mn: $\%0,25$ bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1. Al: %0,6; Zn: %0,3; Mn: %0,35 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri.

Karakteristikler	Dökümden çıkmış halde	Homogenleştirilmiş (70 sa 405°C'ta)	Tavlanmış (50 sa 165°C'ta)
R kg/mm ²	18	24.5	24.9
Y kg/mm ²	10	12	18.5
A %	4	8	2
Sertlik HB	55	56	77

Çizelge 4.2. Al: %8,5 ; Zn: %0,4 ; Mn: %0,25 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri.

Karakteristikler	Dökümden çıkmış halde	Homogenleştirilmiş (72 sa 380°C'ta)	Tavlanmış (500 sa 140°C'ta)
R kg/mm ²	18	26	28
Y kg/mm ²	10	11	15.3
A %	3	10	6
Sertlik HB	48	50	70

Homojenleştirme işlemleri başlıca dökme parçalara uygulanır, tamamlayıcı tav'a az başvurulur; şekillendirilmiş ürünlerde (saclar, profiller, dövme veya basma parçalar) genellikle bir rekristalizasyon ve gerilim giderme tavlamaıyla yetinilir.

Yukarıda sözü edilmiş ısıl işlemler, üç esas tipe indirgenir: Eriyik ısıl işlemi, çökeltme ya da yaşlandırma ve tavlama. Bunlara ek olarak homojenleştirme ve gerilim giderme işlemleri de uygulanmaktadır. Bunlardan ilki bir çökeltme tipi olup sonuncusu tavlama ile ilintilidir.

Eriyik ısıl işlemi, alaşım malzemesini, bazı bileşenlerin eriyik hale geldiği bir sıcaklığa ısıtıp bunları soğuma sırasında eriyik halde tutmak üzere daldırmaktan ibarettir.

Çok değişik bileşimde Mg alaşımları, alüminyumunkiler gibi sertleştirme ve yaşlandırmayla kuvvetlendirilebilirler. Alaşımların mukavemetlerini artırma

kabiliyeti, bileşenlerinin (Al, Zn, Zr vb.) sıcaklıkla magnezyum içinde eriyebilmede gösterdikleri değişikliğe bağlıdır. Isıtma, fazla fazların ($MgZn_2$, Al_3Mg_3 , $Mg_3Al_2Zn_2$, vb.) eritilmesine götürür. Sertleştirmeden sonra bir fazla doymuş katı eriyik elde edilir. Sonra alaşımı pekiştirici fazlar, yaşlandırmada çökelirler. Mg alaşımlarının bir özel niteliği, difüzyon sürecinin yavaşlığı olup dolayısıyla faz dönüşümleri de yavaş gelişir. Bu, sertleşme için (4-24 saat) ve yapay yaşlandırma için de (16-24 saat) uzun tutma sürelerini gerektirir. Bu aynı nedenle alaşımlar havada soğutarak (daldırarak) sertleştirilebilirler (genellikle daldırma için sıvı kullanılmaz). Birçok alaşım dökümleri, sıcak çalışmadan sonra havada soğutarak sertleştirilir. Dolayısıyla alaşımlar, onları önceden sertleştirmeden pekiştirilebilirler [56].

İngot döküm parçalar çoğunlukla 15-30 saat süreyle $400-420^{\circ}C$ 'de homojenleştirme tavlamasına, alaşım elementlerinin ayrılıp bir yerde toplanmalarını (segregasyon) yok etmek için tâbi tutulurlar.

Mg alaşımlarının homojenleştirilmelerinde tane sınırları boyunca çökelmiş olan fazlar erirler ve bileşim, tanenin bütün hacmi içinde eşitlenmiş olur. Bu durum mekanik çalışmayı kolaylaştırır ve mekanik özellikleri artırır.

Şekil değiştirme (yoğrulma) dan sonucu oluşan sertleşme, yaklaşık $350^{\circ}C$ 'de rekristalizasyon tavlamasıyla giderilir (alaşımların rekristalizasyon sıcaklığı $250-280^{\circ}C$ 'dir).

Döküm alaşımları $200-300^{\circ}C$ 'de yaşlandırılırlar (T_1). Oksitlenmeden kaçınmak için ısıtma, %0,7-1,0 SO_2 'li hava atmosferinde yürütülür. Azami mukavemet artışı etkisini elde etmek için, sertleştirmeyi $175-200^{\circ}C$ 'de bir yapay yaşlandırma takip eder.

Mg alaşımlarının yaşlandırılmasında nitelikler, Al alaşımlarında olduğundan daha az değişirler. Bu nedenle ısı işlem çoğunlukla, alaşımların mekanik niteliklerini iyileştiren homojenleştirmeye alaşımları mukavemetten ancak %20-35 mertebesinde kazanırlar. Alaşımların sünekliği ise bu işlemle azalmaktadır.

Homojenleştirme başlıca dökme alaşımların yüksek sıcaklıklarda çalışma sırasında şişmelerini önlemek ya da asgariye indirmek için uygulanır. Aynı zamanda gerilmeleri giderir ve sürünme mukavemetini artırır. Şişme esas itibariyle katı eriyikten çökelmiş bileşenlerin bir arada birikmelerinden meydana gelen hacim değişmesidir. Homojenleştirme işlemi bu birikmeyi, döküm parçanın yüksek sıcaklıkta hizmete girmesinden önce büyük ölçüde ortaya çıkardığından çalışma sırasında ancak ihmal edilebilecek miktarda şişme oluşur. Doğal yaşlandırma, Mg alaşımlarının içyapı ve niteliklerinde değiştirmez. Mg alaşımları, oda sıcaklığında çok yavaş yaşlanma sertleşmesine uğrarlar.

Şekillendirilmiş AZ31, AZ61 ve başka yüksek mukavemetli alaşımlardan oda sıcaklığı ya da hafifçe yüksek sıcaklıklarda oluşturulmuş parçalar, içte işleme gerilmeleri saklayabilirler. Bu da, bazı durumlarda, gerilme korozyonu çatlamasına götürebilir. Bunu önlemek için bu parçaların bir gerilim giderme ısı işlemine tâbi tutulmaları gerekir.

Bu amaçla 1 saatlik 150°C’de bir işlem etkin olur. 260°C ve daha yukarı sıcaklıkta oluşturulan parçalarda bu işleme gerek kalmaz, zira bunlarda bu gerilmeler çok düşük olur [55].

BÖLÜM 5

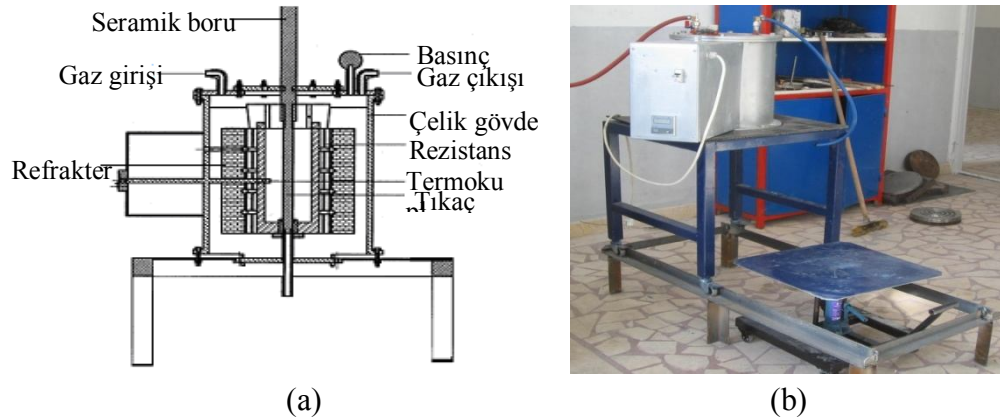
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. ATMOSFER KONTROLLÜ ERGİTME ÜNİTESİ

Günümüzde kara ve havacılıkta kullanılan Mg esaslı parçaların büyük oranın döküm yolu ile üretildiğinden döküm problemlerin çözümü ve alaşım geliştirme öncelikler oranında yer almaktadır. Bu bağlamda;

- 1) Alaşım elementlerinin etkisi
- 2) Isıl işlem uygulamaları
- 3) Sertlik incelemeleri
- 4) Mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

Mg alaşımlarının ergitilmesinde ve dökümünde Şekil 5.1’de görülen atmosfer kontrollü elektrikli direnç ocağı kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Deneysel atmosfer kontrollü ergitme ünitesi (a) kesit şekli (b) resmi.

Ergitme ocağı, dış gövdesi 340 mm çapında çelik malzemeden yapılmış ve iç kısmı 170 mm çapında refrakter tuğla ile kaplanmıştır. Tuğla ile çelik gövde arasında ısı yalıtımı için dolgu malzemesi kullanılmıştır. Ocak içi sıcaklığını ölçmek için ısıçift, ocak üst kapağına sızdırmazlık sağlamak için ise dairesel (“O” ring) conta yerleştirilmiştir. Yapılan ocak bir tezgâh üzerine monte edilmiştir.

5.2. ERGİTME VE ALAŞIMLAMA PRATIĞI

Magnezyum ve alaşımlarının ergitilmesi, ocağın içine yerleştirilen 3 kg Mg ergitme kapasiteli paslanmaz çelik potada yapılmıştır. Ergitme işleminde kullanılan paslanmaz çelik potanın tabanına, açma kapama kolu ile kontrol edilebilen ve sıvı metalin akacağı 15 mm çapında delikli sistem yapılmıştır. Kullanılan Paslanmaz çelik pota Şekil 5.2’de görülmektedir. Ergitme süresinde ocak içine koruyucu gaz verilerek malzemenin atmosfer ile teması kesilmiştir. Ergitme işlemi tamamlandıktan sonra potanın altından direkt olarak kalıba koruyucu gaz altında döküm yapılmıştır.

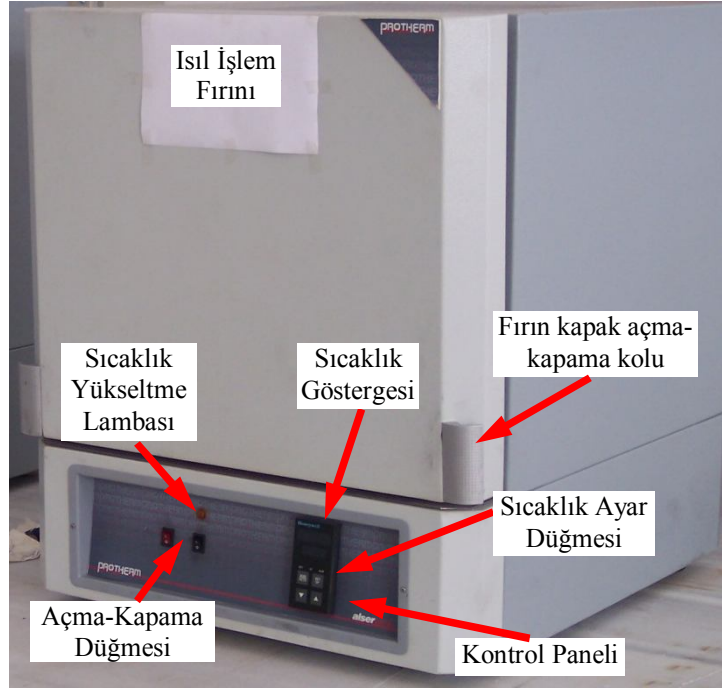


Şekil 5.2. Ergitme işleminde kullanılan çelik pota resmi.

Ocak sıcaklığı 850°C olarak seçilmiştir. Ocak istenilen sıcaklığa çıktıktan sonra yaklaşık 2 saat bekletilerek alaşımın döküm sıcaklığı olan 750°C’ye gelmesi sağlanmıştır. Ocak ve metal sıcaklığı daha önce kalibrasyonu yapılmıştır. Alaşım

döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra, ergitme ocağı açma kapama kolu vasıtası ile kontrollü olarak ergitme potasının tabanı açılarak sıvı metalin kalıba akması sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp sıcaklığı 250°C olarak seçilmiştir [54]. Döküm işlemi kalıba gaz verilerek yapılmıştır.

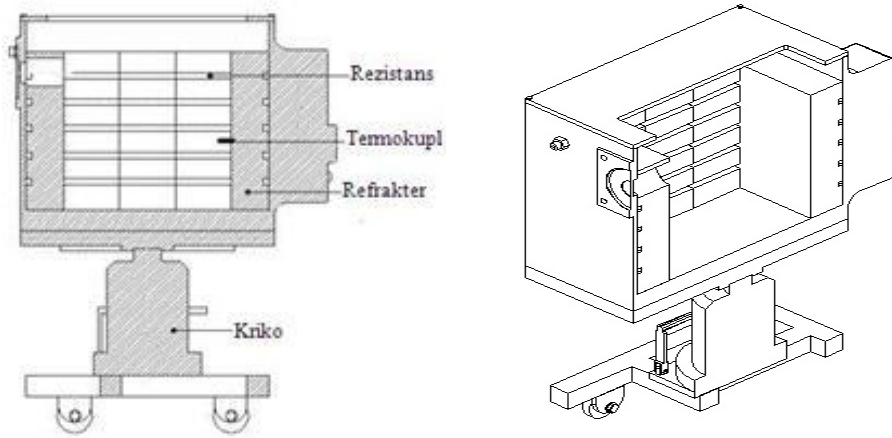
Deneysel çalışmalarda daha önce doktora çalışmasında uygulanan ocak ve kalıp atmosfer ortamları seçilmiştir. Buna göre ocak ortamında %99,9 saflıkta argon gazı, kalıp ortamında ise CO₂+%0,8 SF₆ gazı kullanılmıştır. Isıl işlem uygulamalarında kullanılan fırın resmi Şekil 5.3 de görülmektedir [54].



Şekil 5.3. Isıl işlem fırını.

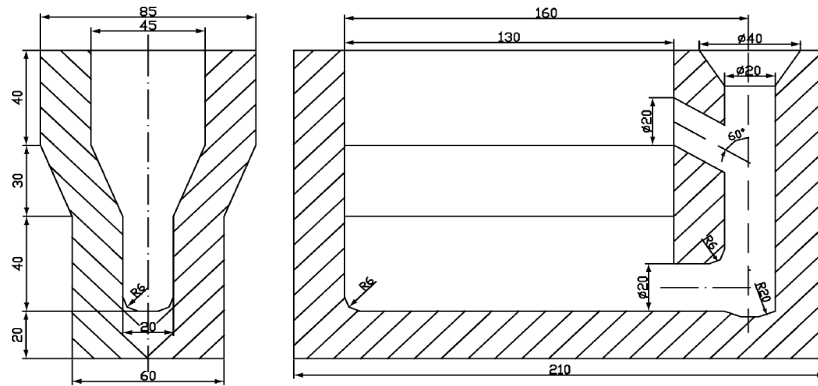
5.3. KALIP UYGULAMASI

Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıbı istenilen sıcaklığa çıkarmak için, sıcaklığı 300°C'ye çıkabilen kalıp ısıtma fırını kullanılmıştır. Kalıp ısıtma fırını, tekerlekli kriko sisteminin üzerine yerleştirilip, ergitme ocağının altına sürülerek fırın içindeki kalıba döküm yapılmıştır. Kullanılan fırının kesiti resmi Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Kalıp ısıtma fırını kesit şekli [54].

Deneysel çalışmalarda 250°C dereceye ısıtılan ve Şekil 5.5’de kesit resmi verilen kalıp kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Dökümlerde kullanılan metal kalıp kesit resmi.

5.4. MALZEME

Deneysel çalışmalarda, magnezyum alaşımlarının döküm yoluyla elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan AZ91 alaşımı seçilmiştir. AZ91 magnezyum alaşımının hazırlanmasında %99,8 saflıkta Mg ve Al kullanılmıştır. AZ91 alaşımına Bi, Sb, Sr ve Sn elementlerin ilavesi ile ön alaşımlar hazırlandı. Hazırlanan ön alaşımlar, ikinci bir ergitme yapılarak dökümler gerçekleştirildi. Daha sonra uygun şartlar altında homojenleştirme ve yaşlandırma ısıl işlem uygulamaları yapıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılan AZ91 Mg alaşımı ve ilave edilen alaşım elementlerinin % miktarları ile birlikte Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneyleerde kullanılan alaşımların analiz sonuçları.

Bileşim	Element miktarları (%)								
	Al	Zn	Mn	Bi	Sb	Sr	Sn	Diğer	Mg
AZ91	9,11	0,76	0,16	-	-	-	-	0,021	Kalan
AZ91+%0,2 Bi	9,20	0,75	0,18	0,21	-	-	-	0,018	Kalan
AZ91+%0,5 Bi	9,25	0,77	0,19	0,53	-	-	-	0,018	Kalan
AZ91+%1 Bi	9,17	0,71	0,17	1,03	-	-	-	0,011	Kalan
AZ91+%0,2 Sb	9,21	0,76	0,18	-	0,19	-	-	0,017	Kalan
AZ91+%0,5 Sb	9,18	0,74	0,17	-	0,51	-	-	0,015	Kalan
AZ91+%1 Sb	9,15	0,69	0,19	-	1,02	-	-	0,0012	Kalan
AZ91+%0,2 Sr	9,20	0,75	0,18	-	-	0,22	-	0,018	Kalan
AZ91+%0,5 Sr	9,23	0,77	0,20	-	-	0,52	-	0,018	Kalan
AZ91+%1 Sr	9,17	0,71	0,17	-	-	1,01	-	0,011	Kalan
AZ91+%0,2 Sn	9,21	0,76	0,18	-	-	-	0,19	0,017	Kalan
AZ91+%0,5 Sn	9,19	0,73	0,17	-	-	-	0,51	0,015	Kalan
AZ91+%1 Sn	9,16	0,68	0,19	-	-	-	1,02	0,0012	Kalan

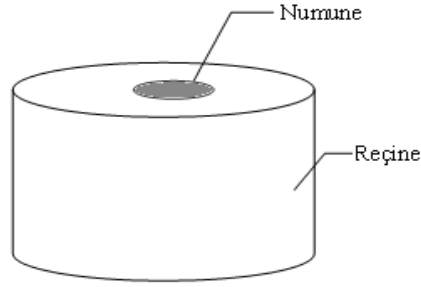
5.5. ISIL İŞLEM UYGULAMASI

20x50x80 ebatlarında kesilmiş deney numuneleri homojen ısı iletimi sağlanabilmesi amacıyla alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Kaplanan bu numuneler silis kumu ve grafit tozu karışımına gömülerek dışarı ile teması tamamen kesilmiştir. Belirlenen sıcaklık ve zaman aralıklarında, homojenleştirme ve yaşlandırma işlemi için fırında bekletilmiştir.

