

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YAŞLANMA  
SERTLEŞMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE  
ETKİSİ**

**2014  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Hüseyin KERENCİLER**

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YAŞLANMA SERTLEŞMESİNİN  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Hüseyin KERENCİLER**


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

**KARABÜK  
Haziran 2014**

Hüseyin KERENCİLER tarafından hazırlanan “MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YAŞLANMA SERTLEŞMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

İmzası



...../...../2014

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

Prof. Dr. Mustafa BOZ

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.”*

Hüseyin KERENCİLER

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA YAŞLANMA SERTLEŞMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Hüseyin KERENCİLER**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ**

**Haziran 2014, 81 sayfa**

Bu çalışmada AZ31 Mg alaşımının yaşlanma sertleşmesi ve deformasyon yaşlanması davranışları otomotiv endüstrisinde geçerli olan fırın sertleşmesi koşulları altında incelenmiştir. AZ31 Mg alaşım test parçalarının belirli bir bölümü 400°C’de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulmuştur. Ardından 10 dakika’dan 6 saate kadar 180°C’de yaşlanma işlemine tabi tutulmuştur (deformasyonsuz). Diğer bölümü solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 180°C’de 10 dakika’dan 6 saate kadar fırın ortamında yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur (ön deformasyonlu). Çekme dayanımı, % 2 oranında akma dayanımı ve yüzde uzama değerleri AZ31 Mg-alaşımın mekanik özellikleri üzerinde yapay yaşlandırma sertleştirilmesinin etkisini araştırmak için kullanılmıştır. 180°C’de 45 dakika veya 1 saat yaşlandırılan AZ31 alaşımının % 2 akma dayanımı ve maksimum çekme dayanımında artış olduğu bulunmuştur. Yaşlanma zamanı artarak 6 saate çıkması ile numunenin % 2 akma dayanımı ve çekme dayanımı düşmüştür. SEM görüntüleri ve

EDS verileri, yapay yaşlanma süresince AZ31 Mg alaşımının tane sınırlarında ve tane içinde dağılmış ve  $\alpha$ -Mg matrisinde  $Mg_{17}Al_{12}$   $\beta$  fazı partiküllerinin olduğunu göstermiştir. Deneysel alışmar, 180°C' de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mekanik özelliklerinin değiştiğini göstermiştir.

**Anahtar Sözcükler** : AZ31 Mg alaşımları, yaşlandırma, kelme.

**Bilim Kodu** : 915.1.092

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **EFFECT OF AGEING TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AZ31 MG ALLOY**

**Hüseyin KERENCİLER**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ**

**June 2014, 81 pages**

In this study quench ageing and strain aging behaviors of AZ31 Mg-alloy were investigated under conditions similar to the paint-bake cycle currently used in automotive industry. A certain part of the AZ31 Mg-alloy test pieces were solution heat treated at 400 °C for 3 h, water quenched, then aged at 180 °C from 10 min to 6 h (quench aged, QA) and the other part was prestrained for 0.5 % in tension shortly after the solution heat treatment, then aged at 180 °C from 10 min to 6 h in a furnace (strain aged, SA). Tensile stress, flow stress at 2 % and percentage elongation measurements were employed to investigate the effect of artificial ageing on the mechanical properties of AZ31 Mg-alloy. It was found that AZ31 Mg-alloy aged at 180 °C for 45 min or 1 h showed an increase in the flow stress at 2 % (FS) and ultimate tensile stress (UTS). Further increase in the ageing time to 4 or 6 h has reduced the FS and UTS. SEM observations and EDS data also showed that  $\beta$ -phase of  $Mg_{17}Al_{12}$  precipitates in  $\alpha$ -Mg matrix and distributes in grains and along grain

boundaries of the AZ31 Mg-alloy during artificial aging. The experimental work has revealed that different ageing times at 180 °C play a very important role in the precipitation hardening process of the AZ31 Mg-alloy.

**Key Words** : AZ31 Mg-alloy, ageing, precipitation.

**Science Code** : 915.1.092



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, Araştırma Görevlisi Mehmet Akif ERDEN'e ve Kocaeli Üniversitesi Hereke Meslek Yüksek Okulu ğretim Görevlisi Dr. Mustafa TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## 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 .....	4
MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	4
2.1. MAGNEZYUM.....	4
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI.....	7
2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ETKİLERİ.....	10
2.3.1. Alüminyum (Al) .....	11
2.3.2. Çinko (Zn).....	12
2.3.3. Kalay (Sn) .....	13
2.3.4. Kurşun (Pb).....	14
2.3.5. Mangan (Mn) .....	15
2.3.6. Stronsiyum (Sr).....	15
2.3.7. Toprak Alkali Elementleri (RE) .....	16
2.3.8. Silisyum (Si) .....	16
2.3.9. Zirkonyum (Zr) .....	17
2.3.10. Kalsiyum (Ca).....	18
2.3.11. Demir (Fe).....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.3.12. Bakır (Cu) .....	20
2.3.13. Yitriyum (Y) .....	20
2.3.14. Gümüş (Ag) .....	21
2.3.15. Toryum (Th) .....	22
2.4. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI .....	22
2.4.1. Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımları.....	22
2.4.2. AZ31 Alaşımları .....	23
2.4.3. AZ61 Alaşımları .....	24
2.4.4. AZ91 Alaşımları .....	24
2.5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI .....	24
2.5.1. Havacılıkta ve Otomotiv Sektöründe Magnezyum.....	25
2.6. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....	28
 BÖLÜM 3 .....	 29
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER .....	29
3.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ.....	29
3.2. HOMOJENLEŞTİRME .....	31
3.3. SOLÜSYONA ALMA .....	32
3.4. SU VERME İŞLEMİ.....	33
3.5. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ.....	34
3.5.1. Soğuma Yaşlanması .....	34
3.5.2. Deformasyon Yaşlanması.....	36
3.5.2.1. Statik Deformasyon Yaşlanması Sertleşmesi .....	36
3.5.2.2. Dinamik Deformasyon Yaşlanması Sertleşmesi.....	38
3.6. YAŞLANDIRMANIN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ.....	40
 BÖLÜM 4 .....	 41
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	41
4.1. DENEYSEL MALZEME.....	41
4.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI .....	41

4.3. SOLÜSYONA ALMA VE ÖNDEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI .....	43
4.4. YAŞLANMA ISIL İŞLEMİNİN UYGULANMASI.....	44
4.5. ÇEKME TESTİNİN UYGULANMASI .....	45
4.7. OPTİK VE TARAMA ELEKTRON MİKROSKOP İNCELEMELERİ.....	46
4.7.1. Metalografik İncelemelerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması .....	47
4.7.2. Dağlayıcıların Hazırlanması ve Dağlama İşleminin Yapılması .....	47
4.7.3. Tane Boyutunun Ortalama Doğrusal Kesme Metodu Kullanılarak Belirlenmesi .....	48
BÖLÜM 5 .....	50
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	50
5.1. GİRİŞ.....	50
5.2. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ.....	50
5.2.1. Ana Malzeme ve Solüsyona Alınan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	50
5.2.2. Solüsyona Alınan ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	52
5.2.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	55
5.3. ÇEKME DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	60
5.3.1. Ana Malzeme ve Solüsyona Alınan Numunelerin Çekme Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	60
5.3.2. Solüsyona Alınan ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Çekme Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	61
5.3.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Çekme Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	63
5.5. KIRIK YÜZEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
5.5.1. Ana Malzeme ve Solüsyona Alınan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	67
5.5.2. Solüsyona Alınan ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	70
5.5.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	72

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 6 .....	74
GENEL SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretimi ve oranları .....	5
Şekil 2.2.	Mg metalinin diğer malzemelere göre yıllara bağlı kullanımı .....	6
Şekil 2.3.	1991-2007 yılları arasında Avrupa ve ABD' de Mg kullanımı .....	7
Şekil 2.4.	Mg-Al denge diyagramı .....	12
Şekil 2.5.	Mg-Zn denge diyagramı .....	13
Şekil 2.6.	Mg-Sn denge diyagramı .....	14
Şekil 2.7.	Mg-Pb denge diyagramı .....	14
Şekil 2.8.	Mg-Mn denge diyagramı .....	15
Şekil 2.9.	Mg-Sr denge diyagramı .....	16
Şekil 2.10.	Mg-Si denge diyagramı .....	17
Şekil 2.11.	Mg-Zr denge diyagramı .....	18
Şekil 2.12.	Mg-Ca denge diyagramı .....	19
Şekil 2.13.	Mg-Fe denge diyagramı .....	19
Şekil 2.14.	Mg-Cu denge diyagramı .....	20
Şekil 2.15.	Mg-Y denge diyagramı .....	21
Şekil 2.16.	Mg-Ag denge diyagramı .....	21
Şekil 2.17.	Mg-Th denge diyagramı .....	22
Şekil 2.18.	Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi .....	23
Şekil 2.19.	Mg Alaşımlarının CO <sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkisi .....	25
Şekil 2.20.	Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki .....	26
Şekil 2.21.	Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar .....	26
Şekil 2.22.	AM alaşımı döküm parçaları .....	27
Şekil 2.23.	WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu .....	27
Şekil 2.24.	Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları .....	28
Şekil 3.1.	Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesini gösteren şekil .....	33
Şekil 3.2.	Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı .....	34
Şekil 3.3.	Düzenli bir çökeltinin oluşma aşamaları .....	35
Şekil 3.4.	Statik yaşlanma sertleşmesinin temel prensibi .....	38

Şekil 3.5.	Dinamik yaşlanma sertleşmesi neticesinde vanadium mikro alaşım çeliğinin kuvvet-uzama diyagramında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişim.....	40
Şekil 4.1.	Çekme deney numunesinin elde edildiği kesme kalıbı. ....	42
Şekil 4.2.	Çekme deney numunesinin boyutları. ....	42
Şekil 4.3.	PROTHERM marka ve PLF 120/27 model ısıtma işlem fırını.....	43
Şekil 4.4.	SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazı. ....	44
Şekil 4.5.	Mg-Al faz faz diyagramı üzerinde solüsyona alma ve yaşlanma ısıtma işlem sıcaklıkları .....	45
Şekil 4.5.	X50-X1000 büyütme kapasitesine sahip Epiphot 200 Nikon marka optik mikroskop.....	47
Şekil 5.1.	Ana malzemenin optik mikroskop görüntüsü. ....	51
Şekil 5.2.	Solüsyona alınan numunenin optik mikroskop görüntüsü. ....	51
Şekil 5.3.	180 °C’de 30 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	52
Şekil 5.4.	180°C’de 45 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	53
Şekil 5.5.	180°C’de 1,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	53
Şekil 5.6.	180 °C’de 4 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	54
Şekil 5.7.	180 °C’de 5,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	54
Şekil 5.8.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 30 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü. ....	56
Şekil 5.9.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 45 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü. ....	56
Şekil 5.10.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 1 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	57
Şekil 5.11.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 1,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	57
Şekil 5.12.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 4 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	58
Şekil 5.13.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 5,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	58
Şekil 5.14.	Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C’ de 5,5 saat yaşlandırılan numunelerin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 5.15.	Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı.....	60

Şekil 5.16. Solüsyona alınan ve ardından 180 °C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı. ....	62
Şekil 5.17. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C’ de yaşlandırılan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı. ....	64
Şekil 5.18. Ana malzeme, solüsyona alınan, solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve deforme edilmeyen numunelerin 180°C’de farklı yaşlanma zamanına bağlı olarak elde edilen sertlik grafiği. ....	66
Şekil 5.19. Tarama elektron mikroskop ile ana malzemedan elde edilen kırık yüzey resimleri .....	68
Şekil 5.20. Tarama elektron mikroskop ile solüsyona alınan numunelerden elde edilen kırık yüzey resimleri .....	69
Şekil 5.21. Solüsyona alındıktan sonra 180 °C’de 45 dakika yaşlandırılan numunenin kırık yüzey resimleri.....	71
Şekil 5.22. Solüsyona alındıktan sonra 180 °C’de 5.5 saat yaşlandırılan numunenin kırık yüzey resimleri.....	72
Şekil 5.23. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C’de 1 saat yaşlandırılan numunelerin kırık yüzey resimleri .....	73



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Saf magnezyumun fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları .....	7
Çizelge 2.3. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) .....	8
Çizelge 2.4. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımları (ASTM B80).....	9
Çizelge 2.5. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımlarının mekanik özellikleri .....	9
Çizelge 2.6. İkili Mg alaşımlarında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik. ....	11
Çizelge 2.7. de AZ31 malzemesinin kimyasal bileşimi.....	23
Çizelge 3.1. Al: %0,6; Zn: %0,3; Mn: %0,35 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri. ....	30
Çizelge 3.2. Al: %8,5 ; Zn: %0,4 ; Mn: %0,25 bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri. ....	30
Çizelge 4.1. AZ31 Magnezyum malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlık). ....	41
Çizelge 5.1. Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin çekme test sonuçları. ....	60
Çizelge 5.2. Solüsyona alınan ve ardından 180 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme test sonuçları. ....	62
Çizelge 5.3. Solüsyona alınıp % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme test sonuçları. ....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Pb	: Kurşun
Ln	: Lantanyum
Zr	: Zirkonyum
RE	: Toprak Alkali Elementleri
Mn	: Mangan
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Zn	: Çinko
Sr	: Stronsiyum
Th	: Toryum
Si	: Silisyum
Pb	: Kurşun
Cd	: Kadmiyum
Bi	: Bizmut
Sb	: Antimuan
Sn	: Kalay
Y	: Yitriyum
Ca	: Kalsiyum
Sr	: Stronsiyum
Ba	: Baryum
Sb	: Antimon
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
Ag	: Gümüş

## **KISALTMALAR**

ASTM : Electronic Data Systems (Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu)

HSP : Hegzagonal sıkı paket

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

EDS : Enerji Dağılım Spektrometres:

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Magnezyum, günümüzde uçak ve uzay endüstri başta olmak üzere konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde en hafif olanıdır. Yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, aynı zamanda bir metalin mekanik özelliklerine de sahiptir. Yakıt verimliliği ve performans artırımı için yoğunluk, dayanım ve rijitlik avantajı bakımından aranan bir malzeme olmuştur. Ayrıca, magnezyum mühendislik plastiklerine göre çok daha katı ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir. Düşük ağırlık kadar önemli olan geri dönüşebilirlik, dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmiştir. Magnezyum, özellikle Al ve Zn başta olmak üzere, toprak alkali metaller ve de eser miktardaki Si, Y, Ca, Sr, Ba, Sb, Sn, Pb ve Bi gibi elementlerle alaşımlandırma yapılarak, mekanik özellikleri artırılmakta ve ortaya koyduğu performansla kullanım sahası giderek artırılmaktadır [1].

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 ARGE (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 [2,3]. Ağırlıktan 40 kg'lık azalma, atmosfere verilen egzoz gazlarında da azalma sağlamaktadır [3]. 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 [2]. 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 [4,5].

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 [6]. 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 [2].

Mg ve Mg alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanı sıra, 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 yaşlandırma sertleşmesi yöntemleri kullanılarak göreceli olarak şekillenebilirlik geliştirilebilmektedir [7].

Dolayısı ile bu çalışmanın ana hedefi, AZ31 Mg alaşımlarında yaşlandırma sertleşmesinin mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla AZ31 Mg alaşımından elde edilen deney numuneleri 400°C' de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulmuştur. Suda soğutulan numunelerin bir bölümü %0,5 ön deforme uygulandıktan sonra diğer bölümü ise ön deforme uygulanmadan 180°C' de 10-360 dakika aralığında yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma süresinin 60 dakikaya çıkarılmasıyla

alaşımının dayanımı maksimum değere çıkarken bu sreden sonra kademeli olarak düşmüştür. Ayrıca %0,5 n deforme uygulanan numuneler, n deforme uygulanmayan numunelere göre bütün yaşlanma süreleri için daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir.

## BÖLÜM 2

### MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

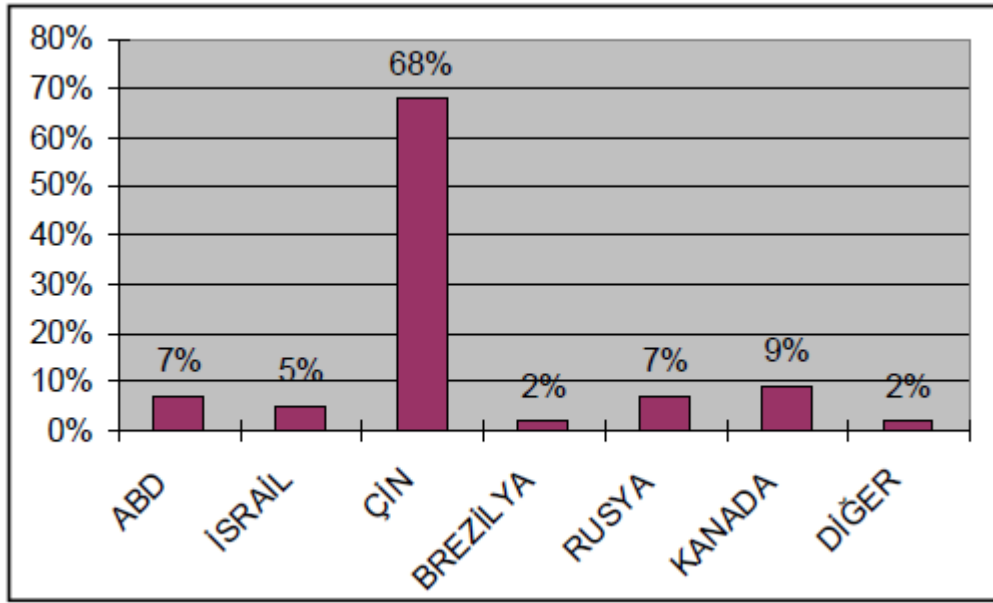
#### 2.1. MAGNEZYUM

Magnezyum, gümüş renkli, hafif ve parlak bir metaldir. Sir Humphrey Davy tarafından 1808 yılında keşfedilen magnezyum, dünyada en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir. Magnezyum (Mg) yapısal uygulamalarda kullanılabilen en hafif metaldir [8]. 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 [2]. Element ilk olarak Sir Humphrey Davy tarafından 1808 yılında keşfedilmiştir. Mg' nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir [8,9].

Çizelge 2.1. Saf magnezyumun fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Ergime Noktası (°C)	650 ± 2
Kaynama Noktası (°C) 1107 ± 10	1107 ± 10
Ergime Gizli Isısı (MJ/kg)	0,37
Yanma Isısı (MJ/kg)	25,1
Elektriksel Direnci 20°C'de (μΩ cm)	4,45
Isıl İletkenliği 25°C'de (W/(kg K))	155
Isıl Genleşme Katsayısı (Lineer) 20°C'de	25,2 * 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Yoğunluk (g/cm) <sup>3</sup>	
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

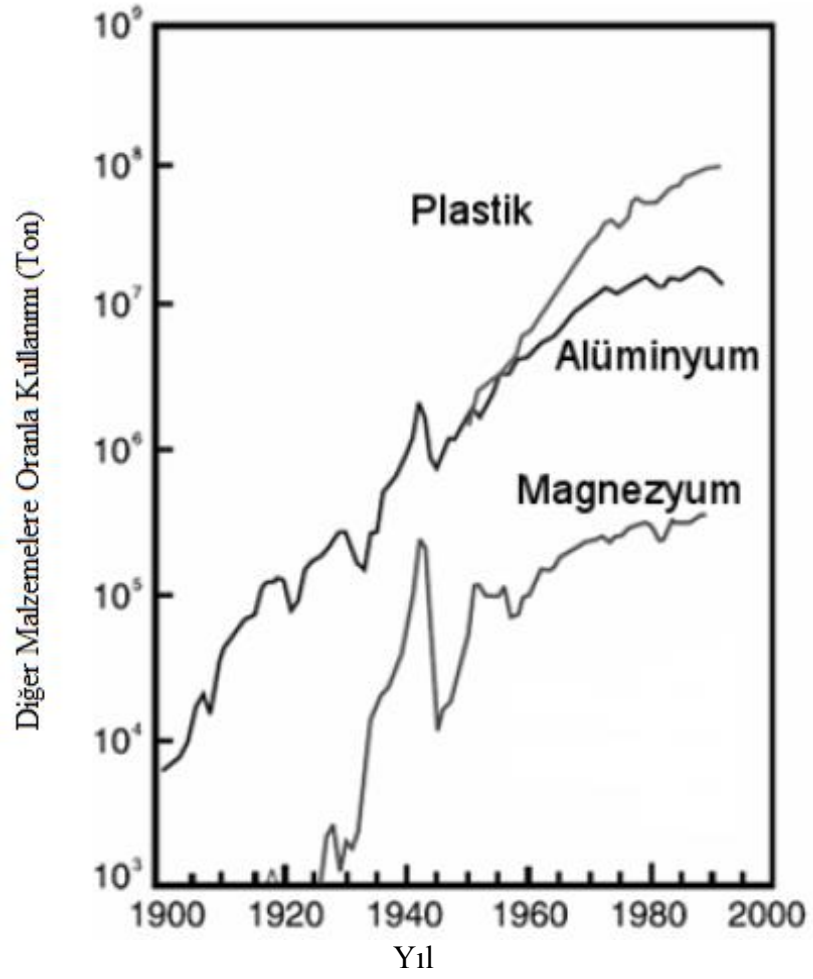
Magnezyum; yer kabuğunun %2,7'sinde ve okyanusların %0,13'ünde bulunması sebebiyle Mg elementi yer kabuğunda yaygın olarak bulunan, periyodik tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir [4]. Mg üretiminin büyük bir kısmı, I. Dünya Savaşı'ndan önce fişekçilik sektöründe kullanılmakta idi. I. Dünya Savaşı sırasında güçlü askeri talep nedeniyle fabrikalar Birleşik Krallık, Kanada ve A.B.D.'ye yayılmıştır [10]. Şekil 2.1'de 2004 yılında Mg üretimi yapan ülkeler ve oranları verilmiştir.