Homojenleştirme ısıl işlem uygulamasında ocak sıcaklığı 420°C olarak seçilmiştir. Bu sıcaklıkta malzeme 48 saat süre ile bekletildikten sonra suda soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulaması için 210°C'de 3 farklı saat seçilmiştir (8, 16, 32 saat). Yaşlandırma işleminden sonra malzeme oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

5.6. MİKROYAPI VE SERTLİK ÇALIŞMALARI

Dökümü yapılan alaşımların mikroyapı numuneleri 10x10x10 mm boyutlarında çıkartılarak bakalite alınmıştır. Metalografik incelemeleri yapılmak üzere numunelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600 ve 800 mesh zımparalar ile saf su kullanılarak zımparalama ve 1µm alümina pasta kullanılarak polisaj keçesinde parlatılmıştır. Daha sonra numunelerin yüzeyi saf su ve alkol ile yıkayıp kurutulmuştur. Numuneler %75 etilen glikol, %24 saf su, %1 HNO₃ solüsyonu ile dağlanmıştır. Mikroyapı çalışmalarında farklı alaşımların ısıtma işlem öncesi ve ısıtma işlem sonrası mikroyapı resimleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Laboratuvarındaki Nikon Epiphot marka optik metal mikroskopunda görüntüleri alınmıştır. SEM çalışmaları ise Bilecik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Şekil 5.6'de bakalite alınmış mikroyapı ve sertlik numunesi görülmektedir.



Şekil 5.6. Mikroyapı ve sertlik numunesi.

Sertlik deneyi numuneleri (Şekil 5.6) döküm bölgelerinin merkezlerinden çıkartılarak yüzeyleri zımparalanarak parlatılmıştır. Sertlik deneylerinde Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Laboratuvarındaki FV 700 model FUTURE-TEHCOPP marka dijital VICKERS sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. 1 mm çaplı elmas kare piramit uç ve 5 N yük uygulanmış ve Vickers cinsinden sertlik değerleri elde edilmiştir. Numunelere sertlik deneyi uygulanırken numunenin ölçüm yapılabilecek en dış noktasından merkezine kadar eşit aralıklar da 5 farklı nokta belirlenmiş ve belirlenen bu noktalardan sertlik ölçümü yapıp değerlerin ortalamaları alınmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan parametreler ve yapılan testler Çizelge 5.2'de ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 5.2. Deney parametreleri ve testleri.

Alaşım	Isıl İşlem Öncesi				Isıl İşlem Sonrası						
	Mikroyapı	SEM	EDS Analizi	Sertlik	Mikroyapı	SEM			EDS Analizi	Sertlik	
						Homj	8 Saat	16 Saat			32 Saat
AZ91	X	X	X	X	X	X					X
AZ91 %0,2 Bi	X	X		X	X	X		X	X		X
AZ91 %0,5 Bi	X			X	X						X
AZ91 %1 Bi	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
AZ91 %0,2 Sb	X	X		X	X	X		X	X		X
AZ91 %0,5 Sb	X			X	X						X
AZ91 %1 Sb	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
AZ91 %0,2 Sr	X	X		X	X	X		X	X		X
AZ91 %0,5 Sr	X			X	X						X
AZ91 %1 Sr	X	X		X	X	X		X	X	X	X
AZ91 %0,2 Sn	X	X		X	X	X		X	X		X
AZ91 %0,5 Sn	X			X	X						X
AZ91 %1 Sn	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

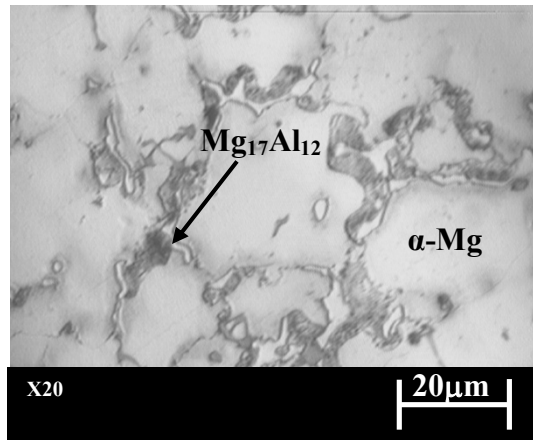
6.1. MİKROYAPI SONUÇLARI

AZ91 alaşımı ve ilave elementlerine göre ısıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası mikro yapı sonuçları iki farklı gözlem tekniği ile aşağıda iki alt bölümde verilmiştir. Bu gözlem tekniklerinde optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri şeklindedir. Isıtılma işlem öncesi ve ısıtılma işlem sonrası bütün alaşımların optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri ise AZ91'e %0,2 ve %1 ilaveli alaşımlardan tespit edilmiştir.

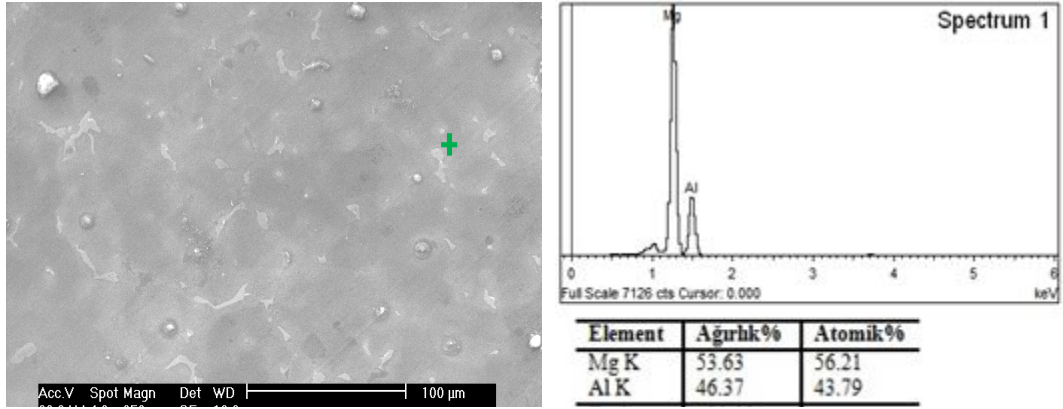
6.1.1. AZ91 Alaşımı

6.1.1.1. Isıtılma İşlem Öncesi

AZ91 alaşımının ısıtılma işlem öncesi optik mikroskop görüntüsü Şekil 6.1'de, SEM görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1. AZ91 alaşımının mikroyapı görüntüsü.

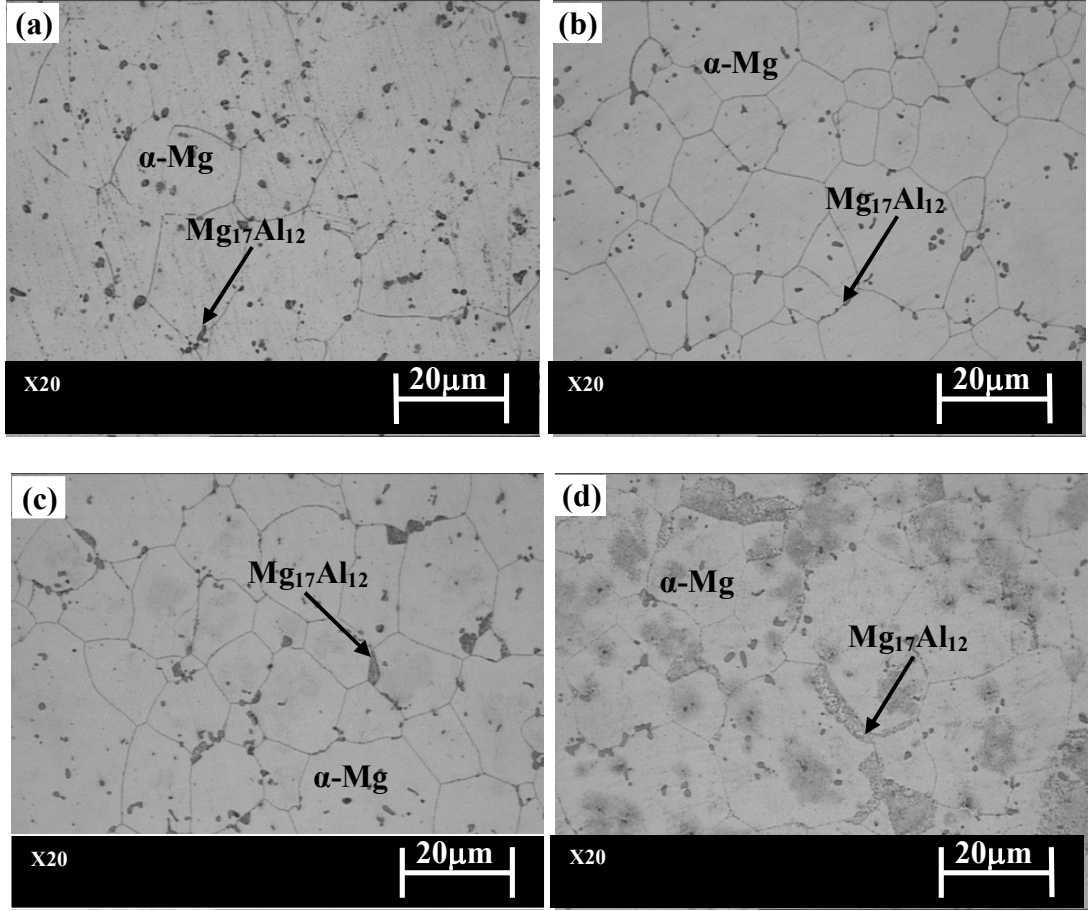


Şekil 6.2. AZ91 alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi.

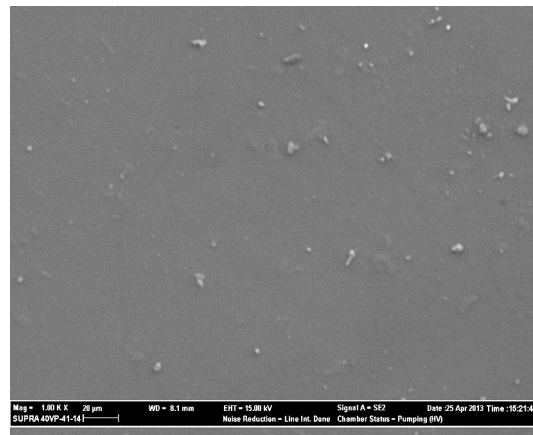
AZ91 alaşımının mikroyapısı (Şekil 6.1 ve 6.2) incelendiğinde tipik dentritik bir yapıya sahip olduğu ve yapı genelde α -Mg matris fazından oluştuğu, α -Mg fazının yanı sıra diğer fazların tane sınırları boyunca dağıldığı gözlenmiştir. Tane sınırlarından alınan noktasal EDS analizi Al ve Mg elementlerinin varlığını ortaya çıkarmıştır.

6.1.1.2. Isıl İşlem Sonrası

Homojenleştirme ve yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış AZ91 alaşımının optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.3’de, SEM görüntüsü Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının mikroyapı görüntüleri a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



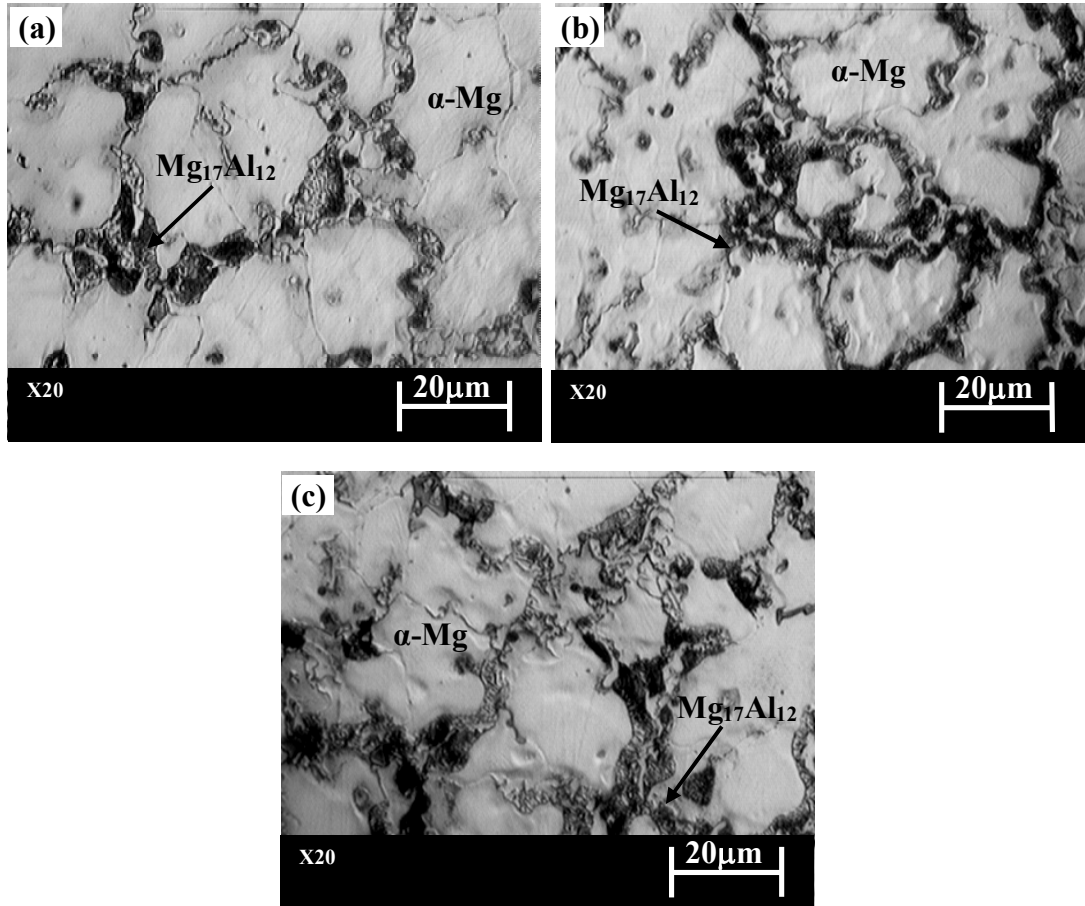
Şekil 6.4. Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının homojenleştirme SEM görüntüsü.

AZ91 alaşımı homojenleştirme işleminden sonra yapının döküm sonrası düzensiz oluşmuş β intermetalik fazın matris içinde çözüldüğü ve yapının homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tane sınırları da belirgin hale gelmiştir.

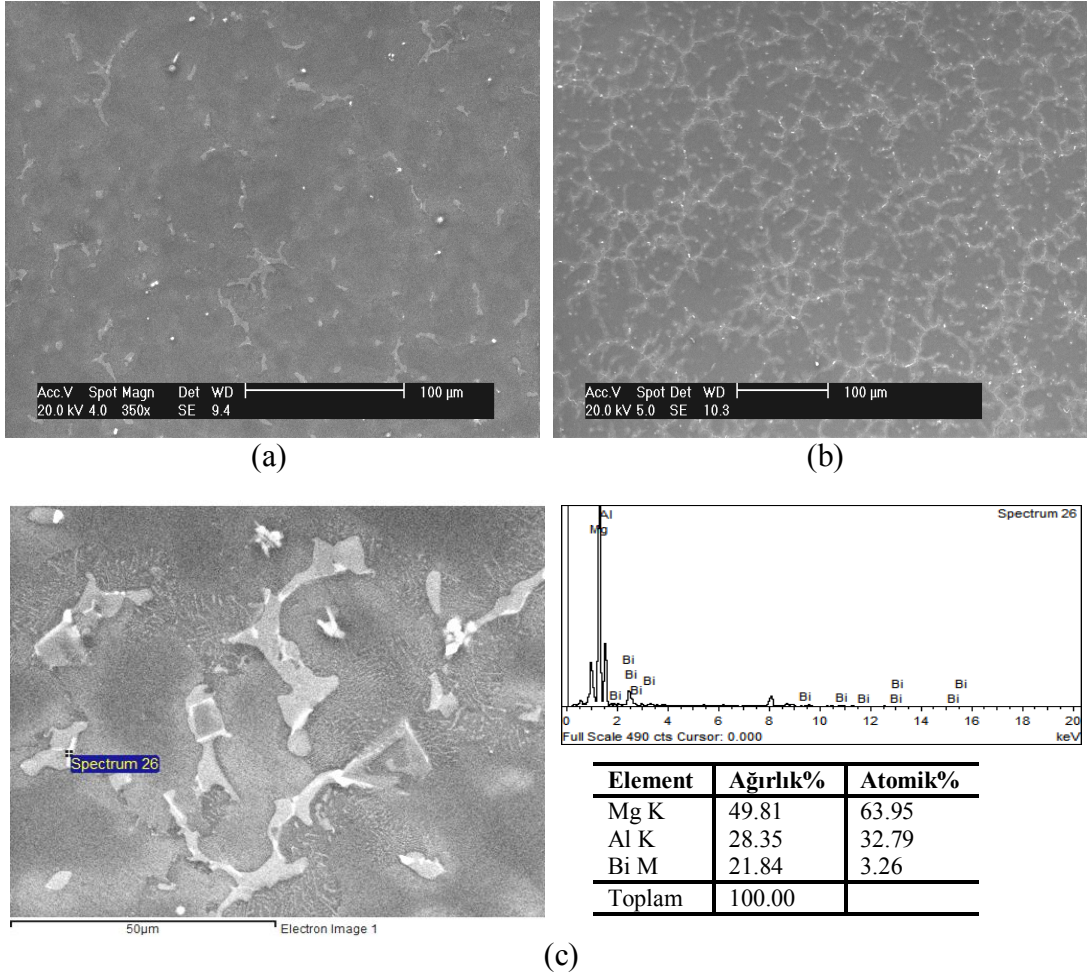
6.1.2. AZ91+Bi Alaşımı

6.1.2.1. Isıl İşlem Öncesi

AZ91 alaşımına Bi ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.5'de, SEM görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.5. AZ91+Bi alaşımının mikroyapı görüntüleri a) AZ91+%0,2 Bi, b) AZ91+%0,5 Bi c) AZ91+%1 Bi.