Şekil 2.1. 2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretimi ve oranları [11].

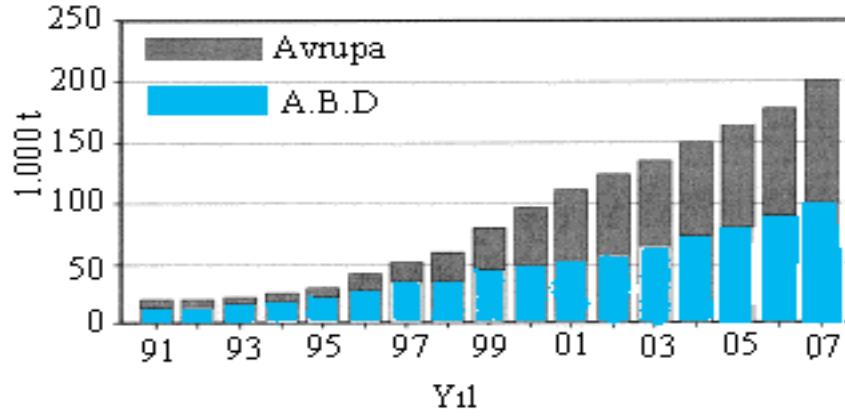
Magnezyumun saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi, dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu gerçek, değişik alaşımlarının üretilmesini gerektirmiştir. Magnezyum alaşımlarında en önemli özellik, hafifliktir. Bu açıdan, bazı magnezyum alaşımlarının özgül çekme dayanımı, alüminyum ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyüktür. Bundan dolayı, bugün uçak sanayinde yaygın olarak magnezyum alaşımları kullanılır. Mg alaşımının diğer malzemelere göre yıllara bağlı olarak kullanımı Şekil 2.2'de görülmektedir. Magnezyum alaşımlarının oda sıcaklığında şekillendirilebilmeleri zor olmakla beraber, kaynak edilebilirler. Magnezyum alaşımlarında en önemli iki alaşım elemanı alüminyum ve çinkodur. Alüminyum dayanımı, çinko tokluğu artırır. Ayrıca mangan ilavesi korozyon direncini artırır [13].





Şekil 2.2. Mg metalinin diğer malzemelere göre yıllara bağlı kullanımı [21].

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 [10]. Şekil 2.3'de 1991-2007 yılları arasında Avrupa ve ABD'de Mg kullanımı gösterilmiştir [18].



Şekil 2.3. 1991-2007 yılları arasında Avrupa ve ABD' de Mg kullanımı.

Yapısal uygulamalar savaş esnasında askeri amaçlı kullanımlarla, hava taşıtları öncelikli olmak üzere sınırlıydı. Bunun tipik uygulamaları motor parçaları, uçak iskeletleri ve iniş takımlarıdır. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi son 16 yılda Avrupa ve A.B.D'de Mg kullanımı oldukça artmıştır. 1991 yılında Avrupa'da yaklaşık 20 bin ton, A.B.D.'de 30 bin ton olan Mg kullanımı 2007 yılına gelindiğinde Avrupa'da 200 bin ton A.B.D.'de ise 100 bin ton seviyelerine yükselmiştir [18].

## 2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI VE STANDARTLARI

Mg alaşımları ASTM (A275) standart 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 yüzdelik dilimleridir. Çizelge 2.3'de yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir.

Çizelge 2.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları [4,6,7,8,10].

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 AZ31 alaşımının açıklanması 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.

3→ Alaşımdaki Al oranının yaklaşık 2,5-3,5 arasında olacağını ifade eder.

1→ Alaşımdaki Zn oranının yaklaşık 0,6- 1,4 arasında olacağını ifade eder.

Magnezyum alaşımları ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94 de göre standartları Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) [9,13].

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları					
	AM50	AM60	AS41	AZ61	AZ80	AZ91
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	3,7-4,8	6,5	7,8-9,2	8,5-9,5
Zn	0,20 max.	0,20 max.	0,10 max.	1,0	0,2-0,8	0,45-0,90
Mn	0,28-0,50	0,26-0,50	0,35-0,60	0,15	0,15-0,5	0,17-0,40
Si	0,05max.	0,05max.	0,60-1,4	0,20 max.	0,10 max.	0,05 max.
Fe (max)	0,004	0,004	0,0035	-	0,05	0,004
Cu (max)	0,008	0,008	0,015	0,08	0,05	0,025
Ni (max)	0,001	0,001	0,001	0,010	0,005	0,001
Be	-	-	-	-	0,002	-
Ce	-	-	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	-	-
Diğer	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01
Mg	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 [15,16]. Firmalarca geliştirilen bu alaşımların bileşimleri Çizelge 2.4 ve mekanik özellikleri Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımları (ASTM B80) [15].

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 2.5. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımlarının mekanik özellikleri [8,15].

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 [16].

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 [16,17]. 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 [16,17].

### **2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ETKİLERİ**

Magnezyum da diğer metaller gibi nadiren saf halde kullanılır. Mg hegzagonal bir kafes yapısına sahiptir ve sahip olduğu kristal yapıda çok fazla sayıda elementle katı çözünebilirliğe müsaade eder. Alaşımlandırılmadaki 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 alaşımlar genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur. Mg alaşımlarındaki en çok kullanılan alaşım elementi Al'dir [4,10,27].

Mg alaşımları 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 oluşmeyebilir. Ayrıca, katı çözeltili oluşturabilmek için iki elementinde aynı kristal yapıya sahip olması gerekir [10,16]. Çizelge 2.6'da ikili Mg alaşımlarında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik verileri verilmiştir.

Çizelge 2.6. İkili Mg alaşımlarında oluşan katı intermetalik fazlar ve çözünebilirlik.

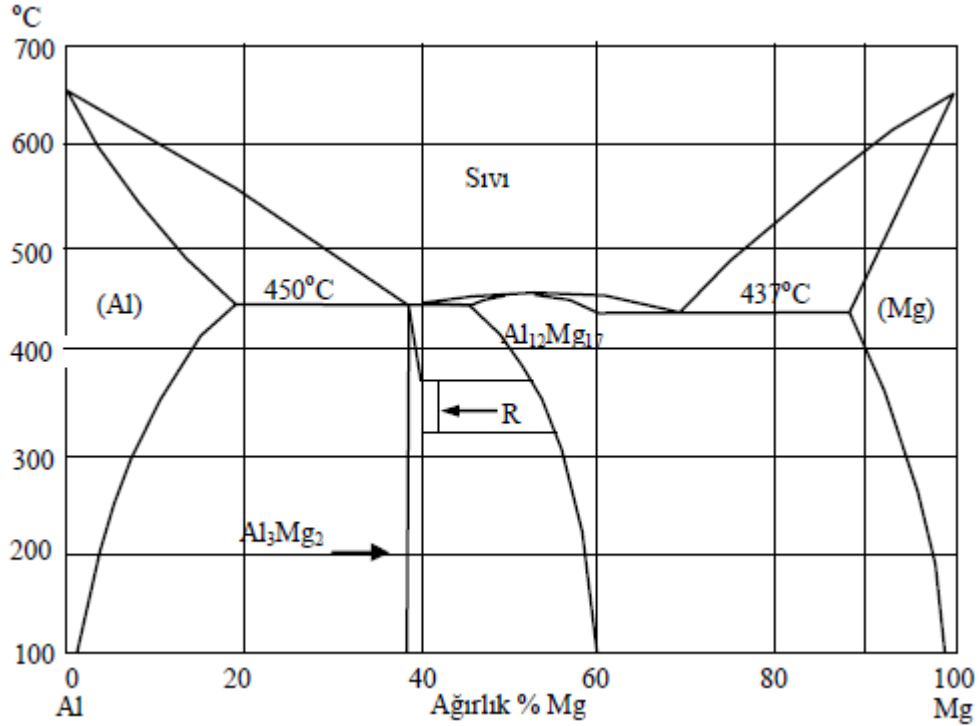
Sistem	Max. Çöz.		Faz	Ergime noktası (°C)	Sistem	Max. Çöz.		Faz	Ergime noktası (°C)
	(% ağı.)	(% at.)				(% ağı.)	(% at.)		
Mg-Al	12,7	11,6	Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub>	402	Mg-Sm	5,8	0,99	Mg <sub>62</sub> Sm	-
Mg-Ca	0,95	0,58	Mg <sub>2</sub> Ca	714	Mg-Gd	23,5	4,53	Mg <sub>6</sub> Gd	640
Mg-Sc	25,9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

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

### 2.3.1. Alüminyum (Al)

Mg esaslı alaşımlarda Al, Mg'nin çökelti dayanımını, ergiyin dökülebilirliğini geliştirir ve döküm alaşımlarının mikro gözeneklerini azaltır. Al katkısı alaşımın sertliğini, dayanımını ve katılaşıma zamanını artırmakta, fakat sünekliğini azaltmaktadır. Katı eriyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi ile oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalığı düşük sıcaklıklarda ( $\leq 120^{\circ}\text{C}$ ) oluşarak alaşımın dayanımını geliştirir.

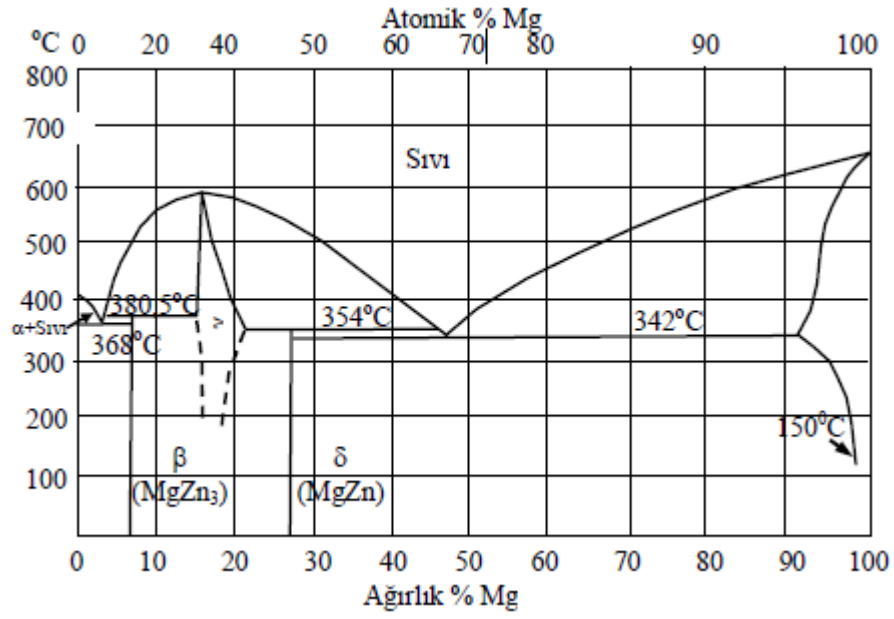
Bununla birlikte, fazla miktarda Al içeren alaşımlar mikro gözeneklere karşı eğilimlidirler [4,10,27,28]. Şekil 2.4’de Mg-Al denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.4. Mg-Al denge diyagramı [29,30].