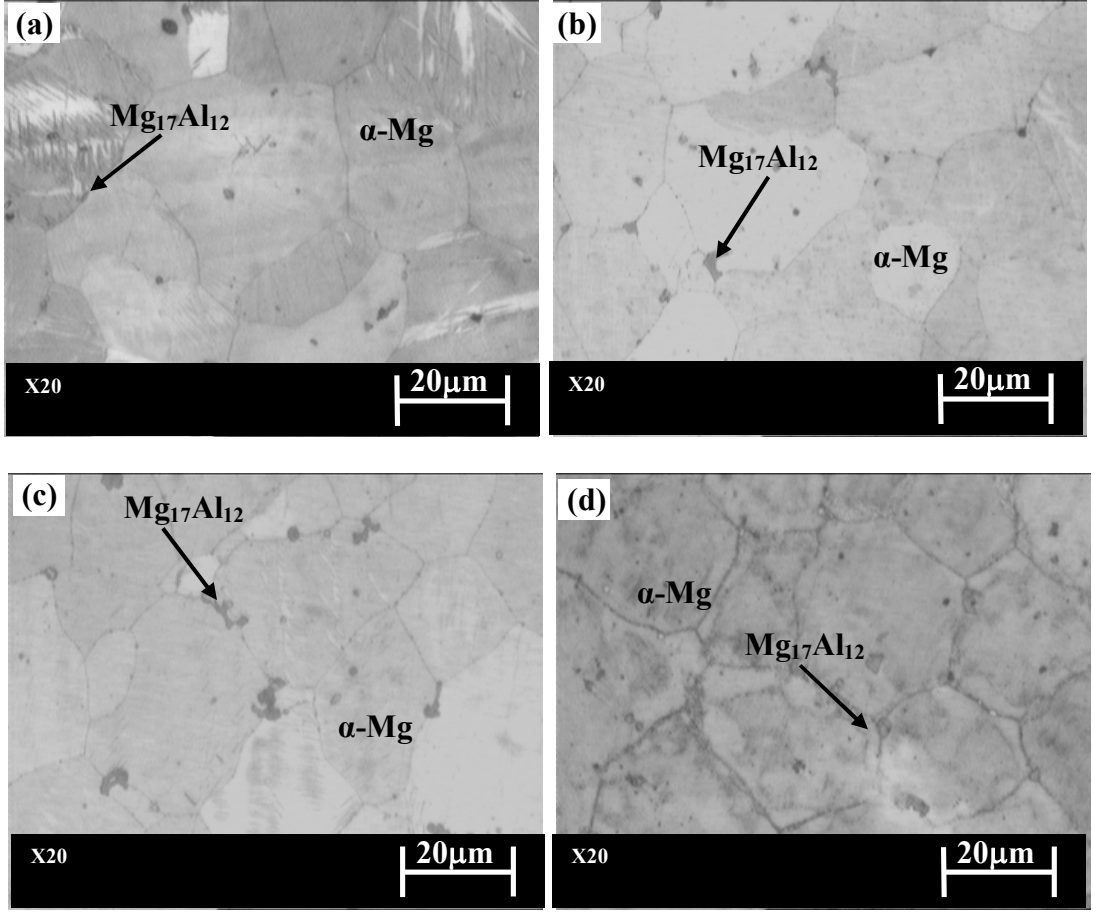


Şekil 6.6. AZ91+Bi alaşımının SEM görüntüleri a) AZ91+%0,2 Bi, b) AZ91+%1 Bi, c) AZ91+%1 Bi alaşımının EDS analizi

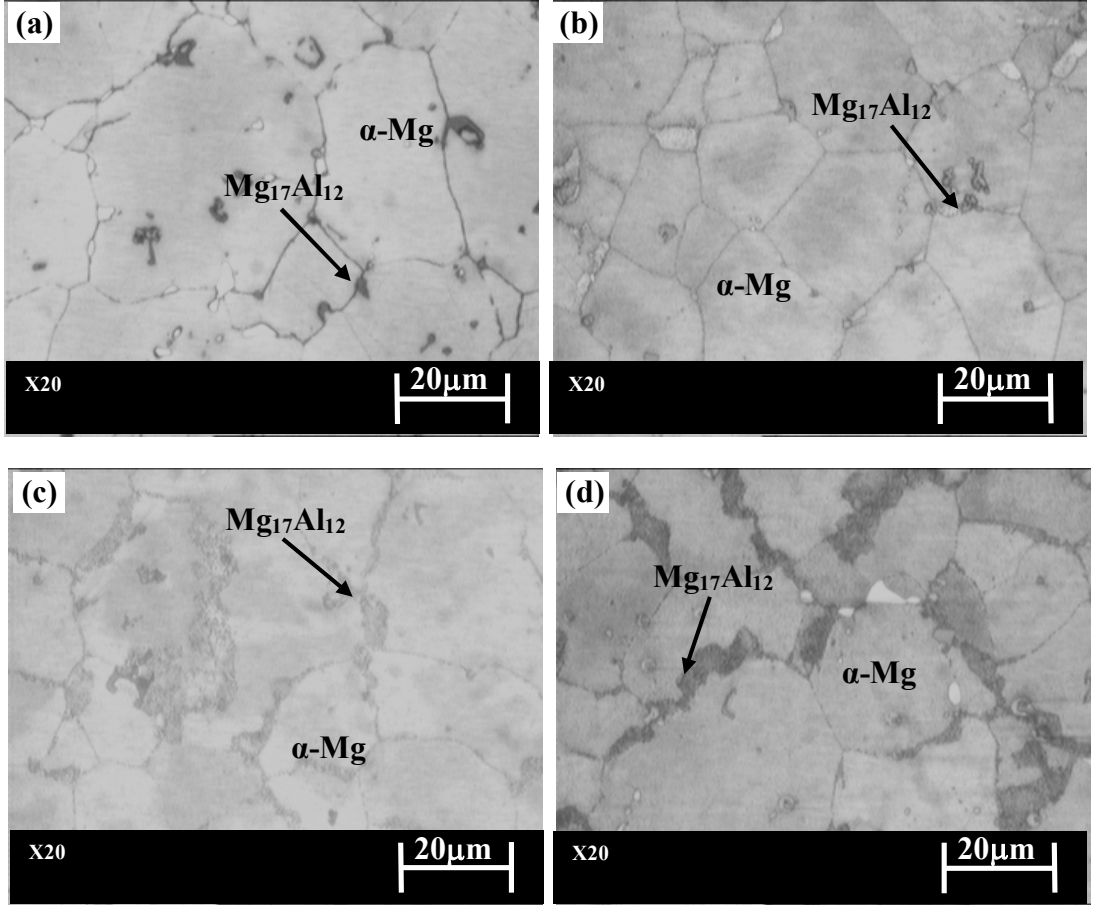
AZ91 alaşımına Bi ilavesiyle mikro yapıda belirgin bir değişim gözlenmektedir. Alaşımda artan Bi miktarı ile birlikte yapıda β intermetalik fazının oluştuğu ve bu faz çevrelerinde ötektik fazın belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere yapılan noktasal EDS analizi sonucu Mg, Al ve bu elementlere ilave olarak Bi elementinin varlığı gözlenmiştir.

6.1.2.2. Isıl İşlem Sonrası

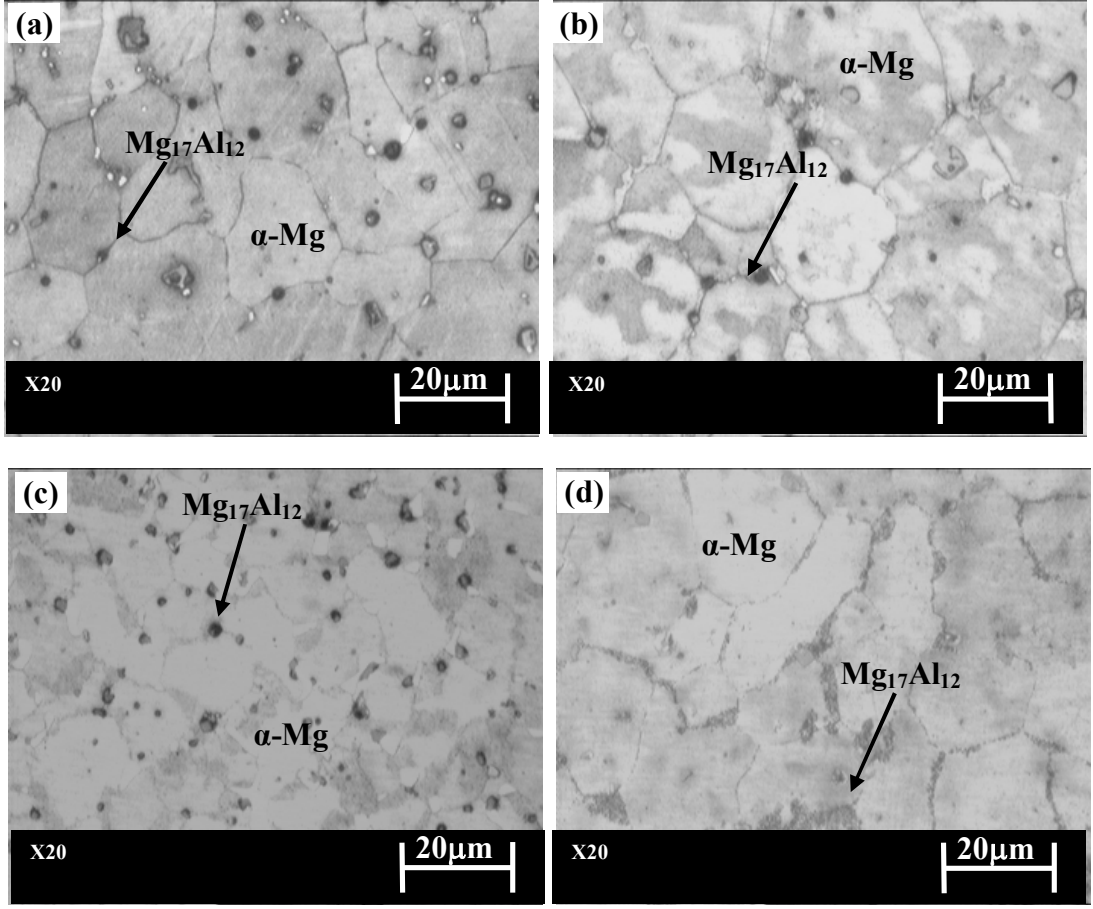
Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımına Bi ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.7-6.9'da, SEM görüntüleri ise Şekil 6.10 ve 6.11'de verilmiştir.



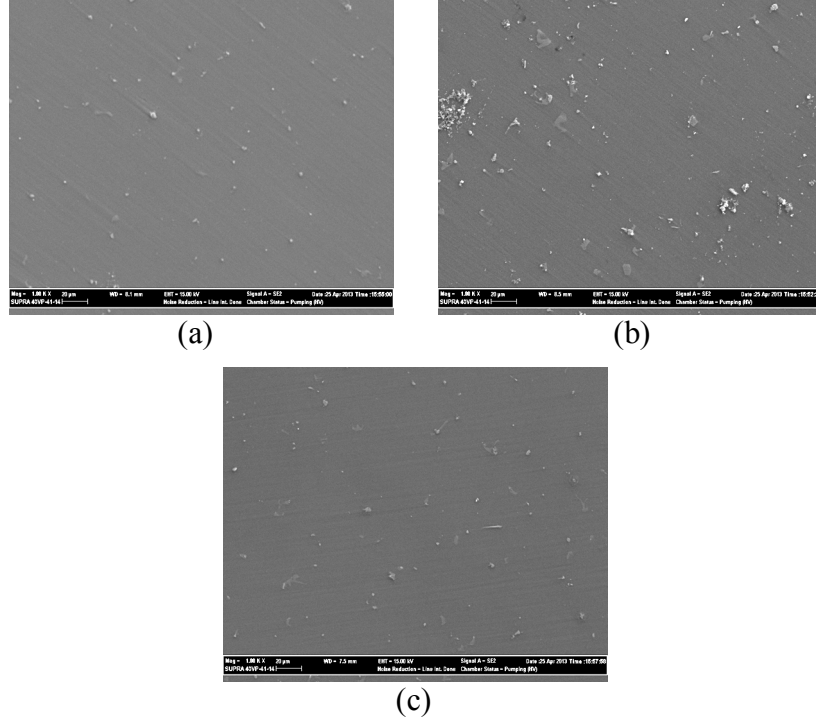
Şekil 6.7. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,2 Bi alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



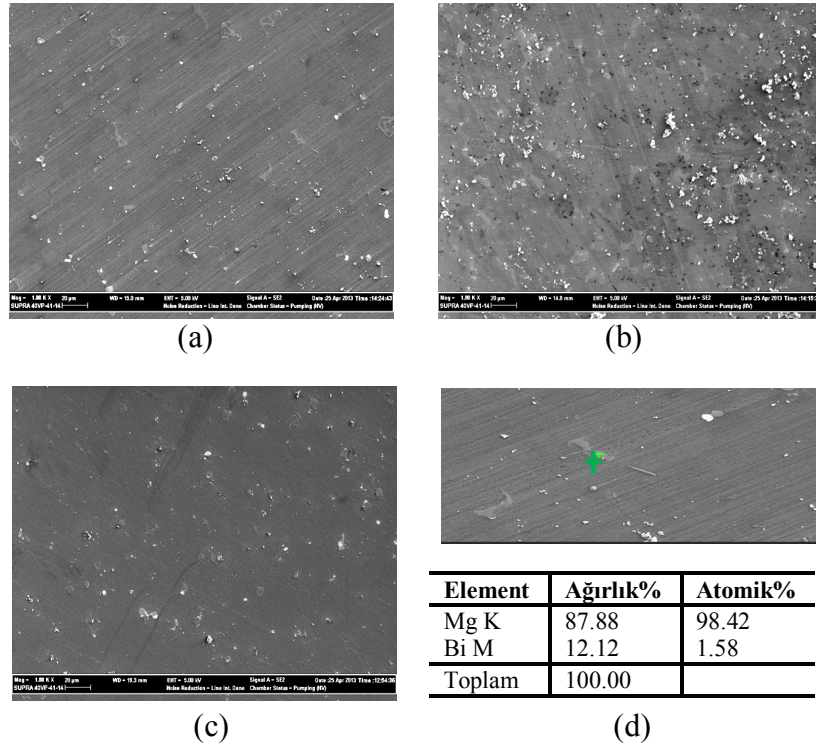
Şekil 6.8. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %0,5 Bi alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.9. Isıl işlem uygulanmış AZ91 + %1 Bi alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.10. Isıl işlem uygulanmış AZ91+0,2 Bi alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat).



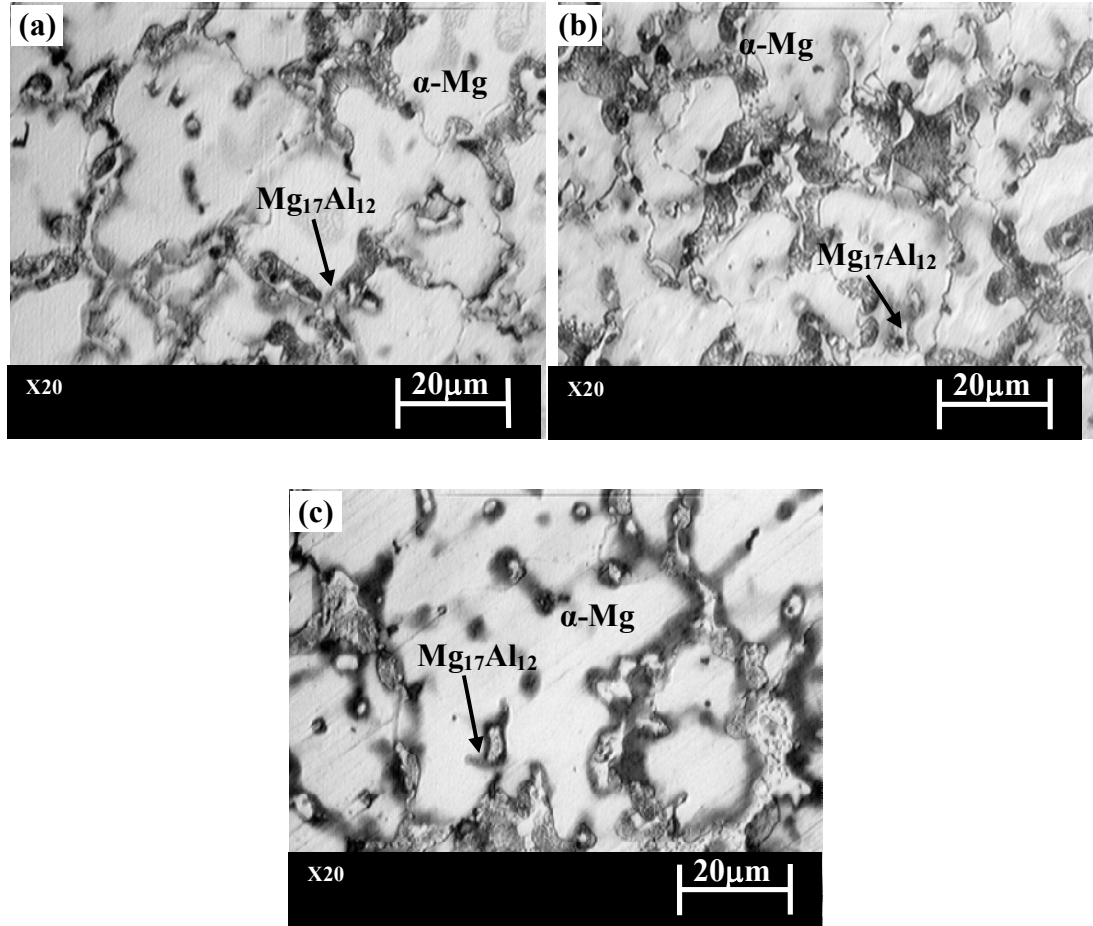
Şekil 6.11. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Bi alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat), d) AZ91+%1 Bi alaşımının EDS analizi.

AZ91+Bi ilaveli alaşımların homojenleştirme ısı işleminden sonra yapının, döküm yapısında düzensiz oluşmuş β intermetalik fazın matris içinde çözüldüğü ve yapının homojen hale geldiği gözlenmektedir. Ayrıca tane sınırlarının da belirgin olduğu gözlenmiştir. Artan Bi miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazında kabalaşma görülmektedir. Buna ilave olarak yaşlandırma ısı işlemi sonucunda ikincil fazın (Mg₃Bi₂) daha da kabalaştığı gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası yapılan β intermetalik bölgesinden alınan EDS analizinde Bi elementinin varlığı gözlenmiştir. Artan yaşlandırma süresi ile çökelti oluşumunda da kabalaşmalar görülmektedir.