### 2.3.2. Çinko (Zn)

Zn, tane sınırlardaki ötektik miktarını artırarak, alaşımın katılaşıma sıcaklığını düşürmektedir. Korozyon özelliklerinde Cu'nun kötü etkisini yok etmek için Zn ilave edilmektedir [4,23,28]. Zn, çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında dayanımı ve aynı zamanda ergiyiğin 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 [4,10]. Şekil 2.5’de Mg-Zn denge diyagramı verilmiştir.

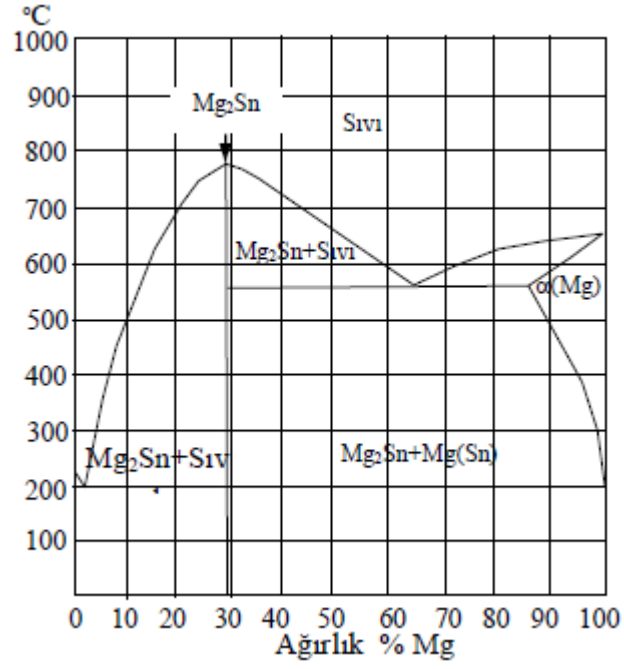


Şekil 2.5. Mg-Zn denge diyagramı [10,28].

### 2.3.3. Kalay (Sn)

Sn, sünek bir element olmakla beraber, Mg'den daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve Mg'den daha az akıcılığı olan bir elementtir [31]. Mg'a ilave edilen Sn, alaşımın sünekliliğini artırır, sıcak işlem sırasında da alaşımın çatlama eğilimini azalttığı için aynı zamanda alaşımın işlenebilirliğini de artırmaktadır [12]. Sn içeren alaşımda Mg<sub>2</sub>Sn intermetalik faz oluşumu soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızlarında çubuk tipi Mg<sub>2</sub>Sn partiküllerin gözlenmesi Mg matrisi ile birlikte olur [32]. Şekil 2.6'de Mg-Sn denge diyagramı görülmektedir.

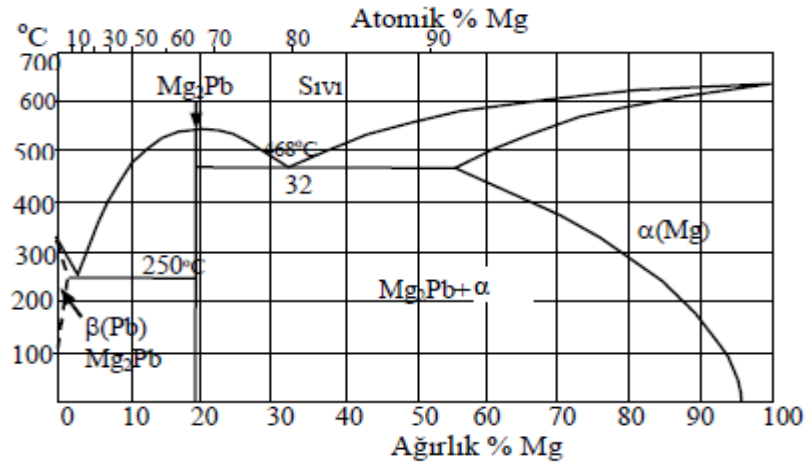




Şekil 2.6. Mg-Sn denge diyagramı [29,30].

#### 2.3.4. Kurşun (Pb)

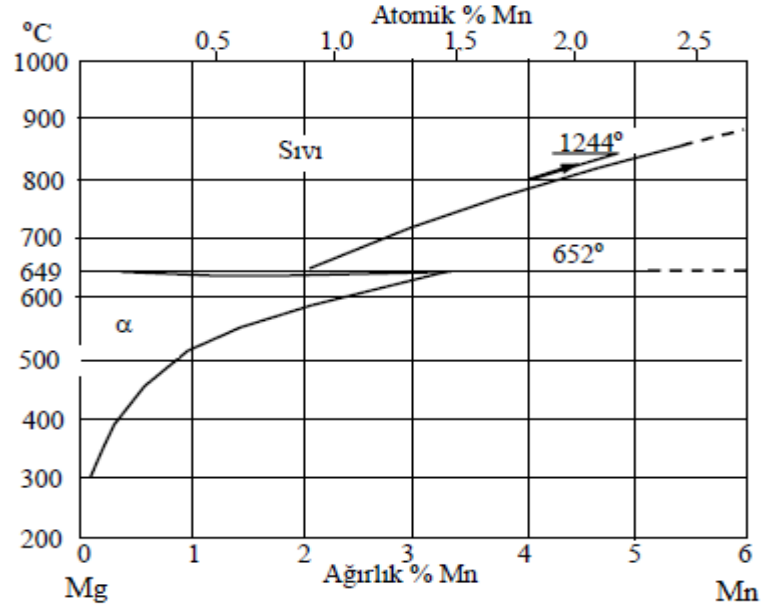
Alaşıma ilave edilen Pb iyi bir çözünürlüğe sahip olduğundan; yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 460°C) %40'a kadar Pb çözünmekte ve ayrı faz olarak ortaya çıkmamaktadır. Şekil 2.7'de verilen Mg-Pb denge diyagramı incelendiğinde alaşım sıcaklığı azaldıkça Mg<sub>2</sub>Pb+α fazı oluşmaktadır. Pb, iyi bir çözünürlüğe sahip element olduğundan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik fazını inceltmektedir [33].



Şekil 2.7. Mg-Pb denge diyagramı [30].

### 2.3.5. Mangan (Mn)

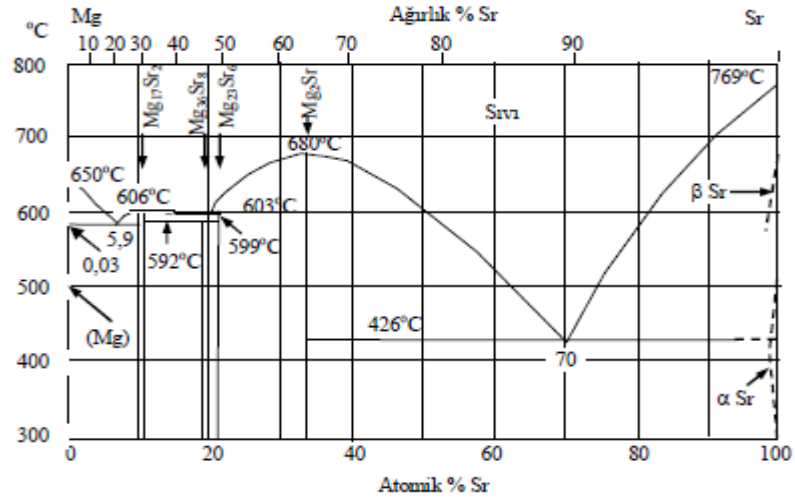
Alaşıma ilave edilen Mn daha çok korozyon direncini artırmak için kullanılır. Mn'in Mg alaşımlarında, korozyon direncine etkisi fazladır. Fe-Mn çökeltilerinde, Fe'in kontrolü için Mn kullanılır. Mn, Mg alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ve Fe'in etkisini azalttığı için, korozyonu engeller. Fakat, Mg alaşımlarının dayanımında Mn'in etkisi azdır [4,9,10,28]. Şekil 2.8'de Mg-Mn denge diyagramına göre Mn, Mg içersinde %3,4'e kadar sıcaklığa bağlı olarak katı eriyik oluşturabilmektedir.



Şekil 2.8. Mg-Mn denge diyagramı [30].

### 2.3.6. Stronsiyum (Sr)

Stronsiyum'un (Sr) mikro gözeneklerin dağılmasında etkisi vardır ve Mg alaşımlarının porozite eğilimini azaltır. Sürünme direncini artırır. Sr ilavesinin Mg alaşımlarında korozyona etkisi çok azdır [10]. Şekil 2.9'da Mg-Sr denge diyagramı verilmiştir.



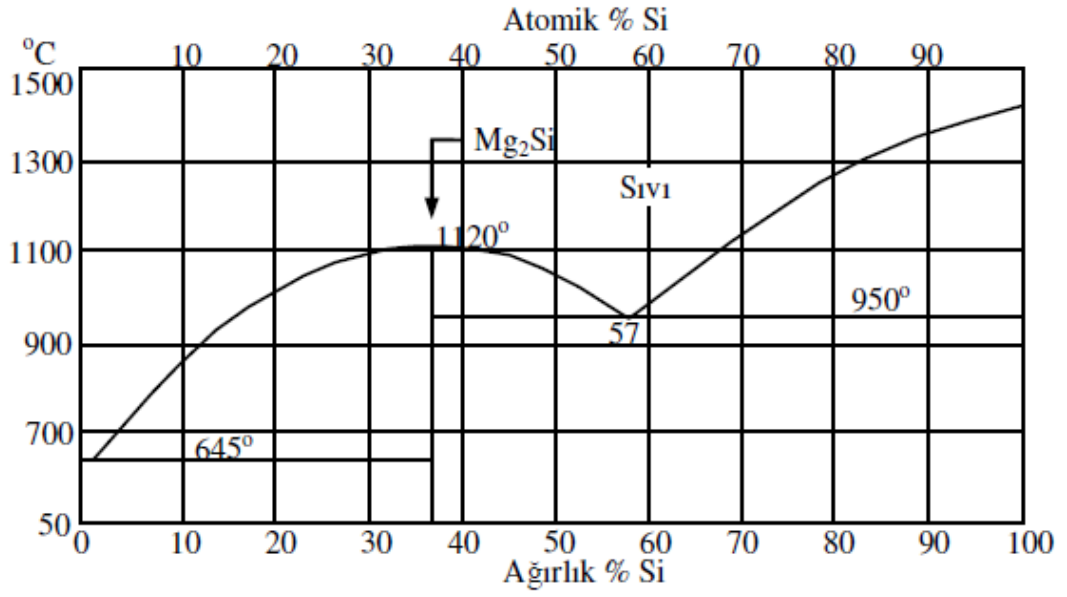
Şekil 2.9. Mg-Sr denge diyagramı [10,30].

### 2.3.7. Toprak Alkali Elementleri (RE)

RE elementleri yüksek ısı dayanımını ve sürünme direncinin artırdığını ve döküm porozitesini azalttığı araştırmalar sonucunda bilinmektedir [4,10]. 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 [4,7,10].

### 2.3.8. Silisyum (Si)

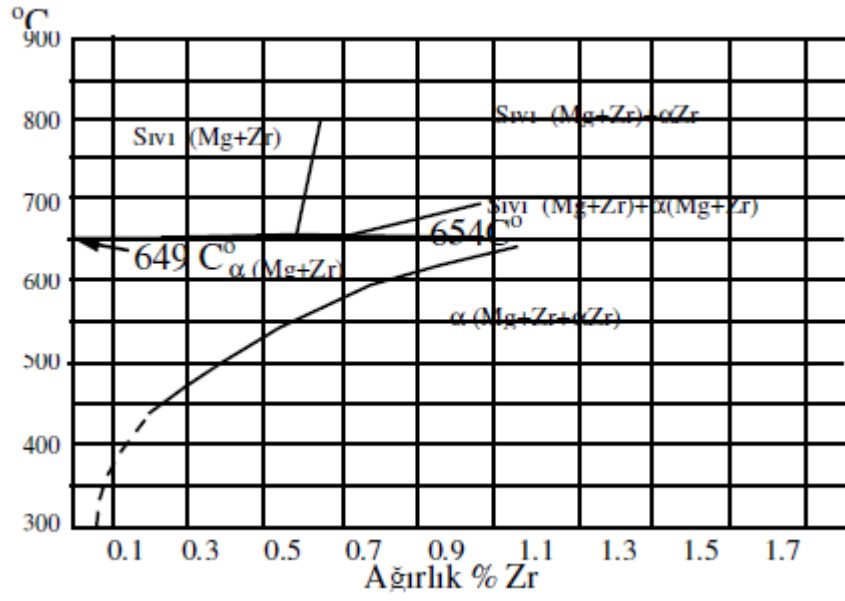
Mg alaşımlarına eklenen Si, alaşımların yüksek sıcaklıklarda dayanımını artırmaktadır. Eğer alaşımda Fe de varsa Si, Mg alaşımlarının korozyona karşı direncini azaltır.[67]. Si atomları Mg matrisi içerisinde, oda sıcaklığında katı halde Mg<sub>2</sub>Si intermetalik fazını oluşturur [63]. Kuma dökümlerde oluşan Mg<sub>2</sub>Si fazı basınçlı dökümlerde oluşana göre yavaş soğumadan dolayı kabardır ve bu da alaşımı kırılğan yapmaktadır [72]. Şekil 2.10'da Mg-Si denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.10. Mg-Si denge diyagramı [65].

### 2.3.9. Zirkonyum (Zr)

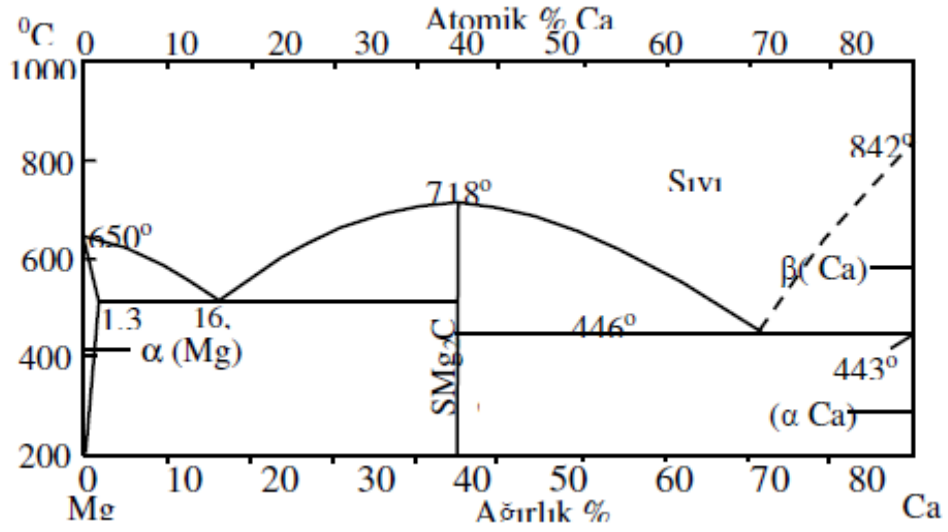
Alaşıma ilave edilen Zr, Mg alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılır. Zr, oda sıcaklığında mekanik özellikleri geliştirir [72]. Zn, RE ve Th içeren Mg alaşımlarında Zr tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Zr, toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında dökülebilirliği geliştirir [75]. Şekil 2.11’de verilen Mg-Zr denge diyagramından da görüldüğü üzere Zr’un katı eriyik oluşturma oranı %1.2 civarındadır.



Şekil 2.11. Mg-Zr denge diyagramı [68].

### 2.3.10. Kalsiyum (Ca)

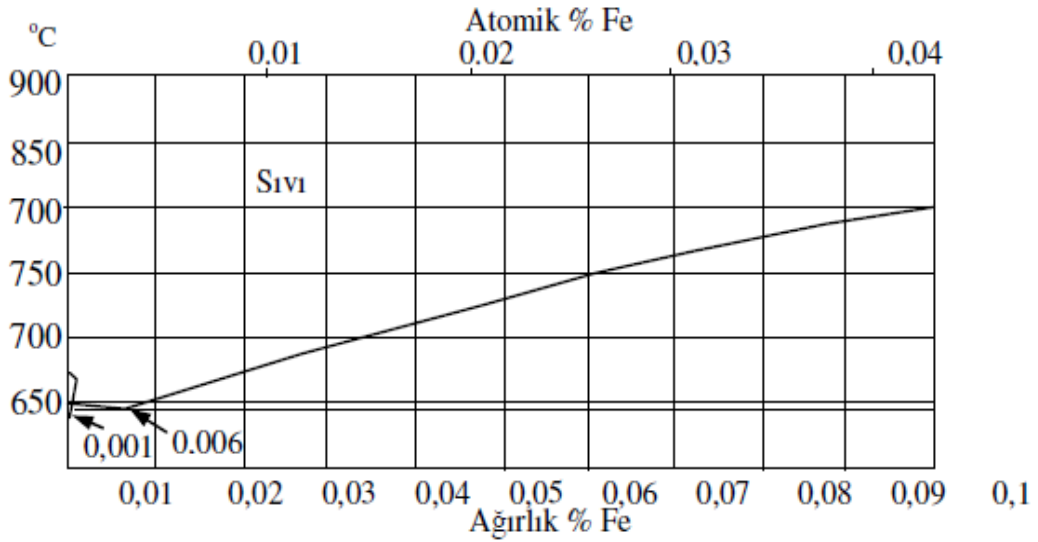
Ca'un, Mg içerisinde maksimum çözünebilirliği 565°C'de %1.34, 200°C'de ise yaklaşık %0'dır. İntermetalik bileşim olan Mg<sub>2</sub>Ca'un ergime noktası 715°C'ye ulaşır. Mg'da Ca sınırlı çözünebilirliği ile katı eriyik sertleşmesine etkisi sınırlıdır. Mg alaşımlarına %1 oranında katılan Ca alaşımın sürünme direncini geliştirmesinin yanı sıra sıcak yırtılmalara karşı olan eğilimi artırır. Ayrıca, az da olsa ergiyik metalin oksidasyonunu azaltmaktadır [69]. Şekil 2.12'de Mg-Ca denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.12. Mg-Ca denge diyagramı [70].

### 2.3.11. Demir (Fe)

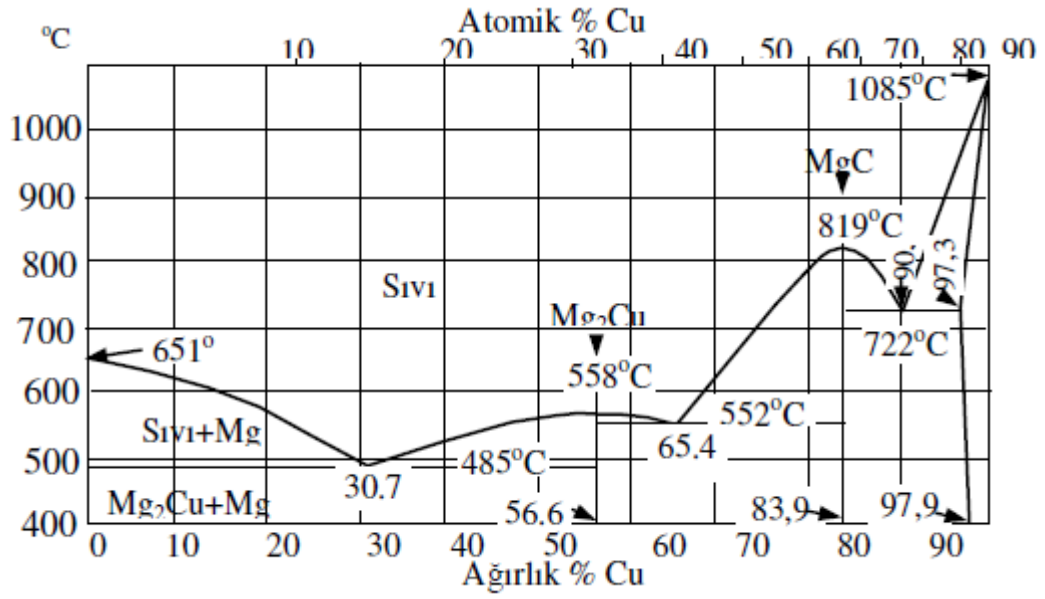
Mg'un çelik kalıplarla kuvvetli reaksiyona girmesini artırır. Korozyon özelliklerini büyük oranda azaltır [63]. Mg alaşımlarında Fe içeriği %0.01-0.03 aralığını geçmemelidir. Şekil 2.13'de Mg-Fe denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.13. Mg-Fe denge diyagramı [68].