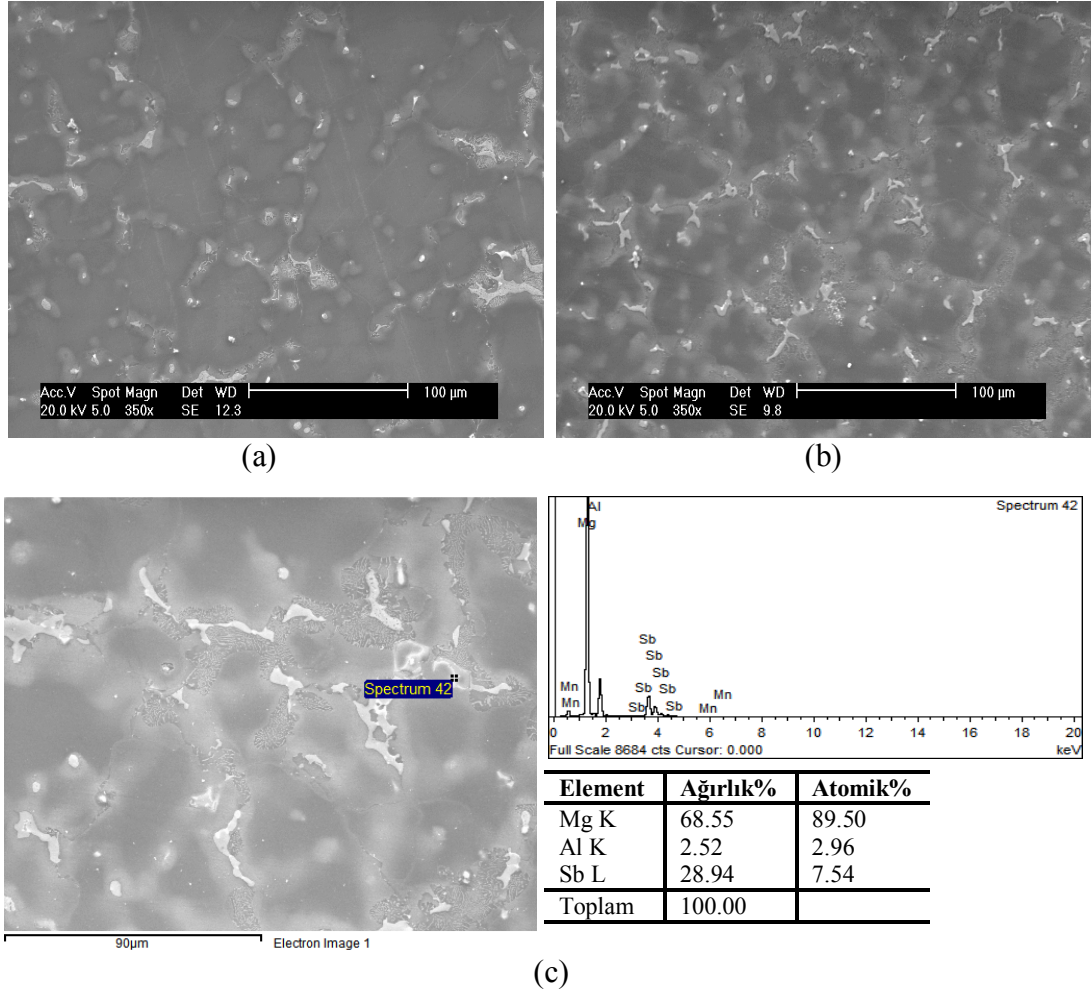
6.1.3. AZ91+Sb Alaşımı

6.1.3.1. Isıl İşlem Öncesi

AZ91 alaşımına Sb ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.12’de, SEM görüntüleri Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.12. AZ91+Sb alaşımının mikroyapı görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sb, b) AZ91+%0,5 Sb, c) AZ91+%1 Sb.

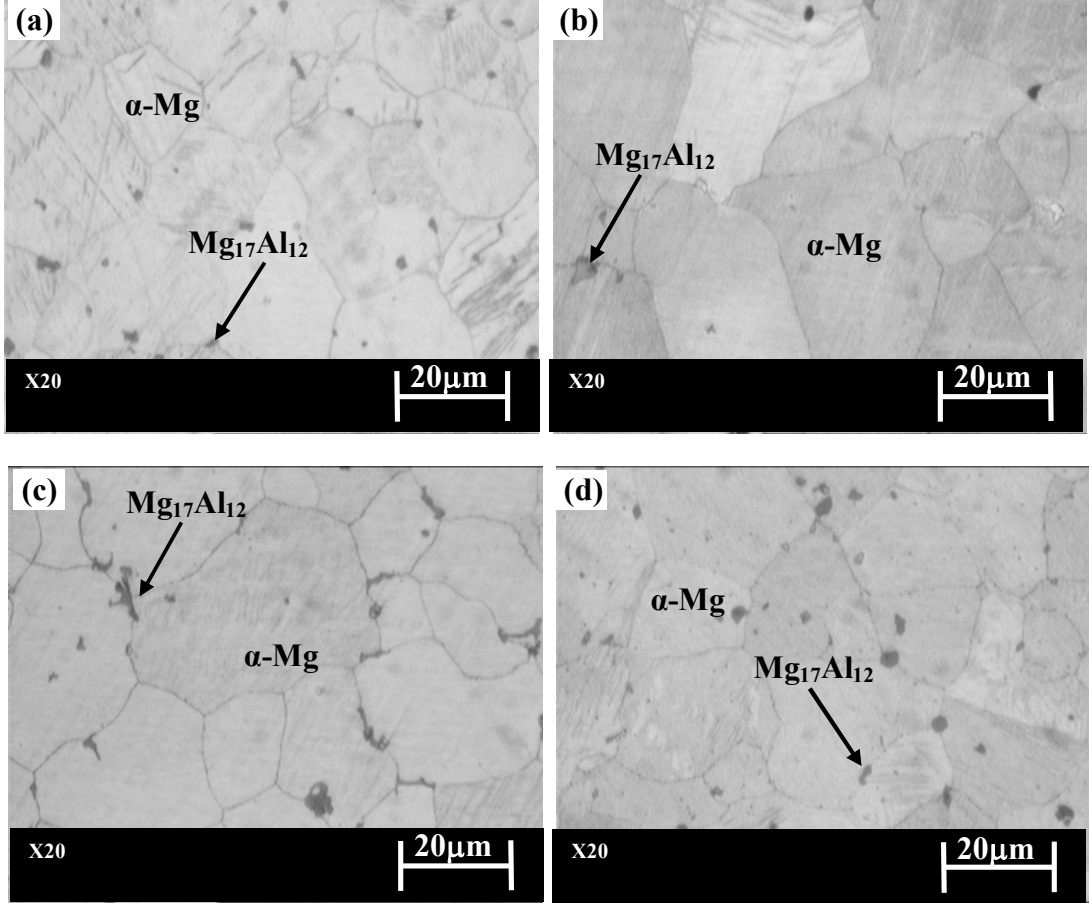


Şekil 6.13. AZ91+Sn alaşımlarının SEM görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sn, b) AZ91+%1 Sn, c) AZ91+%1 Sn alaşımlarının EDS analizi.

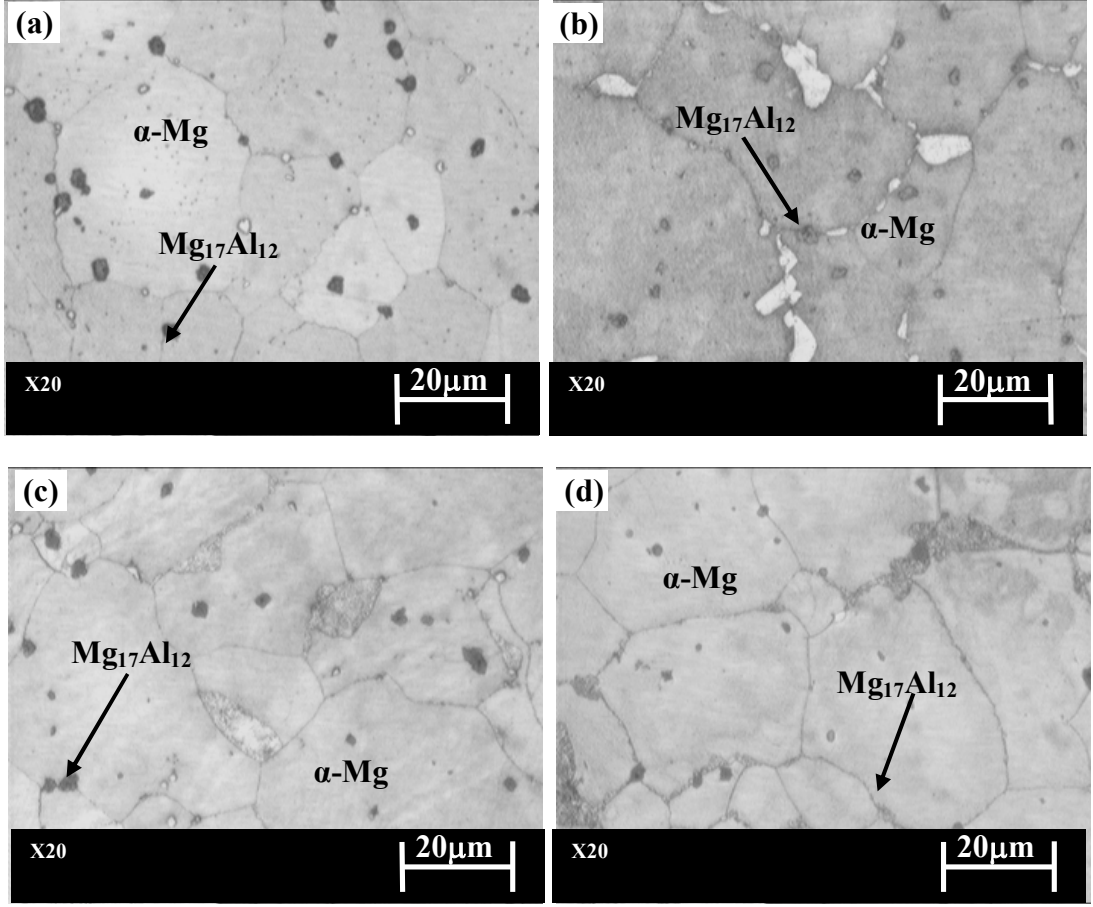
AZ91 alaşımına Sn ilavesiyle mikro yapıda belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Alaşımda artan Sn miktarı ile birlikte yapıda β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının oluştuğu ve bu faz çevrelerinde ötektik fazın belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Şekil 6.13'de görüldüğü üzere yapılan noktasal EDS analizi sonucu Mg, Al ve bu elementlere ilave edilen Sn elementinin varlığı gözlenmiştir.

6.1.3.2. Isıl İşlem Sonrası

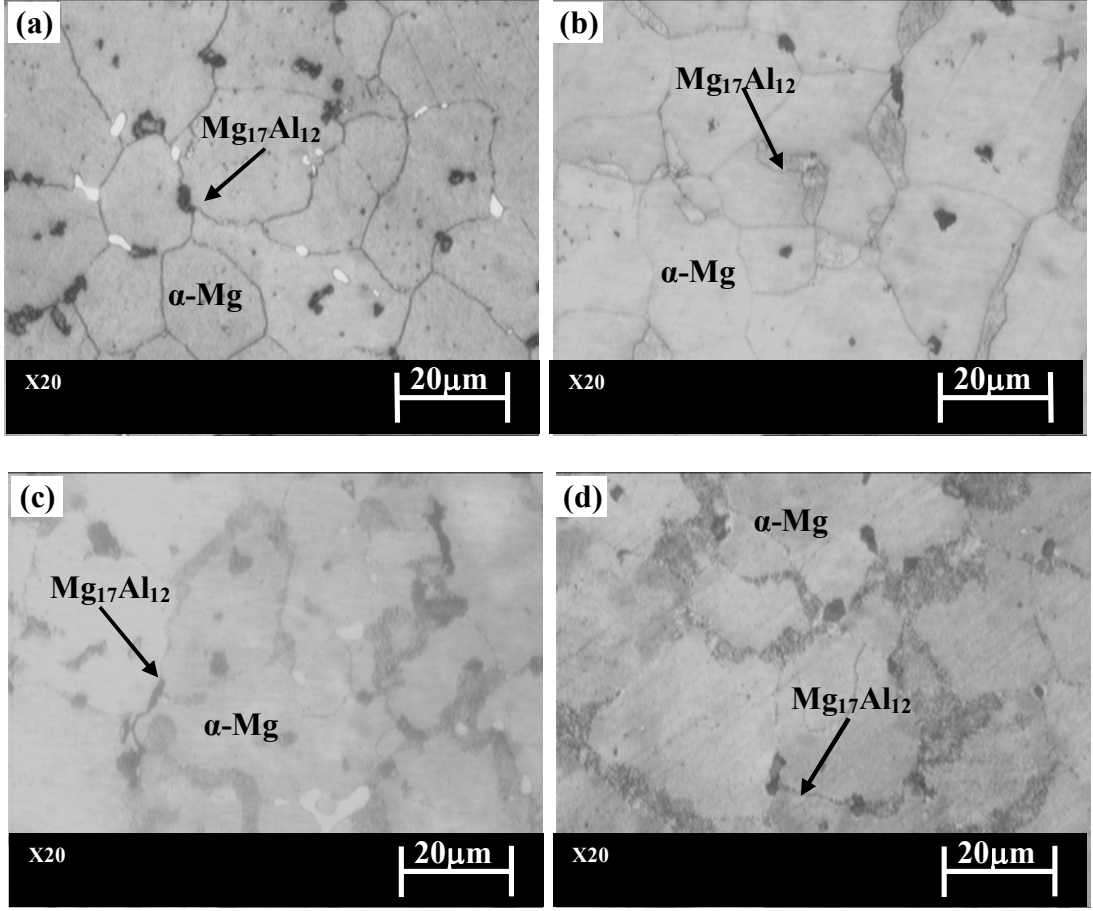
Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımına Sb ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.14-6.16'da, SEM görüntüleri ise Şekil 6.17 ve 6.18'de verilmiştir.



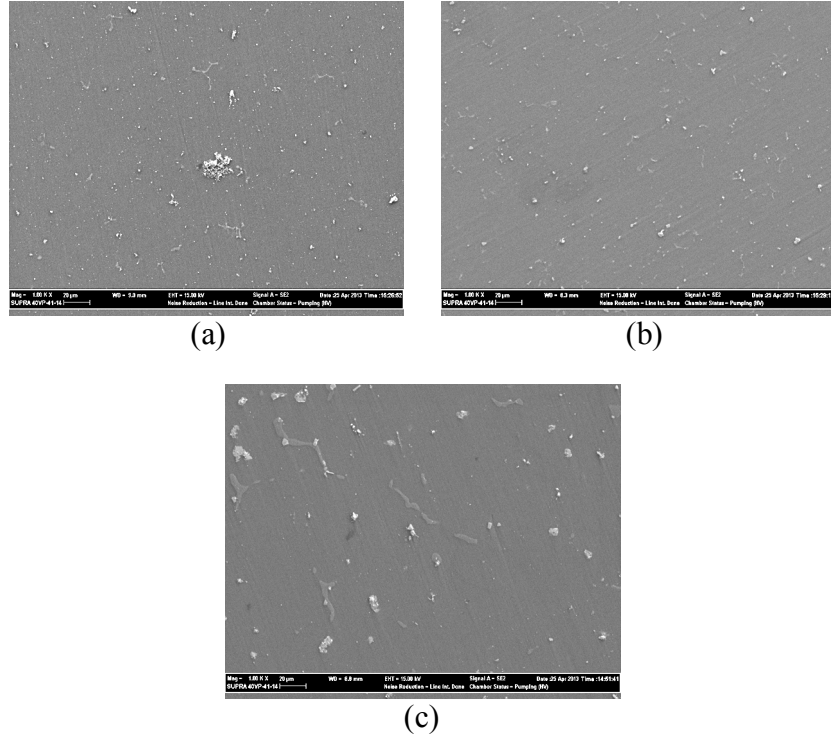
Şekil 6.14. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sb alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



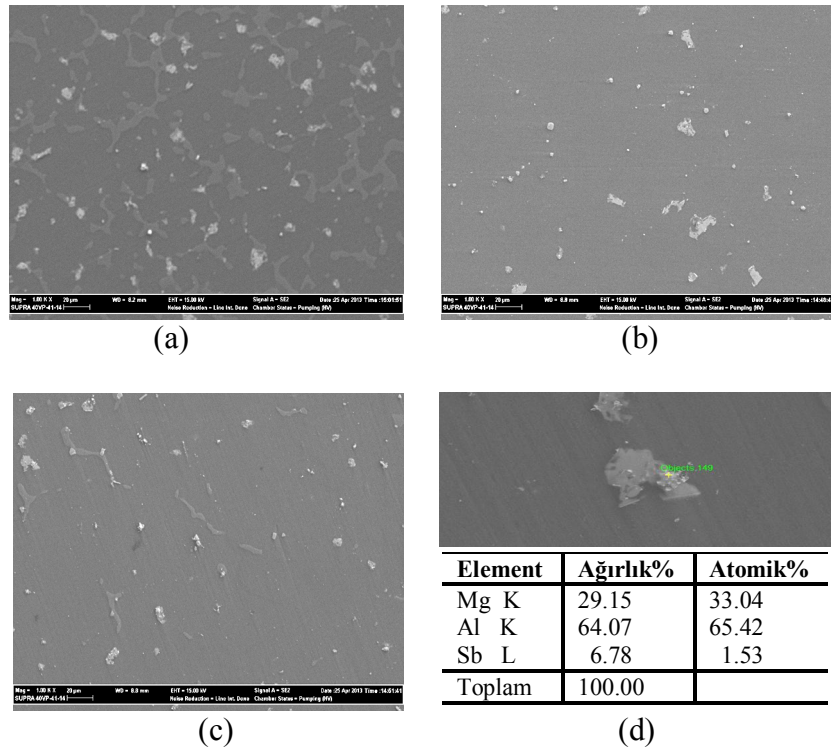
Şekil 6.15. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,5 Sb alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.16. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Sb alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.17. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sb alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat).



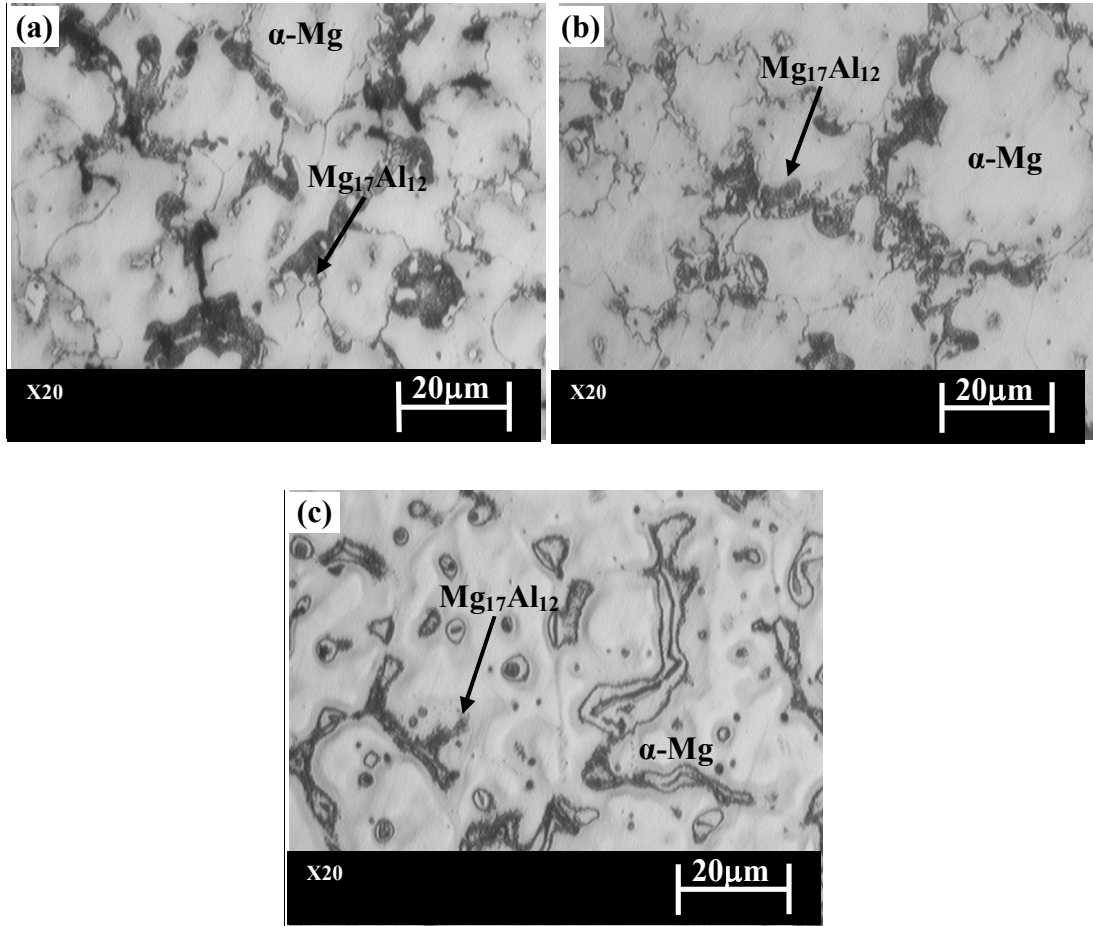
Şekil 6.18. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Sb alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat), d) AZ91+%1 Sb alaşımının EDS analizi.

AZ91+Sb ilaveli alaşımların homojenleştirme ısıl işleminden sonra yapının döküm haline göre düzensiz oluşmuş β intermetalik fazın α matris içinde çözüldüğü ve yapının homojen hale geldiği gözlenmektedir. Ayrıca tane sınırlarının da belirgin olduğu gözlenmiştir. Artan Sb miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β intermetalik fazında kabalaşma görülmektedir. Buna ilave olarak yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda ikincil fazın daha da kabalaştığı gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası yapılan EDS analizinde β intermetalik bölgesinde Sb elementinin varlığı gözlenmiştir. Artan yaşlandırma süresi ile çökelti oluşumunda da kabalaşmalar görülmektedir.

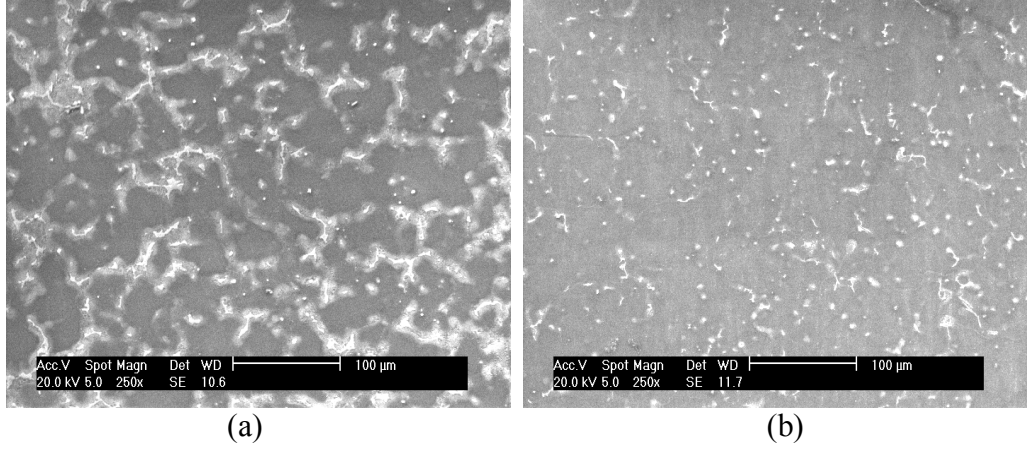
6.1.4. AZ91+Sr Alaşımı

6.1.4.1. Isıl İşlem Öncesi

AZ91 alaşımına Sr ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.19'da, SEM görüntüleri Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.19. AZ91+Sr alaşımının mikroyapı görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sr, b) AZ91+%0,5 Sr, c) AZ91+%1 Sr.

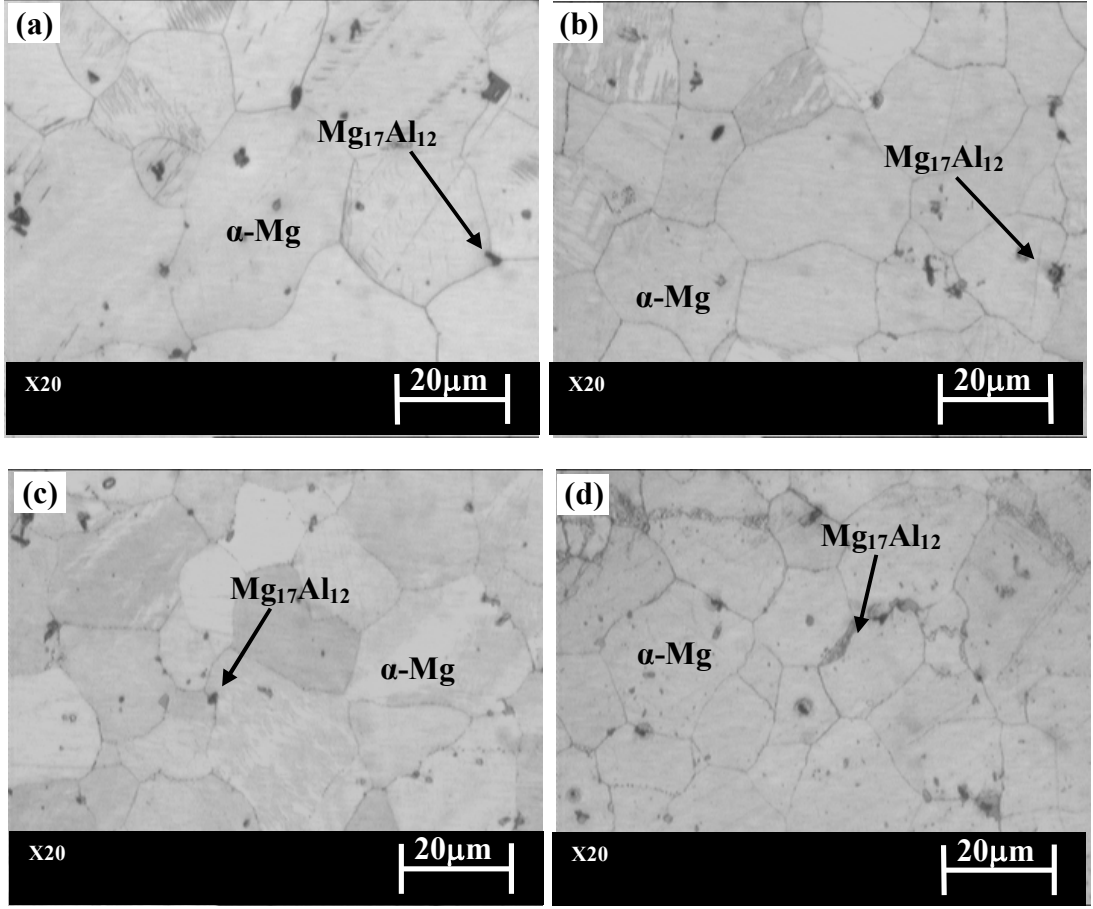


Şekil 6.20. AZ91+Sr alaşımlarının SEM görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sr, b) AZ91+%1 Sr.

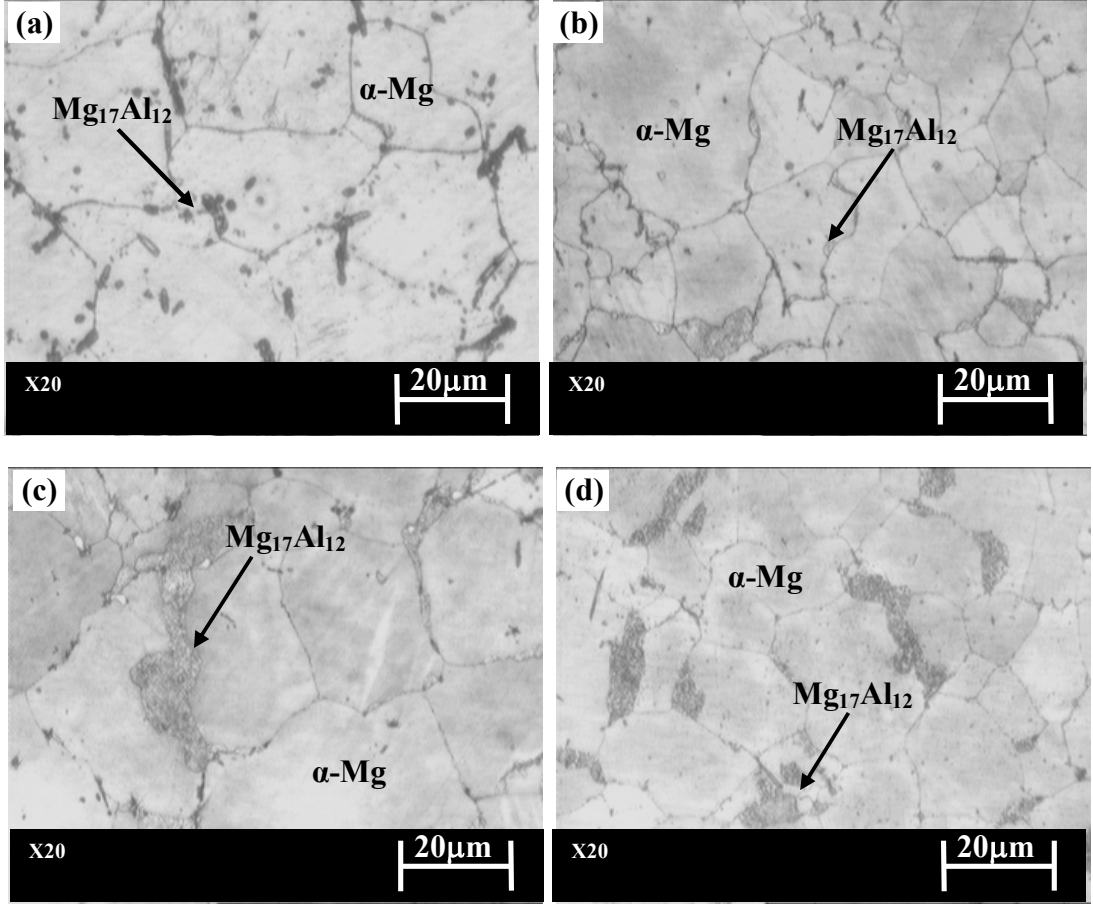
AZ91 alaşımına Sr ilavesiyle mikro yapıda belirgin bir değişim gözlenmektedir. Alaşımda artan Sr miktarı ile birlikte yapıda β intermetalik fazının oluştuğu ve bu faz çevrelerinde ötektik fazın belirgin hale geldiği gözlenmiştir.

6.1.4.2 Isıl İşlem Sonrası

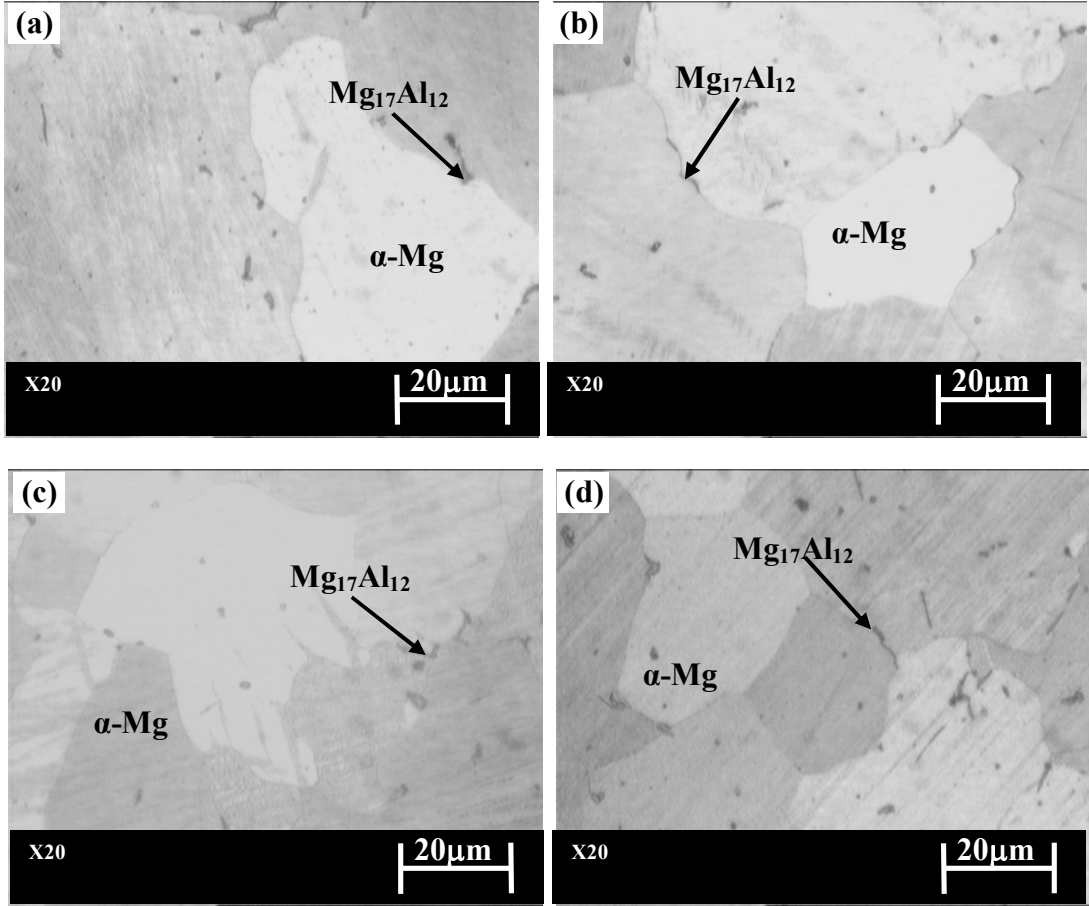
Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımına Sr ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.21-6.23'de, SEM görüntüleri ise Şekil 6.24 ve 6.25'de verilmiştir.



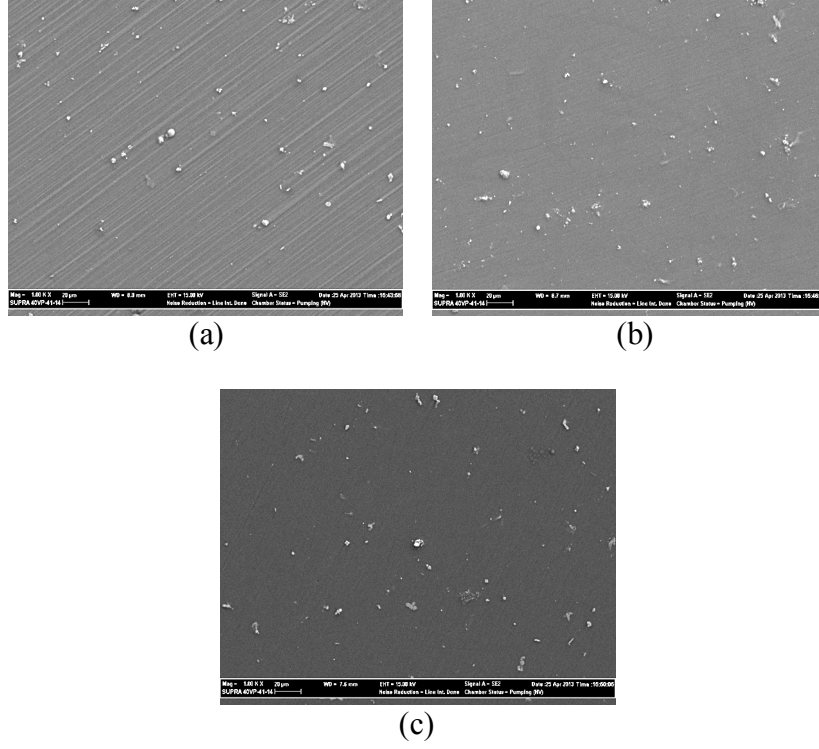
Şekil 6.21. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sr alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



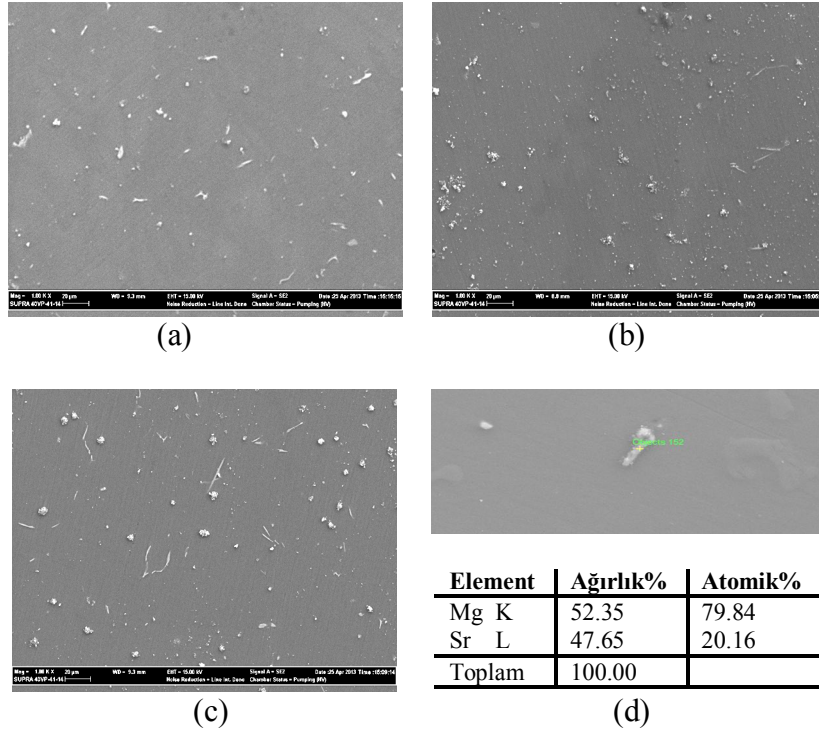
Şekil 6.22. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,5 Sr alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.23. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Sr alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.24. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sr alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat).