### 2.3.12. Bakır (Cu)

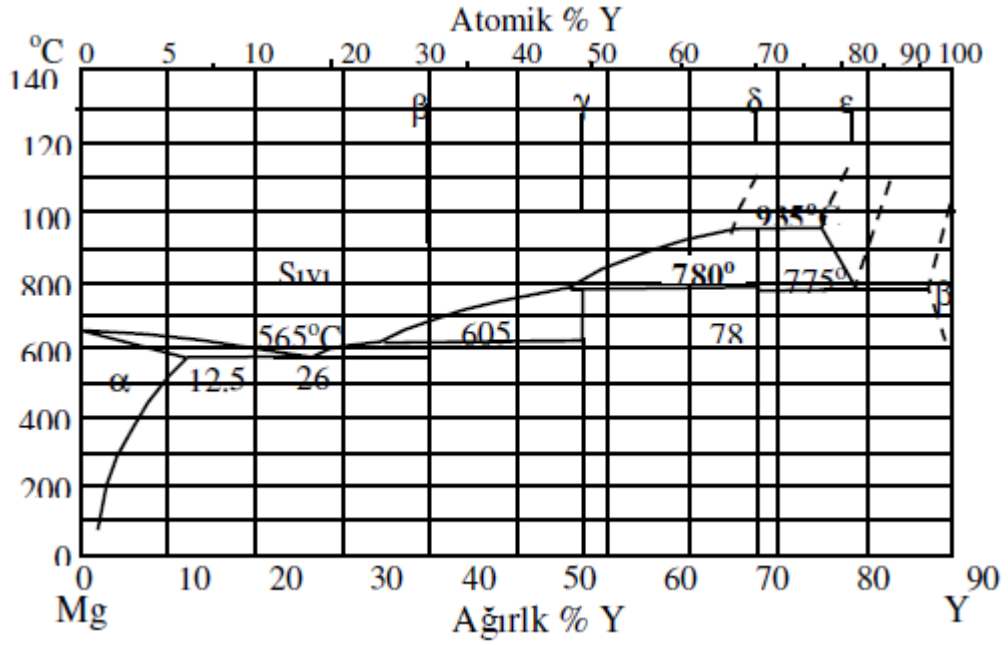
Cu, dökülebilirliği iyileştirir. Mg alaşımlarında Cu miktarı %0.05'i aştığında korozyon özelliklerine zararlı olmaktadır. Bununla birlikte Cu alaşımın yüksek sıcaklıklara dayanımını artırır [63]. Şekil 2.14'de Mg-Cu denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.14. Mg-Cu denge diyagramı [68].

### 2.3.13. Yttriyum (Y)

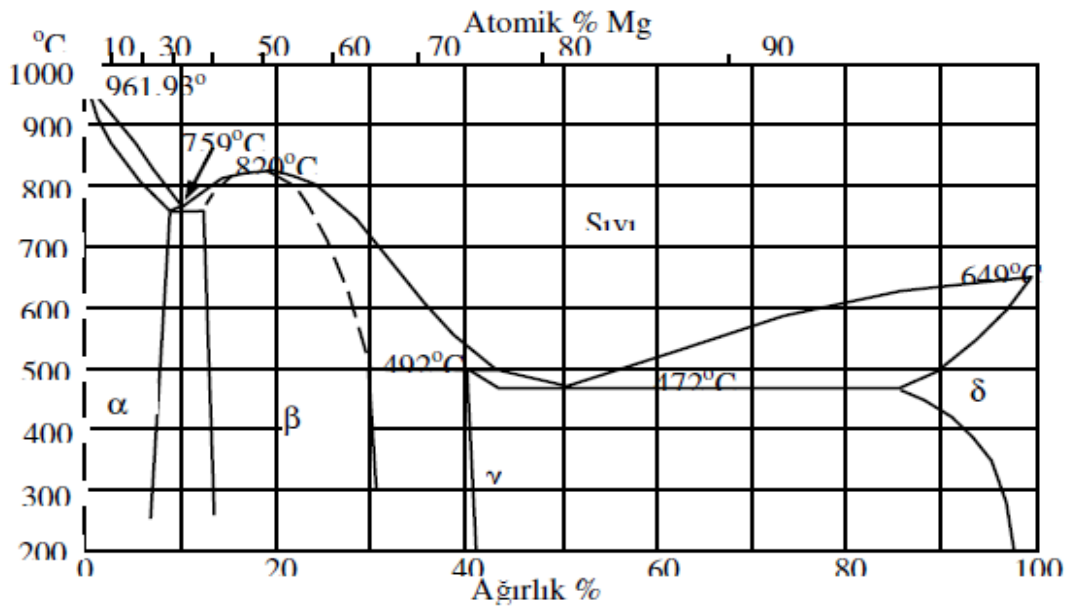
Y, Mg alaşımlarının dayanımını artırır. Diğer toprak elementleriyle birlikte kullanıldığında 300°C sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir [63]. Ayrıca Y, Mg'da yüksek çözünürlüğe sahiptir (%12.5) ve azalan sıcaklıkla birlikte çözünürlük de azalmakta ve çökelti sertleşmesi oluşmasına sebep olmaktadır [62]. Şekil 2.15'de Mg-Y denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.15. Mg-Y denge diyagramı [72].

### 2.3.14. Gümüş (Ag)

Ag elementi katkısı Mg alaşımlarının sertliğini geliştirir, ancak Ag'ün pahalı olusundan dolayı kullanımı sınırlıdır [65]. Şekil 2.16'da Mg-Ag denge diyagramı verilmiştir.

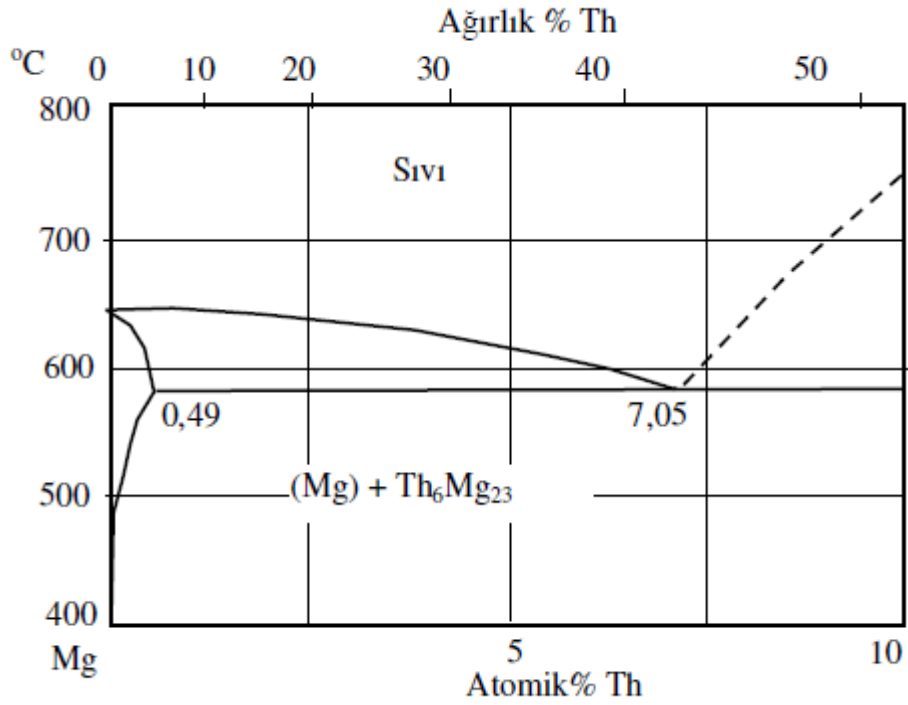


Şekil 2.16. Mg-Ag denge diyagramı [65].



### 2.3.15. Toryum (Th)

Alaşıma ilave edilen Th, Y'da olduğu gibi, 300oC sıcaklıklara kadar gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir [66]. Dökülebilirliği iyileştirir, mikroporozite eğilimini azaltır ve Zn ile birlikte kullanıldığında kaynak edilebilme kabiliyetini geliştirir [80]. Şekil 2.17'deki Mg-Th denge diyagramından Th yaklaşık %0.49 oranında katı eriyik yaparken, %7.05 değerinde ötektik oluşturduğu görülmektedir.

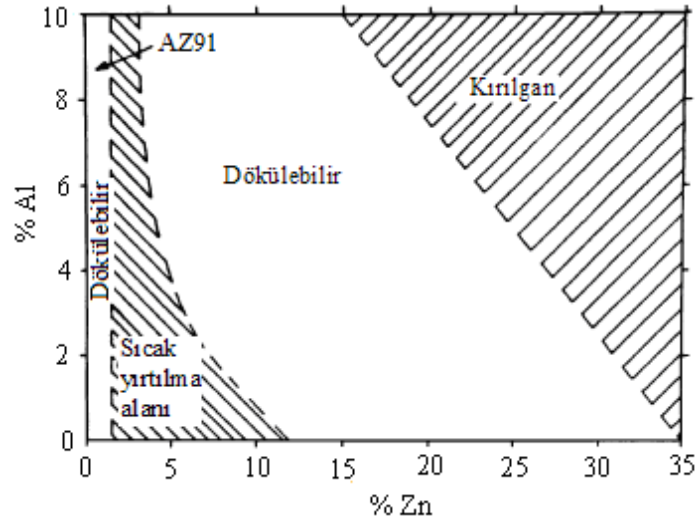


Şekil 2.17. Mg-Th denge diyagramı [64].

## 2.4. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

### 2.4.1. 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 [10,36]. Şekil 2.18'de Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirlik aralıkları verilmiştir.



Şekil 2.18. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi [7,36,37].

Diyagram incelendiği zaman dört bölgeden oluştuğu görülmektedir.

- 1) Düşük Zn'de dökülebilir bölge :  $\alpha$  (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) Kırılğan bölge

#### 2.4.2. AZ31 Alaşımları

Yoğunluğu 1.78 g/cm<sup>3</sup> olan, alüminyum, magnezyum, mangan ve çinko içeren bir magnezyum alaşımıdır. Organik ortamlarda dayanıklı, deniz suyunda ve asidik ortamlarda dayanıksızdır. AZ31 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. AZ31 malzemesinin kimyasal bileşimi.

Alaşım	Mg	Al	Zn	Mn	Si <	Fe	Cu <	Ni <	CA	Diğer
AZ31	94-96	2,5-3,5	0,6-1,4	0,2-1,0	0,05	0,002	0,01	0,001	0,04	0,01

### **2.4.3. 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  $\alpha$ -Mg ana matrisi içerisinde tane sınırları boyunca uzanan ötektik ve intermetalik fazlarından meydana gelmektedir.

### **2.4.4. AZ91 Alaşımları**

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 [10,38]. Yorulma dayanımı, sürünme direnci ve gerilim direnci çok iyidir. Bununla birlikte AZ91 için en iyi sürünme direnci oda sıcaklığında gerçekleştiği rapor edilmiştir [10].