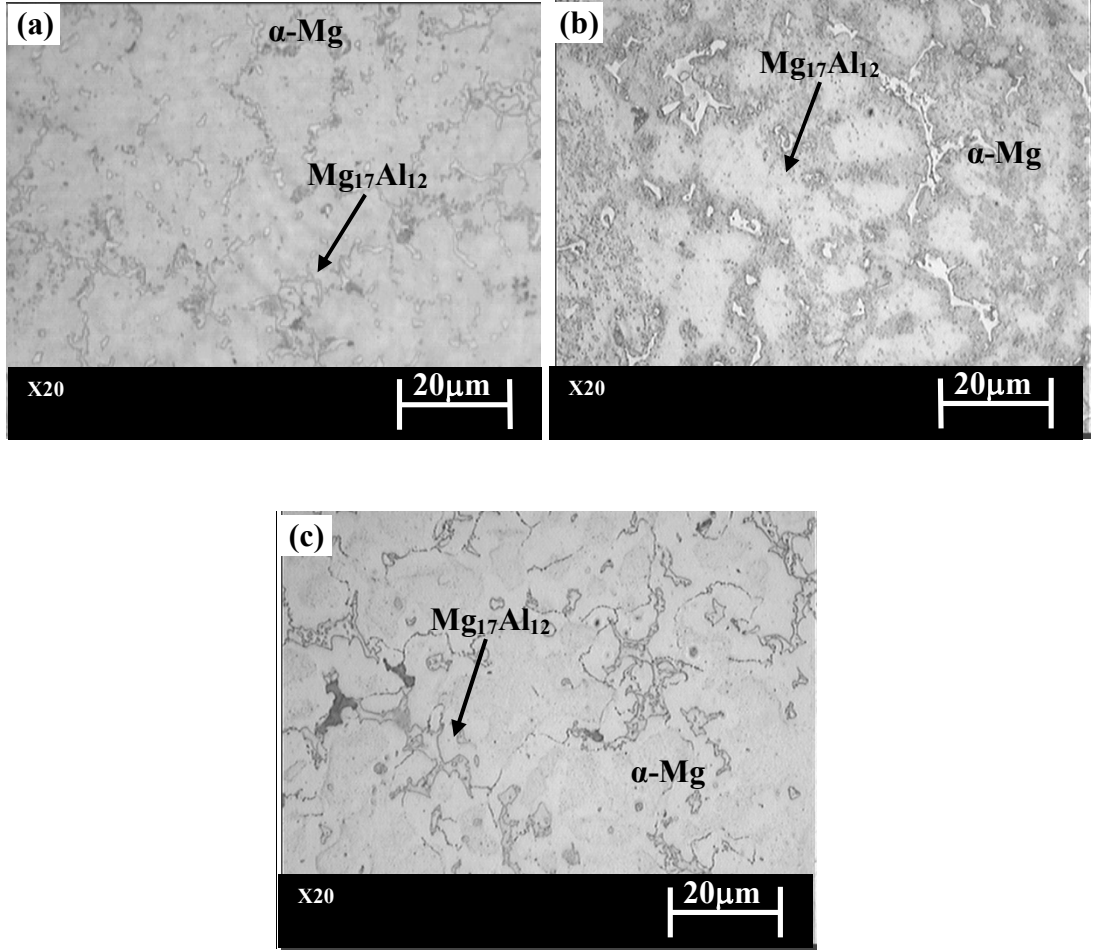
Şekil 6.25. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Sr alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat), d) AZ91+%1 Sr alaşımının EDS analizi.

AZ91+Sr ilaveli alaşımların homojenleştirme ısı işleminden sonra yapının döküm haline göre düzensiz oluşmuş β intermetalik fazın α matris içinde çözüldüğü ve yapının homojen hale geldiği gözlenmektedir. Ayrıca tane sınırlarının da belirgin olduğu gözlenmiştir. Artan Sr miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β intermetalik fazında kabalaşma görülmektedir. Buna ilave olarak yaşlandırma ısı işlemi sonucunda ikincil fazın daha da kabalaştığı gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası yapılan EDS analizinde β intermetalik bölgesinde Sr elementinin varlığı gözlenmiştir. Artan yaşlandırma süresi ile çökelti oluşumunda da kabalaşmalar görülmektedir.

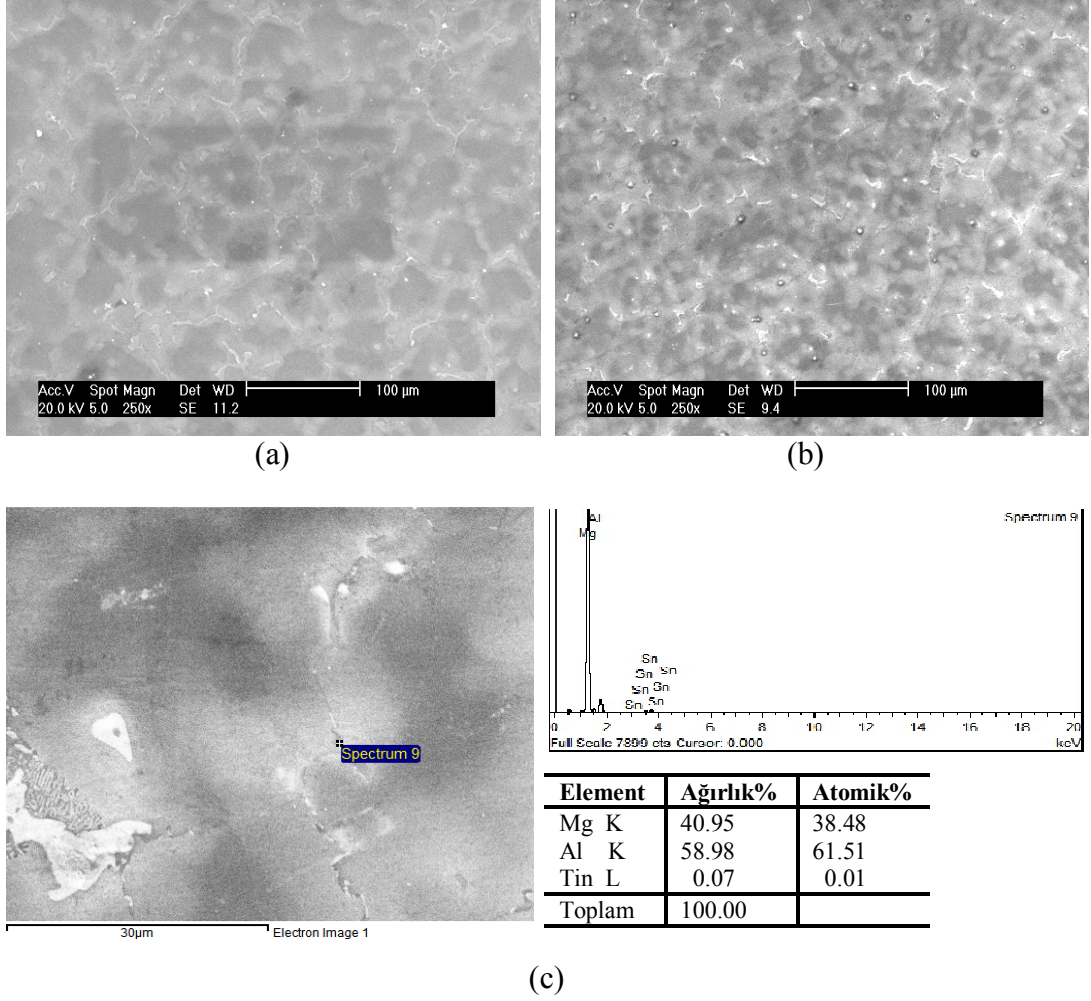
6.1.5. AZ91+Sn Alaşımı

6.1.5.1. Isıl İşlem Öncesi

AZ91 alaşımına Sn ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.26'da, SEM görüntüleri Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.26. AZ91+Sn alaşımının mikroyapı görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sn, b) AZ91+%0,5 Sn, c) AZ91+%1 Sn.

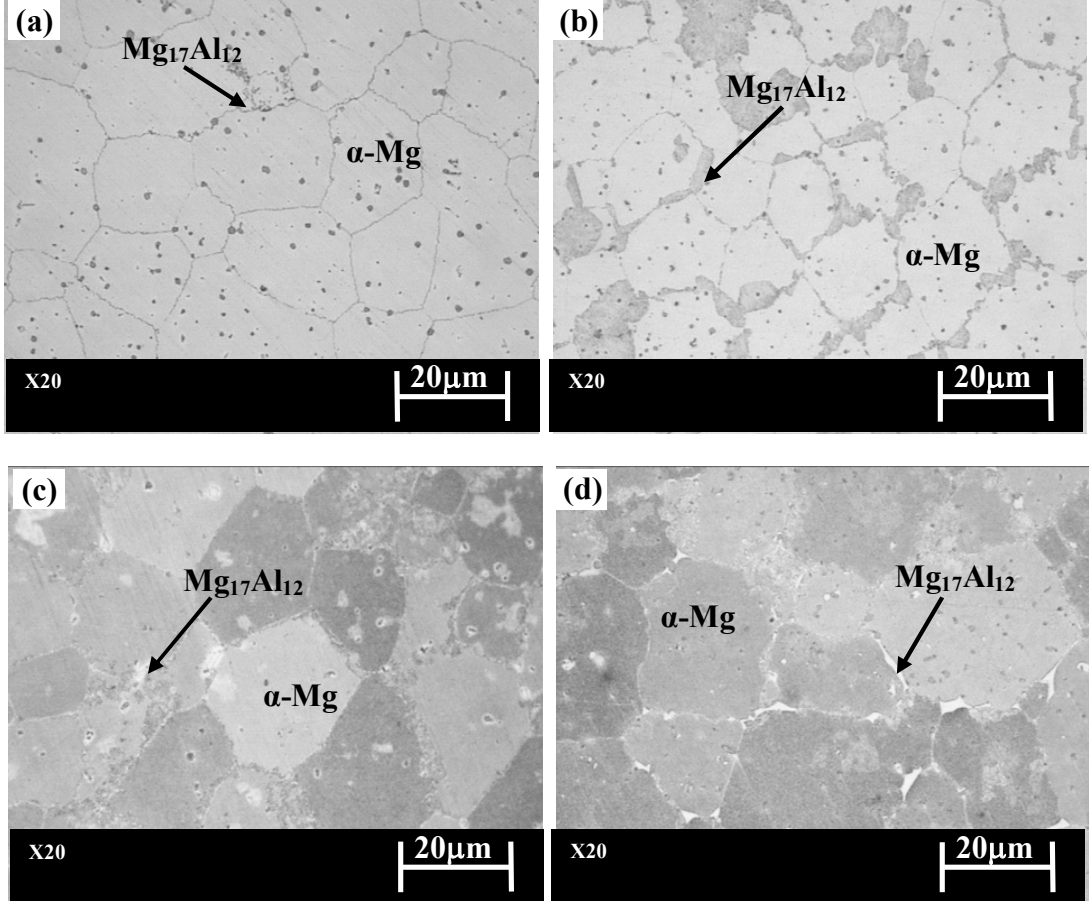


Şekil 6.27. AZ91+Sn alaşımlarının SEM görüntüleri a) AZ91+%0,2 Sn, b) AZ91+%1 Sn, c) AZ91+%1 Sn alaşımlarının EDS analizi.

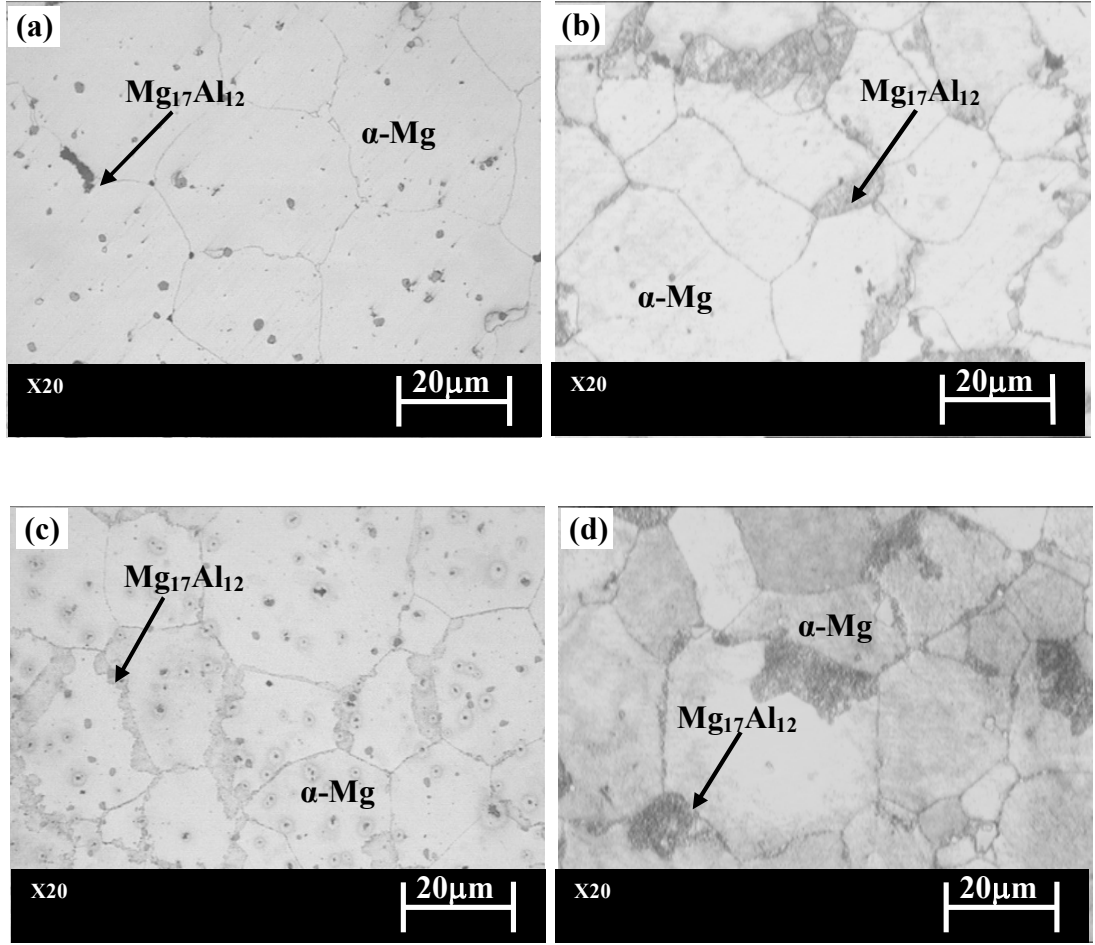
AZ91 alaşımına Sn ilavesiyle mikro yapıda belirgin bir değişim gözlenmektedir. Alaşımda artan Sn miktarı ile birlikte yapıda β fazına ilave olarak Mg_2Sn fazının varlığı görülmektedir. Ayrıca bu fazların çevrelerinde ötektik fazın belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Şekil 6.27'de görüldüğü üzere yapılan noktasal EDS analizi sonucu Sn elementinin varlığı tespit edilmiştir.

6.1.5.2. Isıl İşlem Sonrası

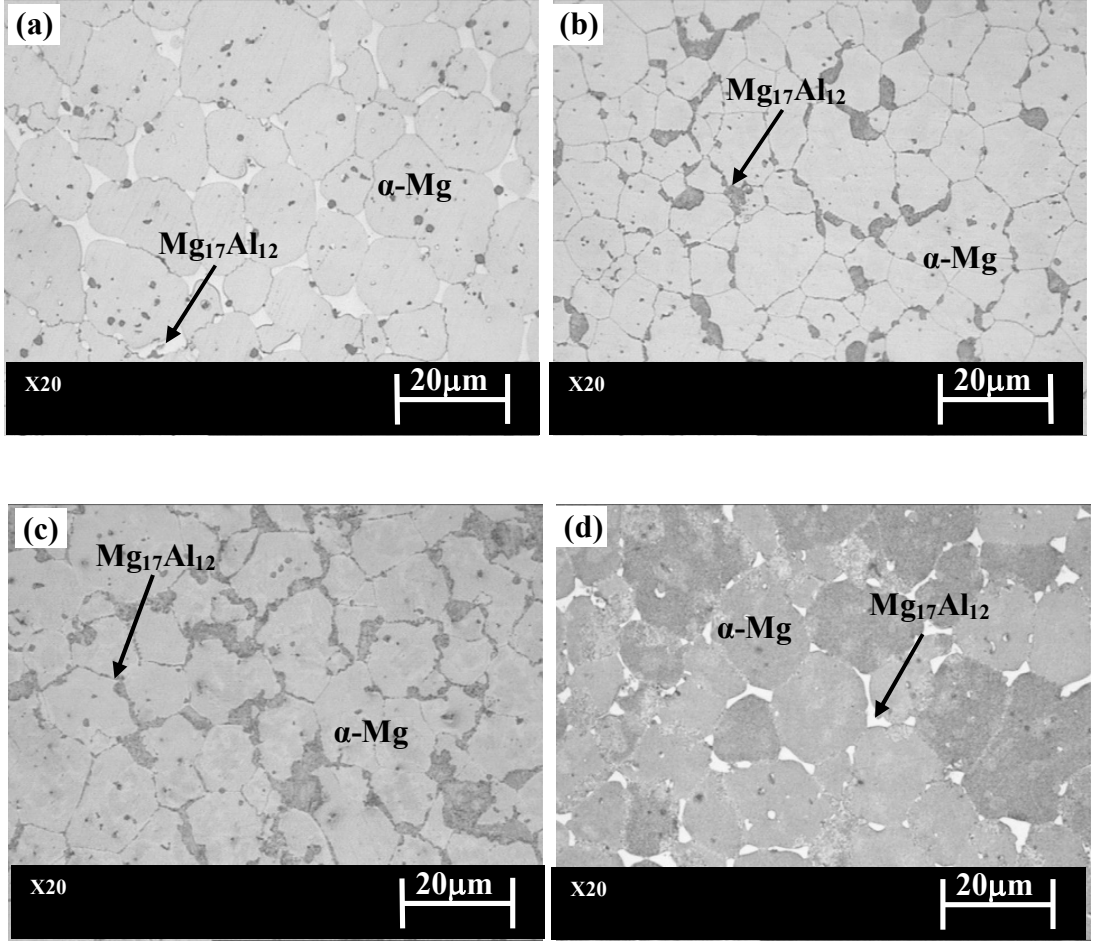
Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımına Sn ilavelerinin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 6.28-6.30'da, SEM görüntüleri Şekil 6.31 ve 6.32'de verilmiştir.