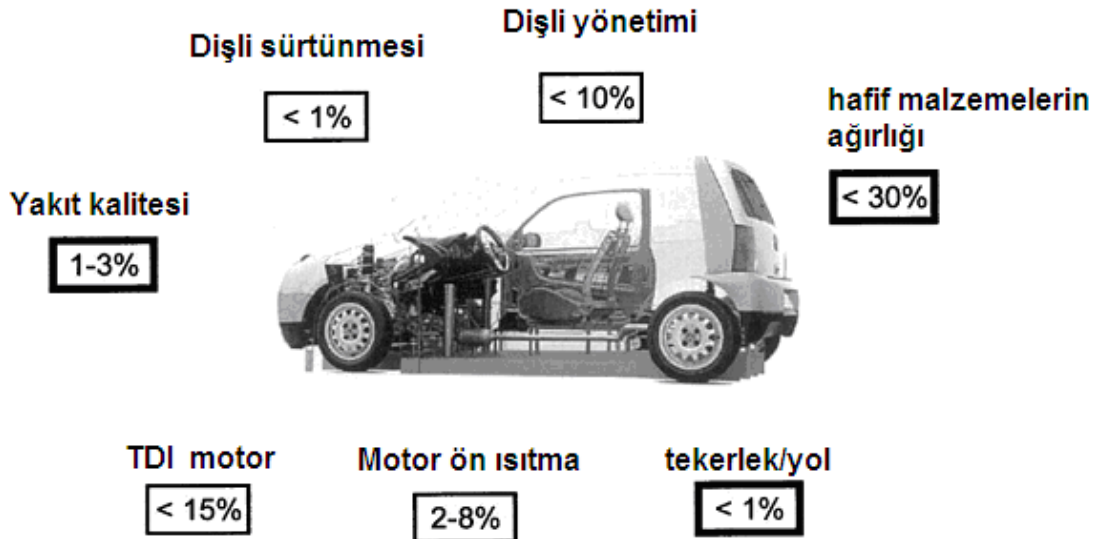
## **2.5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI**

Magnezyum metalinin saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu durum, değişik alaşımların üretilmesini gerektirmiştir. Mg alaşımlarının da en önemli özelliği hafifliktir. Bu açıdan bazı Mg alaşımlarının özgül çekme dayanımı, Al ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyüktür. Bundan dolayı bugün elektronik, savunma, havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak Mg alaşımları kullanılmaktadır [29].

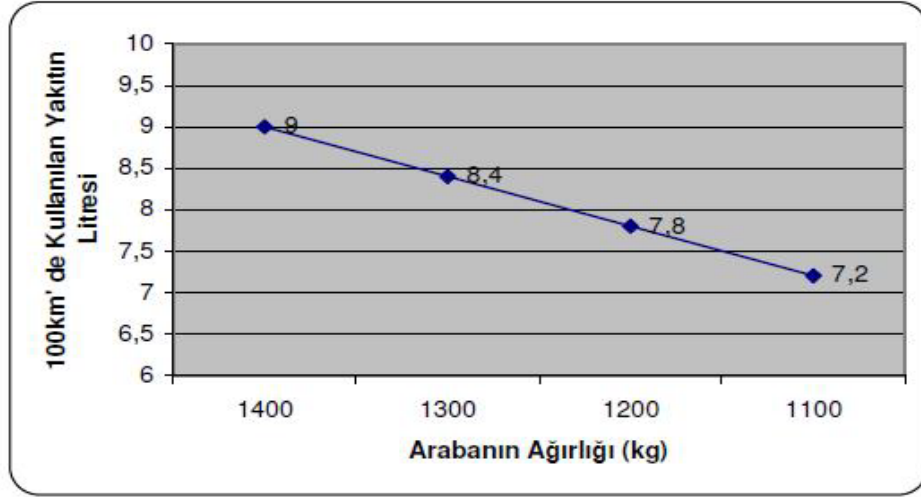
### 2.5.1. Havacılıkta ve Otomotiv Sektöründe Magnezyum

Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal 7 metal olarak ön plana çıkar. Günümüzde de 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 günümüz 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 [34].

Şekil 2.19'da Mg alaşımlarının, CO<sub>2</sub> emisyonunu düşürmek için kullanıldığı yerlerde teknik ölçümlere etkileri görülmektedir [18]. Şekil 2.20'de ise araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki görülmektedir.

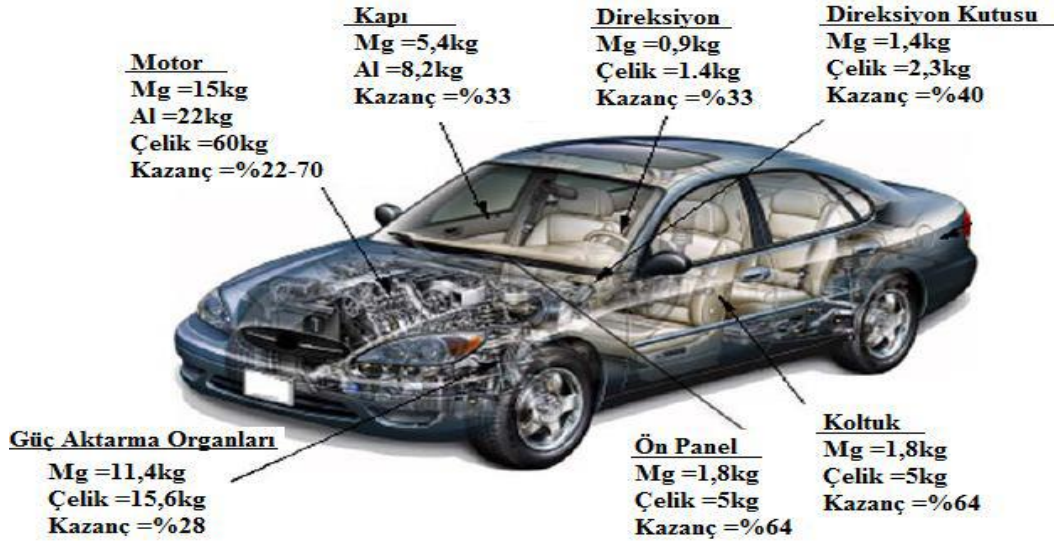


Şekil 2.19. Mg Alaşımlarının CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkisi.



Şekil 2.20. Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki [19,22].

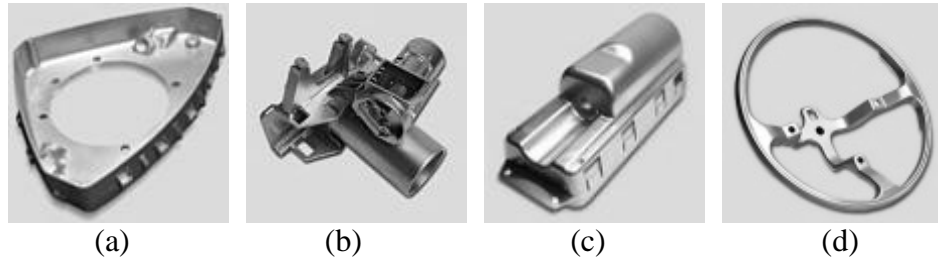
Mg'nin otomobil parçalarında kullanımı yaklaşık olarak son 80 yıldadır. 1930 yılında Louse Chevrolet tarafından bir prototip arabada Mg pistonları ve Volkswagen Beetle motorunda ve aktarma organlarında 20 kg'dan fazla Mg kullanılmıştır [20]. Bu süreç zarfında, Mg genellikle sınırlı potansiyele sahip özel bir materyal olarak varsayılmıştır. 1970'lerdeki petrol krizinden beri Mg, otomobil endüstrisinde çok daha önemli bir rol oynamıştır. Şekil 2.21' de otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar [23,24].

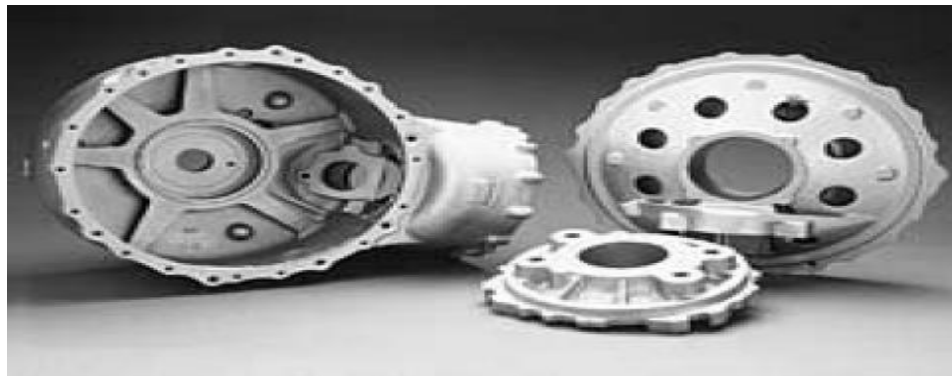
Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar (AM50, AM60) iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler [9]. AS41, AS21 (Mg-Al-Si-Mn) ve AE42 (Mg-Al-Re) alaşımları artan sıklıkla, Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarından daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçaları imalı için kullanılır [10].

AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar ve mobil telefonlarda kullanılır [2]. Şekil 2.22' de Mg alaşımından üretilmiş otomobillerin hemen hemen her bölümünde kullanıldığı parçalar görülmektedir.



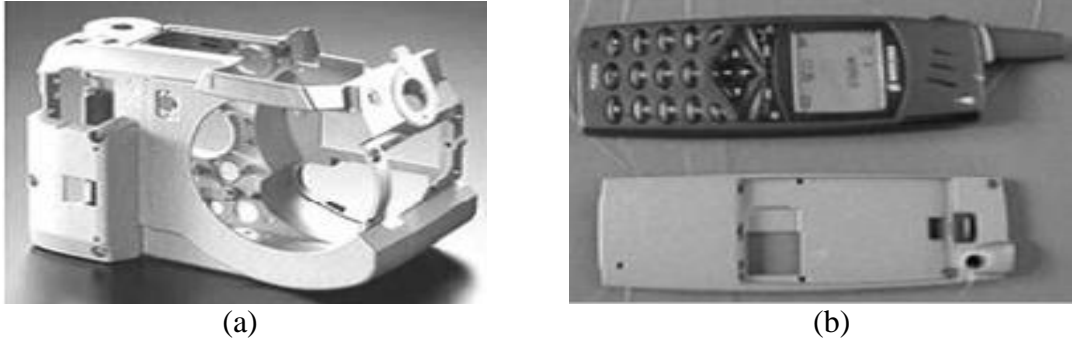
Şekil 2.22. AM alaşımı döküm parçaları a) Hava yastığı kutusu b) Direksiyon kilit kutusu c) Yolcu hava yastığı kilidi d) Direksiyon simidi [39].

AE42 alaşımları 200°C'nin üzerindeki servis koşullarında, transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılır [2]. Şekil 2.23'de WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu görülmektedir.



Şekil 2.23. WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu [16,26].

Süper hafif Mg-Li esaslı alaşımlar bilgisayar elemanı olarak plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir [2,3]. Şekil 2.24'de Li esaslı Mg alaşımından dökülmüş kamera ve cep telefon kutusu görülmektedir.



Şekil 2.24. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları a) kamera kutusu, b) cep telefonu kutusu [3].

## 2.6. MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mg-Al ikili sistemi en eski ve en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. Şekil 2.4'de verilen ikili Mg-Al diyagramı incelendiğinde ötektik reaksiyon, bir başka deyişle  $Sıvı \rightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha (Mg)$  dönüşümü,  $437^{\circ}C$  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,  $420^{\circ}C$  civarında  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşiğinin yayınmasıyla sonuçlanır ve şekillendirebilirlik yükselir.  $Mg_{17}Al_{12}$  çökmesi  $150^{\circ}C$ 'de yaşanmaya neden olur ve bu çökeltiler dayanımı geliştirir. Zn, Mn, Si gibi diğer elementler Mg-Al sistemi içerisinde alaşımlandırılarak özelliklerinin gelişimi için kullanılır [4,7,9,10].