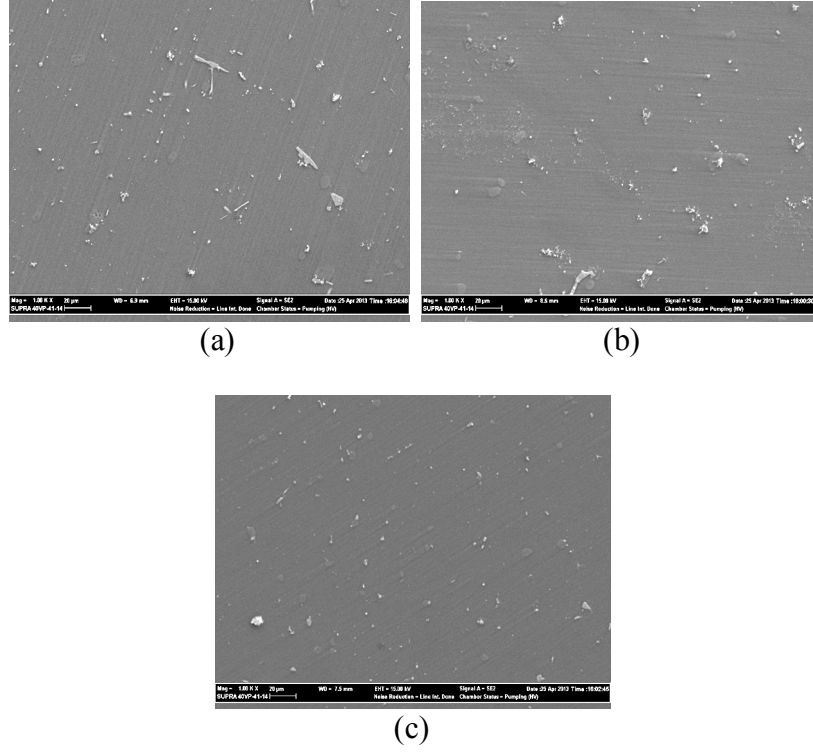
Şekil 6.28. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sn alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



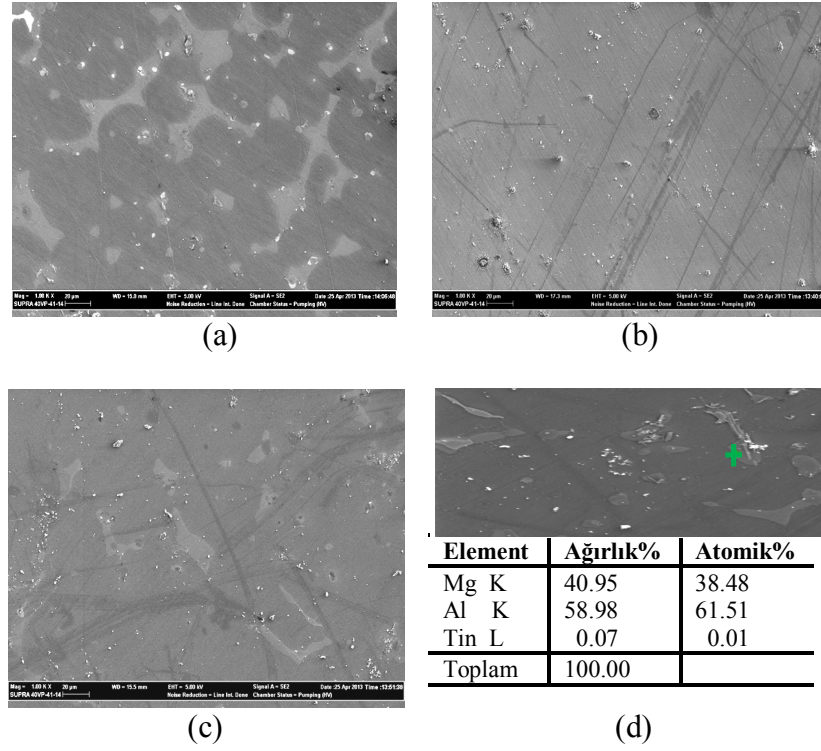
Şekil 6.29. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,5 Sn alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.30. Isıl işlem uygulanmış AZ91+0.1 Sn alaşımının mikroyapı görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (8 saat), c) Yaşlandırma (16 saat), d) Yaşlandırma (32 saat).



Şekil 6.31. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%0,2 Sn alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat).



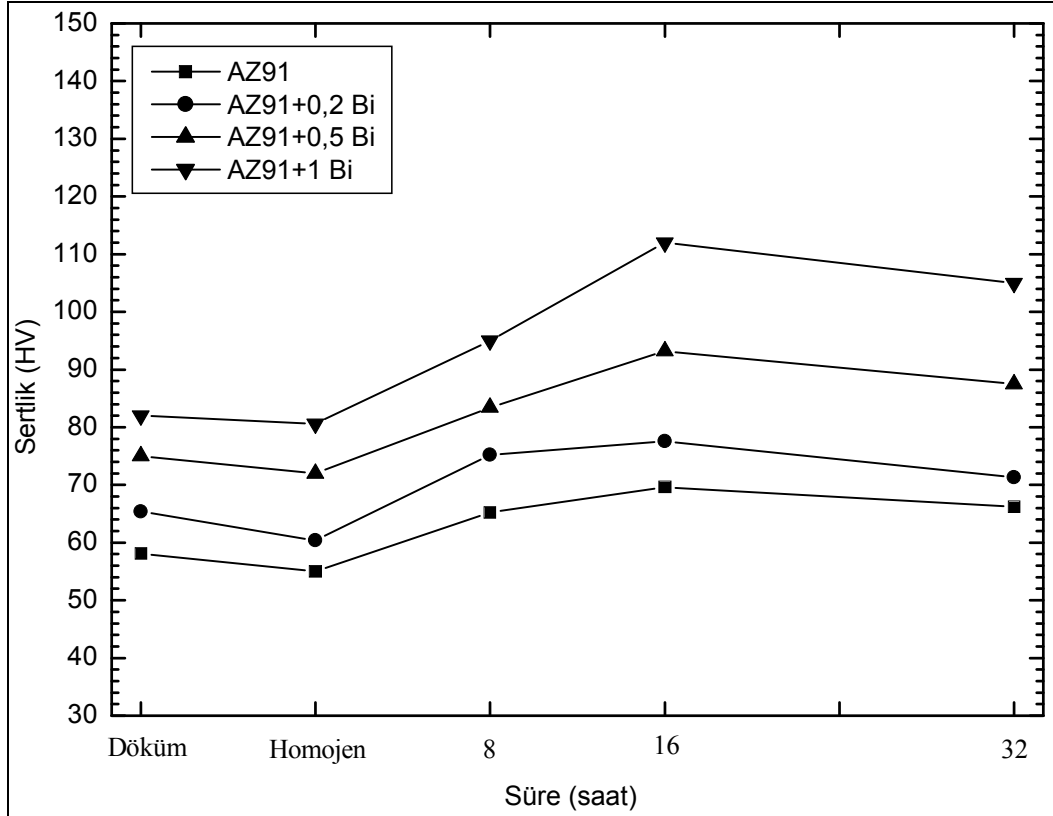
Şekil 6.32. Isıl işlem uygulanmış AZ91+%1 Sn alaşımının SEM görüntüsü a) Homojenleştirme (48 saat), b) Yaşlandırma (16 saat), c) Yaşlandırma (32 saat), d) AZ91+%1 Sn alaşımının EDS analizi.

AZ91+Sn ilaveli alaşımların homojenleştirme ısı işleminden sonra yapının döküm yapısına göre Mg₂Sn intermetalik fazın daha homojen hale geldiği gözlenmektedir. Ayrıca tane sınırlarının da belirgin olduğu görülmüştür. Artan Sn miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β intermetalik fazında kabalaşma görülmektedir. Isıl işlem sonrası yapılan EDS analizinde β intermetalik bölgesi yakınlığında Sn elementinin varlığı gözlenmiştir. Artan yaşlandırma süresi ile çökelti oluşumunda da kabalaşmalar görülmektedir.

6.2. SERTLİK DENEY SONUÇLARI

6.2.1. AZ91+Bi Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları

AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) Bi alaşımının sertlik değişimleri Şekil 6.33'de verilmiştir.

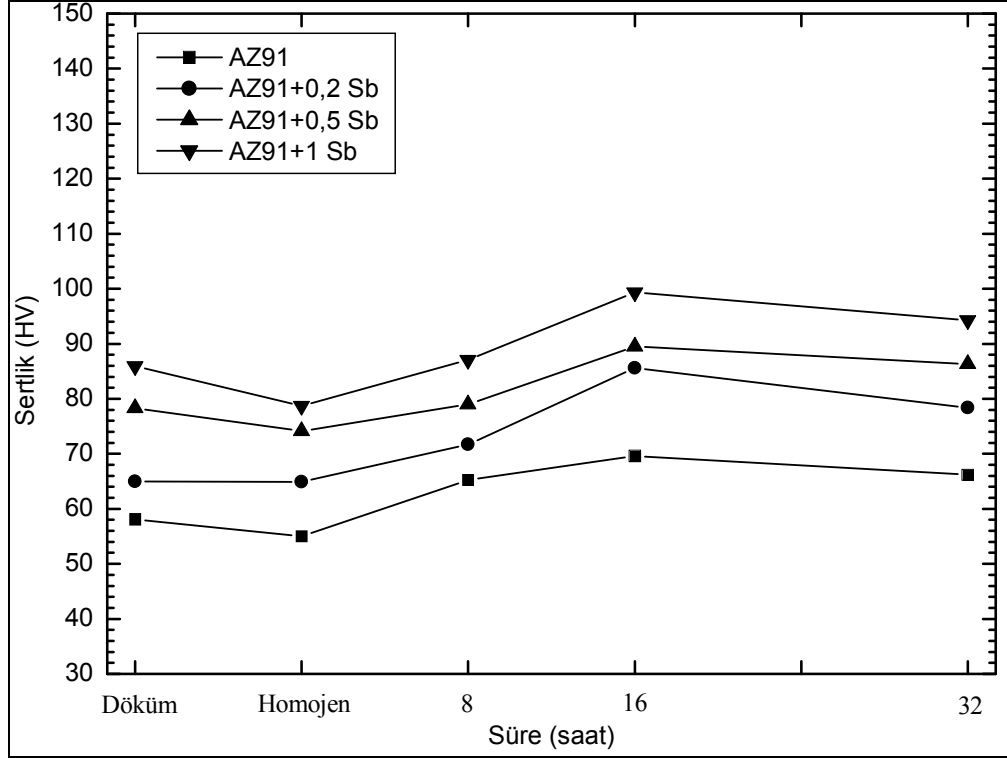


Şekil 6.33. AZ91+Bi alaşımı.

AZ91 alaşımına ilave edilen Bi elementinin sertlik değerleri incelendiğinde; homojenleştirme ile sertliğin bir miktar düştüğü ve yaşlandırma süresi arttıkça döküm haline göre sertliğin gözle görülür bir şekilde yükseldiği görülmüştür. En yüksek sertlik değerleri %1 Bi ilaveli AZ91 alaşımına 16 saat uygulanan yaşlandırma süresinde görülmüştür.

6.2.2. AZ91+Sb Alaşımının Sertlik Deneş Sonuçları

AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) Sb alaşımının sertlik değişimleri Şekil 6.34'de verilmiştir.

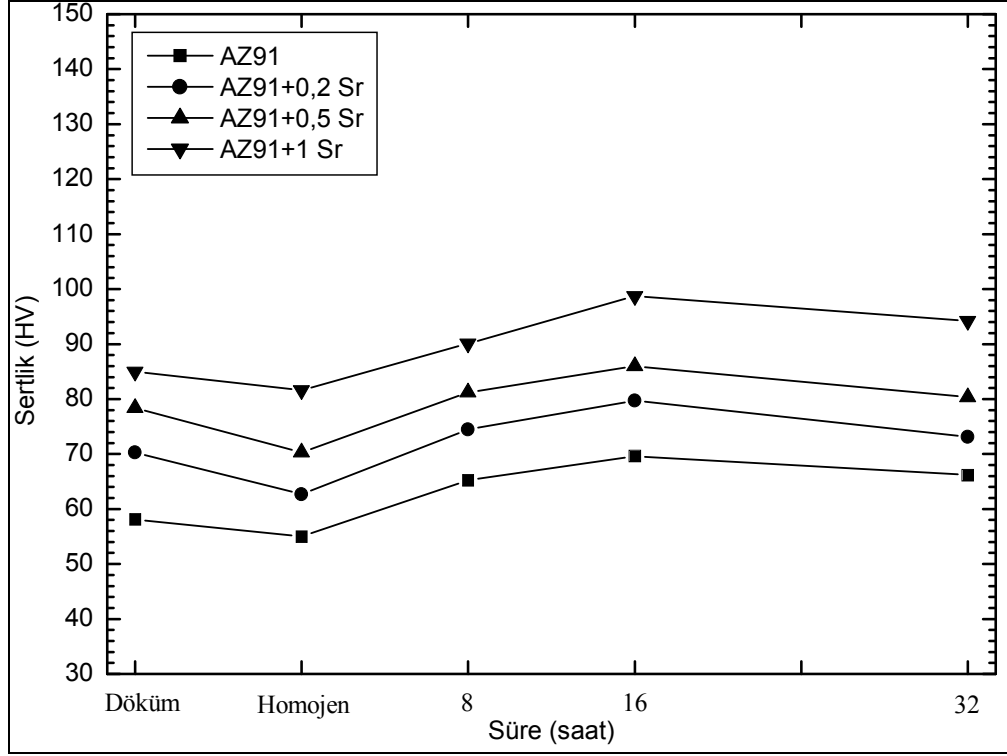


Şekil 6.34. AZ91+Sb alaşımı.

AZ91 alaşımına Sb elementinin ilavesi ile döküm haline göre sertliklerde artmanın olduğu gözlenmektedir. Homojenleştirme işleminde çok fazla değişiklik olmamasına ilaveten 16 saat yaşlandırma ısı işleminin sonucunda sertlik değerlerinde kayda değer artmanın olduğu ve en fazla artmanın %1 Sb ilavesinde olduğu tespit edilmiştir.

6.2.3. AZ91+Sr Alaşımının Sertlik Deney Sonuçları

AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) Sr alaşımının sertlik değişimleri Şekil 6.35'de verilmiştir.

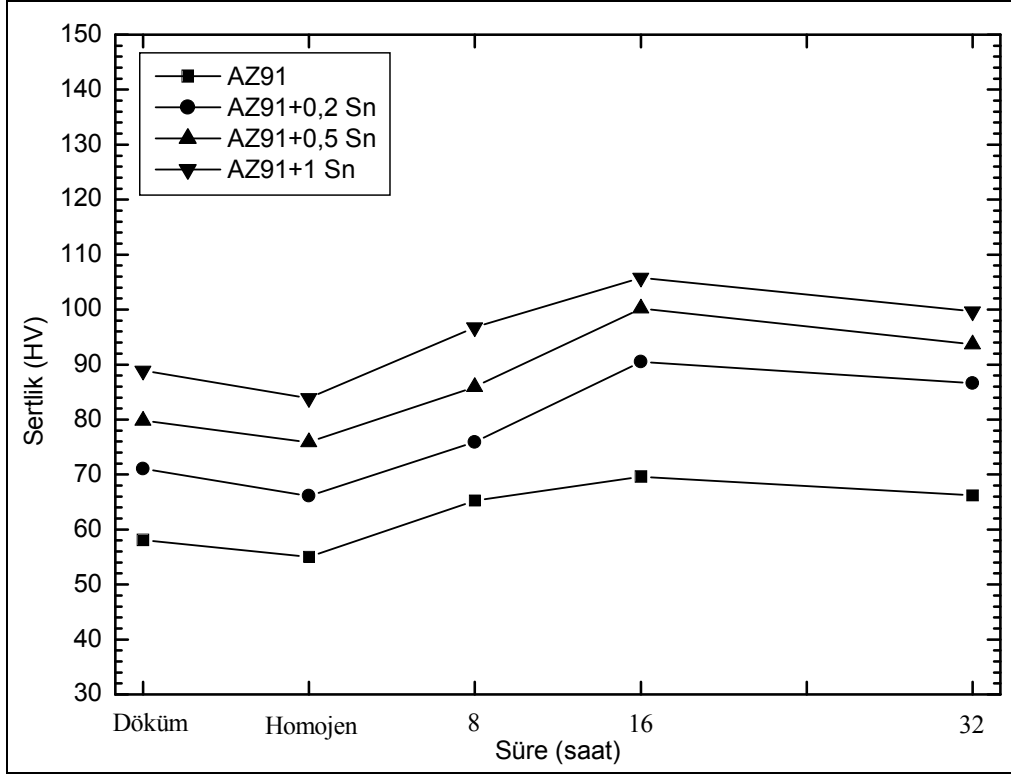


Şekil 6.35. AZ91+Sr alaşımı.

AZ91 alaşımına Sr elementlerinin ilavesinde homojenleştirme işleminden sonra sertlik değerlerinde bir miktar dūřme gözlenirken; 16 saat yaşlandırma ısıl işlemine kadar orantılı bir Őekilde gözle görülür artış görülürken; 32 saat yaşlandırma süresinde bir miktar dūřme gözlenmiştir.

6.2.4. AZ91+Sn Alaşımının Sertlik Deneş Sonuçları

AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) Sn alaşımının sertlik değişimleri Şekil 6.36'da verilmiştir.



Şekil 6.36. AZ91+Sn alaşımı.

AZ91 alaşımına ilave edilen Sn elementinin sertlik değerlerine etkisi incelendiğinde döküm alaşımının sertlik değerlerine göre homojenleştirme ile bir miktar düştüğü ve 16 saat yaşlandırma süresi sonunda sertliğin önemli bir miktar artış gösterdiği gözlenmektedir. Sertliklerde en fazla değer %1 Sn ilavesinde görülürken; kendi aralarında kıyaslandığımızda 16 saat sonunda en fazla artışın AZ91'e %0,2 Sn ilavesinde olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan AZ91 alaşımı ve ilave edilen alaşım elementlerine göre sertlik değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneyleerde kullanılan alaşımların sertlik değerleri.

	Döküm	Homojenleştirme (48 Saat)	Yaşlandırma (8 Saat)	Yaşlandırma (16 Saat)	Yaşlandırma (32 Saat)
AZ91	58,1	55,03	65,2	69,6	66,2
AZ91 %0,2 Bi	65,4	60,4	75,2	77,6	71,3
AZ91 %0,5 Bi	75	72	83,4	93,2	87,5
AZ91 %1 Bi	82	80,6	95	112	105
AZ91 %0,2 Sb	65	64,9	71,7	85,6	78,4
AZ91 %0,5 Sb	78,3	74,1	79	89,5	86,3
AZ91 %1 Sb	85,9	78,7	87,1	99,3	94,3
AZ91 %0,2 Sr	70,3	62,7	74,5	79,7	73,1
AZ91 %0,5 Sr	78,4	70,3	81,2	86	80,3
AZ91 %1 Sr	85	81,6	90,1	98,7	94,2
AZ91 %0,2 Sn	81	66,13	75,88	90,5	86,6
AZ91 %0,5 Sn	79,8	75,88	85,9	100,2	93,7
AZ91 %1 Sn	88,9	83,9	96,8	105,8	99,7

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

AZ91 alaşımının ısıtılma işlemi öncesi mikroyapısı Şekil 6.1 ve 6.2’de gösterilmiştir. Literatürde [31,37] AZ91 alaşımında α -Mg matrisin yanı sıra β ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalik tane sınırlarında ince bir faz olarak ve α - β ötektiği olduğu rapor edilmiştir. (Şekil 6.2) Fazların tayini için EDS incelemesi yapılmış ve α -Mg, β ve α - β fazların varlığı tespit edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının mikroyapısı (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4) incelendiğinde 8 saat yaşlandırma işlemi sonunda taneler düzenli hale gelerek tane sınırlarındaki intermetalik fazların çözündüğü ve eşit dağılım gösterdiği saptanmıştır. Yaşlandırma süresi artarken tane sınırlarındaki intermetalik fazların kabalaştığı gözlenmiştir.

AZ91’e ilave edilen herbir alaşım elementi (Bi, Sb, Sr ve Sn) tane sınırlarındaki $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının dağılımını göstermiştir. AZ91’e ilave edilen farklı alaşım elementlerine (Bi, Sb, Sr ve Sn) bağlı olarak sırasıyla Mg_3Bi_2 , Mg_3Sb_2 , Al_4Sr , Mg_2Sn intermetalik fazların açığa çıktığı gözlenmektedir. Bu tür ikincil fazlar genellikle tane sınırlarında β ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalik fazına bitişik yerlerde özellikle yer almaktadır. Her bir alaşım elementi için yapılan EDS sonuçları bu alaşım elementlerinin oluşturduğu intermetalik fazların varlığını ortaya çıkarmıştır. Genelde Mg’nin bu tür alaşım elementleriyle oluşturabildiği bileşiklerin daha sert bir fazın oluşumunu sağladığı literatürde de kendini göstermektedir.

AZ91'e ilave edilen alaşım elementlerinin (Bi, Sb, Sr ve Sn) oluşturduğu intermetalikler homojenleştirme ısıl işlemi neticesinde matris içerisinde homojen bir çözünme kaydedilmiştir [2,32]. Mikroyapılar incelendiğinde homjenleştirme ısıl işlemi sonunda tane sınırlarında yine de bir miktar çözünmemiş intermetalik fazlara rastlanmaktadır. Homojenleştirme ısıl işleminden sonra yapılan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda ise ikincil fazların artan yaşlandırma süresine bağlı olarak mikroyapıda belirginliği ortaya çıkmaktadır. 32 saat yaşlandırma süresi sonunda intermetalik fazların daha fazla kabalaştığı tespit edilmiştir. Literatürde artan yaşlandırma sürelerinin ikincil fazların kabalaşabileceğini vurgulanmaktadır.

7.2. SERTLİK DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

AZ91'e ilave edilen alaşım elementlerinden, en yüksek sertlik değerlerinin %1 Bi, Sb, Sr ve Sn elementlerinin ilavesinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca en düşük sertlik değerleri de %0,2 Sb ilavesi ile meydana geldiği görölmektedir. Sertlik artışı da yapıda meydana gelen Mg_3Bi_2 , Mg_3Sb_2 , Al_4Sr ve Mg_2Sn gibi intermetalik fazların varlığından kaynaklandığı düşünölmektedir [31,32]. Mikroyapılar incelendiğinde tane sınırlarında ilave edilen alaşım elementlerine bağlı olarak (Bi, Sb, Sr ve Sn) $Mg_{17}Al_{12}$ fazına ilave olarak çökelti türü fazlarda görölebilmektedir. Bu fazlar çökelti türü sertleşmeye sebep olmaktadır. Her bir alaşım elementi ilavesi için yaşlanma süresi 32 saate ulaştığında sertliklerinde bir miktar düşme görölmüştür. Bu düşüşün sebebinin çökelti partiküllerinin artan süresi ile birlikte gittikçe kabalaşmasından dolayı olduğu düşünölmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda bu tür paralellikte yargıya ulaşılmaktadır [37]. Artan sertliklere paralel malzemelerin çekme-akma dayanımlarında da artabileceği öngörölebilir. Bu çalışmalarımızda odaklaştığımız kısım geniş çapta alaşım elementleri miktarı ve oranlarının mikroyapı ve sertlik ilişkileri ile ilgili olduğu için çekme-akma-%uzama dayanımlarıyla ilgili çalışmaların üzerine yoğunlaşılmamıştır.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AZ91 alaşımına %0,2 - %0,5 ve %1 oranlarında Bi, Sb, Sr ve Sn ilaveli alaşımlar metal kalıba dökümleri yapıldı ve ısıtılma işlemi (homojenleştirme, yaşlandırma) tabii tutularak sertlik deneyleri alınmıştır. Ayrıca bu alaşımların ısıtılma işlemi öncesi ve ısıtılma işlemi sonrası mikro yapıları (optik ve SEM) incelenmiştir. Yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar ve öneriler ise şöyledir;

Sonuçlar:

- 1) Isıtılma işlemi öncesi AZ91 mikroyapısı incelendiğinde α -Mg ana matrisinden ve tane sınırlarında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazların oluştuğu gözlemlenmiştir.
- 2) Isıtılma işlemi öncesi AZ91'e Bi, Sb, Sr ve Sn ilave elementlerin mikro yapıları incelendiğinde; element miktarı arttıkça $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının yanında Mg_3Bi_2 , Mg_3Sb_2 , Al_4Sr ve Mg_2Sn ikincil fazların oluştuğu gözlemlenmiştir.
- 3) AZ91 ve ilave elementli alaşımların 420°C 'de homojenleştirme ısıtılma işlemleri sonucu döküm sonrası düzensiz oluşmuş ikincil fazlar matris içinde çözünerek homojen yapı elde edilmiştir.
- 4) Isıtılma işlemi sonrası en düzenli mikro yapısının 8-16 saat yaşlandırma işleminin sonucunda gözlemlenmiştir.
- 5) Sertlik deney sonuçlarında AZ91+Bi, AZ91+Sb, AZ91+Sr ve AZ91+Sn alaşımlarında yaşlandırma süresine göre kademeli bir artış olmuştur.

6) AZ91+Sr alaşımında ise sertlik değerlerinde kayda değer değişiklik olmamasına rağmen yaşlandırma sũresi fazlalařtıķa (32 saat) sertlik değerlerinde dũřme gũzlenmiřtir.

7) AZ91+Bi, AZ91+Sb, AZ91+Sr ve AZ91+Sn alaşımlarında sertlik değeri %1 Bi ilavesinde en yũksek değere ulaşmıştır.

ũneriler:

- 1) Isıl işlemleri yapılan alaşımların çekme, akma ve uzama deneyleri yapılabilir.
- 2) AZ91 alaşımına Bi, Sb, Sr ve Sn elementlerinin değişik oranlarda birbiri ile ikili kombinasyonları katılarak ısıl işlem özellikleri incelenebilir.
- 3) AZ91 alaşımına yũzey aktif ve yũzey aktif olmayan başka elementler ilavesi ile dũkũmler sonrası ısıl işlemler uygulanarak bir modelleme çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kazdal, H. K., “Magnezyum alaşımları : otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği”, *Tubitak*, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, 3-39 (1999).
2. Dobrzanski, L. A., Tanski, T., Cizek and L., Brytan, Z., “Structure and properties of magnesium cast alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 567-574 (2007).
3. Barber, L. P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys”, A Thesis of Master, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 10-46 (2004).
4. Luo, A. A., “Materials comparison and potential applications of magnesium in automobiles”, *Magnesium Technology*, Nashville, 89-99 (2000).
5. Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. and Wu, S., “Potential automotive uses of wrought magnesium alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).
6. Polmear I. J., “Magnesium alloys”, Light Alloys, *Metallurgy and Materials Science Series*, New York, 169-210 (1989).
7. Beffort, O. and Hausmann, C., “Das leichtmetal magnesium und seine egierungen”, *EMPA Mg seminar*, Thun, 15-22 (1999).
8. Vogel, M., “Mikrostruktur und kriechverhalten von magnesium-druckgusslegierungen im system Mg-Zn-Al-Ca”, Ph. D. Thesis, *Max-Planck-Institut für Metallforschung*, Stuttgart, 6-20 (2002).
9. Zhang, Z., “Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications”, Ph. D. Thesis, *Faculte Des Sciences Et De Genie Universite*, Quebec-Canada, 2-75 (2000).
10. Brown, R., “Magnesium”, Mining Journal Annual Review for 2004, *International Magnesium Statistics*, 1-14 (2004).
11. Mordike, B. L. and Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, *Materials Science & Engineering A*, 302: 37-45 (2001).
12. Plano, S., “Development of innotative nanocomposite coatings for magnesium component protection”, *Nanomag, Sustainable production: The Role of Nanotechnologies*, Copenhagen, 34-47 (2002).

13. Bolstad, J., “Magnesium alloy development for intelligent magnesium Designs”, *SinoMaG seminar*, Beijing-China, 8-14 (2000).
14. Davis, J. R., “Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials”, *ASM Handbook*, 2: 480-516 (1998).
15. Mordike B. L. and Kainer K. U., “Magnesium alloys and their applications”, *Werkstoff-Informationsgesellschaft*, Frankfurt, 34-48 (1998).
16. Eliezer, D., Aghion, E. and Froes, F. H., “Magnesium science, technology and applications”, *Advanced Performance Materials*, 201-212 (1998).
17. Zhan, Z., “Review and classification for magnesium patents”, Report for the institute of magnesium technologies, *Derwent World Patents Index*, (1997).
18. Atalay, O., “Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
19. Friedrich, H. and Schumann, S., “Research for a new age of magnesium in the automotive industry”, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 276-281 (2001).
20. Kacar, İ. ve Öztürk, F. “Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesindeki son gelişmeler”, *Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, Balıkesir, (2006).
21. Kandemir, K. ve Can, A. Ç., “Otomotiv endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1:37-45, (2003).
22. Watarai, H., “Trend of research and development for magnesium alloys”, *Science and Technology Trends*, 18: 84-97 (2006).
23. Jambor, A. and Beyer, M., “New cars-new materials”, *Materials&Design*, 4 (6): 203-209 (1997).
24. Meridian Magnesium Products Corp., “Magnesium parts for automotive applications”, Meridian products report, *Meridian Magnesium Products Corp.* Italy, (2006).
25. Žaludová, N., “Mg-RE alloys and their applications”, *WDS’05 Proceedings of Contributed Papers*, 3: 643-648 (2005).
26. Johansson, S., “Magnesium alloys”, Summary of chapter 1-7 in light alloys by I. J. Polmear, *Engineering Materials*, 5: 17-20 (2002).
27. Schwam, D., Wallace, J. F., Zhu, Y. and Viswanathan, S. and Iskander, S., “Enhancements in magnesium die casting impact properties, final report”, *Case Western Reserve University*, DOE-FC07-98ID13611, Ohio, 5-22 (2000).

28. Guthrie, S. E., Thomas, G. J., Bauer, W. and Yang, N. Y. C., “The development of lightweight hydride alloys based on magnesium”, Master, Ms.C. Thesis **Sandia National Laboratories Department of Energy**, California, 1-35 (1996).
29. Baker, H., “, Alloy phase diagrams, **ASM Handbook**, 3: 280-285 (1998).
30. Aizawa, T. and Song, R., “Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg₂Si and Mg₂Sn”, **Intermetallics**, 14: 382-391 (2006).
31. Kang, D. H., Park, S. S., Oh, S. and Kim, N. J., “Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys”, **Materials Science & Engineering**, 449 (451): 318-321 (2007).
32. Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U. T. S. and Pai, B. C., “Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy”, **Materials Science & Engineering**, 457: 275-281 (2007).
33. Feng, X., Xuegang, M. and Yangshan, S., “Microstructures and mechanical properties of AZ91 alloy with combined additions of Ca and Si”, **Journal Materials and Science**, 41: 4725-4731 (2006).
34. Weichao, Z., Shuangshou, L., Bin T., Daben, Z. and Xutao, G., “Effect of rare earths on hot cracking resistant property of Mg-Al alloys”, **Journal of Rare Earths**, 24: 346-351 (2006).
35. Zhang, J., Guo, Z. X., Pan, F., Li, Z. and Xiaodong, L., “Effect of composition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Al alloys”, **Materials Science and Engineering**, 456: 43-51 (2006).
36. Zhang Z., Couture, A. and Luo, A., “An Investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys”, **Scripta Materialia**, 39: 45-53 (1998).
37. Wang, Q. D, Chen, W., Zeng, X., Lu, Y., Ding, W., Zhu, Y. and Xu, X., “Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy”, **Journal Of Materials Science**, 36: 3035-3040 (2001).
38. Qudong W., Yizhen L., Xiaqin Z., Wenjiang D., Yanping Z., Qinghua L. and Jie L., “Study on the fluidity of AZ91+xRE magnesium alloy”, **Materials Science and Engineering**, 271: 109-115 (1999).
39. Looze, G., Carrig, J. and Nguyen, V., “High-yield, high-integrity, permanent mould magnesium casting” **Foundry Trade Journal**, 3629: 280-282 (2005).
40. West, C. E. and Gribach, T. E., “Permanent mould casting”, **Metals Handbook, ASM international**, Metals Park, 15: 275-285 (1988).
41. Landkof, B., “Magnesium alloys applications”, **Magnesium Alloys Science, Tecnology and Application**, Ben-Guron University, 8: 293-316 (2005).

42. Watari, H., Davey, K., Rasgado, M.T., Haga, T. and Izawa, S., "Semi-solid manufacturing process of magnesium alloys by twin-roll casting", *Journal of Materials Processing Technology*, 155 (156): 1662-1667 (2004).
43. Ha, W. and Kim, Y., "Effects of cover gases on melt protection of mg alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 422: 208-213 (2006).
44. Hillis, J. E., "The international program to identify alternatives to sf₆ for magnesium melt protection", *The International Magnesium Association*, San Diego, 1-8 (2002).
45. Aghion, E. and Bronfin, B., "Physical metallurgy of Mg alloys", *Magnesium Technologies Users Assotiation*", 7-44 (2005).
46. Bowles, A. L. and Caceres, C. H., "Anomalous hardness behaviour of high pressure die-cast Mg-Al alloys", *Metallurgical Science and Technology, Associato alla Unione Stampa Periodica Italiana*, Torino, 25-26 (1983).
47. Savaşkan, T., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", *Derya Kitabevi*, Trabzon, 285 (1999).
48. Yüksel, M., "Malzeme Bilgisi", *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, (2003).
49. Şendeniz, M. "Seçilen bir Al-Mg-Si alaşımının (AlMgSi0.5;Etial 60) ısıtılma işlemleriyle özellik değişimlerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2006).
50. Baker. S. P., Joo. Y. C., Knaub. M. P., Arzt E., "Electromigration damage in mechanically deformed al conductor lines: Dislocations as fast diffusion paths", *Acta mater*. 48: 2199-2208 (2000).
51. Karabay, S., Yılmaz, Y. ve Zeren, M. "AA-6101 Alaşımının Yüksek Gerilim Çıplak Havai Hatlarında AAAC İletkeni Olarak Kullanımı" *Metalürji Mühendisleri Odası*, 133: 56-62 (2003).
52. Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 364-370 (1998).
53. Öz, Ö. "Yaşlandırma ısıtılma işleminin AA 7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi*, Zonguldak (2007).
54. Ünal, M. "Magnezyum alaşımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi" Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 57-61 (2008).
55. Oğuz, B. "Demir Dışı Metallerin Kaynağı" *Oerlikon Yayını*, İstanbul, (1990).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Ayşegül ENGİN
Doğum tarihi ve yeri : 23.02.1986 Gebze
Telefon : 0 (262) 745 32 00
E-mail : aysegulengin22@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Karabük Üniversitesi/Metal Bölümü	2010
Lise	STFA Anadolu Teknik Lisesi	2004

Yabancı Dil

İngilizce