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 dördü 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 [4,8,10]. En fazla kullanılan alaşım elementleri Al, Zn, Mn ve Zr dir. RE, Yi ve Ca genellikle yüksek sıcaklıklar için kullanılır [7,10].

## BÖLÜM 3

### MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

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 [42].

#### 3.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

Sınav ultra-hafif alaşımlara karşılık gelen denge diyagramlarının çoğu, magnezyumdan yana zengin ve sıcaklığa bağlı olarak katı bir eriyik içerir: bu alaşımların, dolayısıyla, su verme ve içyapısal çökeltme ile iyileşme olanağı vardır. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarına, aşağıda belirtilen sınırlar içerisinde ısıtma işlemi uygulanabilir.

Mg-Al alaşımları:  $7\% < Al < 12\%$

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

Solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan Mg alaşımının  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de uzun süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulması halinde katı eriyik ayrışır ve fazla doymuşluk halinde bulunan  $Mg_4Al_3$  bileşiğinin çökeltmesi gerçekleşir. Bu tamamlayıcı işlem Mg alaşımının kopma ve akma mukavemetini artırır. Buna karşılık yorulma sınırı ve kopma uzaması düşer ve hatta dökme parçalarda dökümden çıkmış haldekinin altına bile inebilir. Çizelge 3.1'de Al:  $6,0\%$ ; Zn:  $3,0\%$ ; Mn:  $0,35\%$  bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri görülmektedir. Çizelge 3.2'de ise Al:  $8,5\%$ ; Zn:  $0,4\%$ ; Mn:  $0,25\%$  bileşimli alaşımın karakteristik özellikleri görülmektedir.



Çizelge 3.1. 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 <sup>2</sup>	18	24.5	24.9
Y kg/mm <sup>2</sup>	10	12	18.5
A %	4	8	2
Sertlik HB	55	56	77

Çizelge 3.2. 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 <sup>2</sup>	18	26	28
Y kg/mm <sup>2</sup>	10	11	15.3
A %	3	10	6
Sertlik HB	48	50	70

Homojenleştirme işlemleri başlıca dökme parçalara uygulanırken, şekillendirilmiş ürünler (saclar, profiller, dövme veya basma parçalar) genellikle yeniden kristalleştirme ve gerilim giderme tavlmasına tabi tutulur.

Yukarıda sözü edilmiş ısı işlemler üç'e ayrılır. Solüsyona alma ısı işlemi, soğutma ve yaşlandırma. Bunlara ek olarak homojenleştirme ve gerilim giderme işlemleri de uygulanmaktadır. Bunlardan ilki bir çökeltme tipi olup sonuncusu tavlama ile bağlantılıdır. Solüsyona alma ısı işlemi, alaşım malzemesini, bazı bileşenlerin eriyik hale geldiği bir sıcaklığa ısıtılıp buradan hızlı soğutarak katı eriyik oluşturma prensibine dayanır.

Çok değişik bileşimde Mg alaşımları, alüminyumdakiler gibi sertleştirme ve yaşlandırmayla mukavemetlendirilirler. Alaşımların mukavemetlerini artırma kabiliyeti, bileşenlerinin (Al, Zn, Zr vb.) sıcaklıklara magnezyum içinde eriyebilme kapasitesine bağlıdır. Solüsyona alma MgZn<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Mg<sub>3</sub>, Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub> gibi fazların tek faz içerisinde çözünmesiyle oluşur. Ardından yapılan hızlı soğutma neticesinde tek

fazlı doymuş katı eriyik elde edilir. Katı eriyik içerisinde bulunan alaşım elementleri yaşlanma neticesinde çökelirler. Mg alaşımlarının özelliklerinden biri, difüzyon sürecinin yavaşlığıdır. Bu durum faz dönüşümlerinin de yavaş olmasına neden olur. Bu nedenle sertleştirme için (4-24 saat) ve yaşlandırma için de (16-24 saat) uzun tutma sürelerini gerektirir.

İngot döküm parçalar çoğunlukla 15-30 saat süreyle 400-420°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 değiştirm sonucu oluşan sertleşme, yaklaşık 350°C'de yeniden kristalleşme tavlamasıyla giderilir (alaşımların yeniden kristalleşme sıcaklığı 250-280°C'dir).

Döküm alaşımları 200-300°C'de yaşlandırılırlar (T1). Oksitlenmeden kaçınmak için ısıtma, %0,7-1,0 CO<sub>2</sub>'li hava atmosferinde yürütülür. Azami mukavemet artışı elde etmek için, sertleştirmeyi 175-200°C'de bir yapay yaşlandırma takip eder. Mg alaşımlarının yaşlandırılmasında özellikler, Al alaşımlarında olduğundan daha az değişirler. Doğal yaşlandırma, Mg alaşımlarının içyapı ve özelliklerini değiştirmez. Mg alaşımları, oda sıcaklığında çok yavaş yaşlanma sertleşmesine uğrarlar.

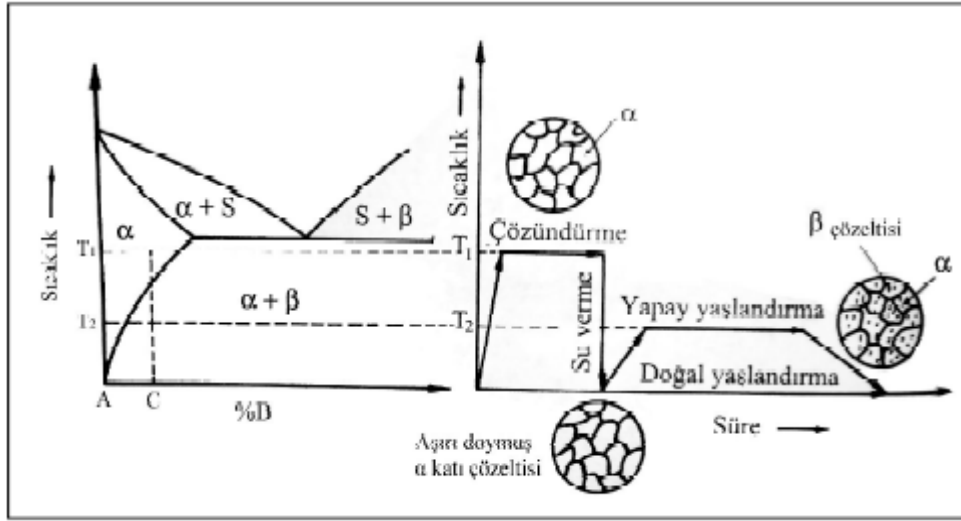
### **3.2. HOMOJENLEŞTİRME**

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 [43]. Homojenleştirme işleminde amaç, dentritik yapıdaki konsantrasyon farklılıklarını giderilmesi, katılaşma sırasında oluşan dengesiz fazların çözülmesi ve alaşımın ekstrüzyon parametrelerinin olumlu yönde etkileyen denge parçacıklarının oluşturulmasıdır. Karmaşık alaşım sistemlerinde dengesiz bileşiklerin yanında malzemenin sünekliliğini azaltan çözünmez denge fazlarda bulunur. Homojenleştirme işlemi ile

bu fazların küreselleşmesi sağlanarak süneklilik arttırılır [44]. 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 farklılıklarının - özellikle impuritelere- dengeye getirilmesi ve dendritik yapının olumsuz etkilerinin giderilmesi arzulanır. İşlem süresini mümkün olduğunca kısaltmak amacıyla, malzeme katılma sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Çok yüksek sıcaklıklara çıkılabilmemesine karşılık, bu sıcaklıkta bekleme süresi diğer tavlama yöntemlerine oranla oldukça uzundur. Bir taraftan yapıdaki bileşim farklılıkları dengelenirken, bir taraftan da tane sınırlarındaki son katılma 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 [44,45].

### 3.3. SOLÜSYONA ALMA

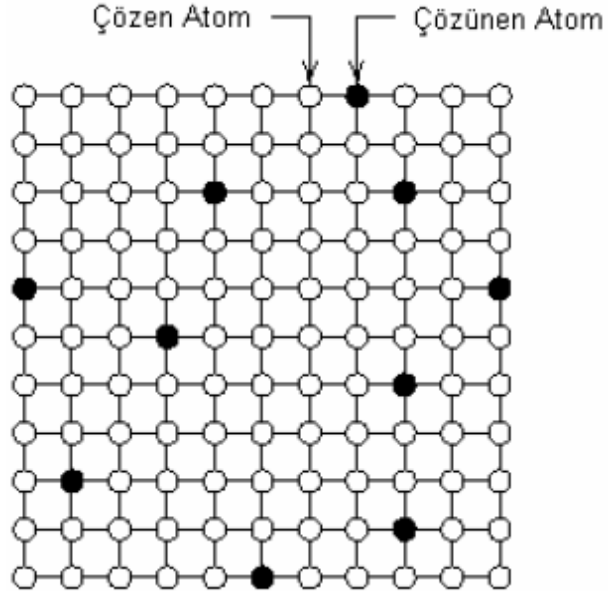
Sıvı durumda her oranda, katı durumda ise kısmen çözünen yapıya sahip bir alaşım (Şekil 3.1), tek fazlı bir yapı ( $\alpha$ ) elde etmek amacıyla, alaşımın faz diyagramında belirtilen, solvüs sıcaklığının üzerinde,  $T_1$  ( $420^\circ\text{C}$ ) sıcaklığına kadar (Şekil 3.1) ısıtılır ve bu sıcaklıkta alaşımdaki bütün fazların ( $\alpha$  ve  $\beta$ ) tek faz içinde çözünmesi sağlanıncaya kadar bekletilir. Bekleme süresi, alaşımların yapısına göre değişiklik gösterir. Alaşımlara uygulanan bu işleme çözüldürme uygulaması veya solüsyona alma ısıtılma işlemi denir [42,48].



Şekil 3.1. Çözüldürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesini gösteren şekil [42].

### 3.4. SU VERME İŞLEMİ

Su verme işlemi, solüsyona alma ısıl işlemi ile elde edilen tek fazlı ( $\alpha$ ) katı çözültisini, çökeltilerin oluşmasına izin vermeyecek şekilde,  $T_1$  ( $420^\circ\text{C}$ ) sıcaklığından süratle soğutmaktan ibarettir (Şekil 3.1).  $T_1$  ( $420^\circ\text{C}$ ) sıcaklığındaki malzemenin, ani olarak bir akışkan içerisinde soğutulması nedeni ile aşırı doymuş bir yapı elde edilir. Aşırı doymuş yapı, malzeme içinde bulunan çözenin (Şekil 3.2) (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 [42].



Şekil 3.2. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı.

### 3.5. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

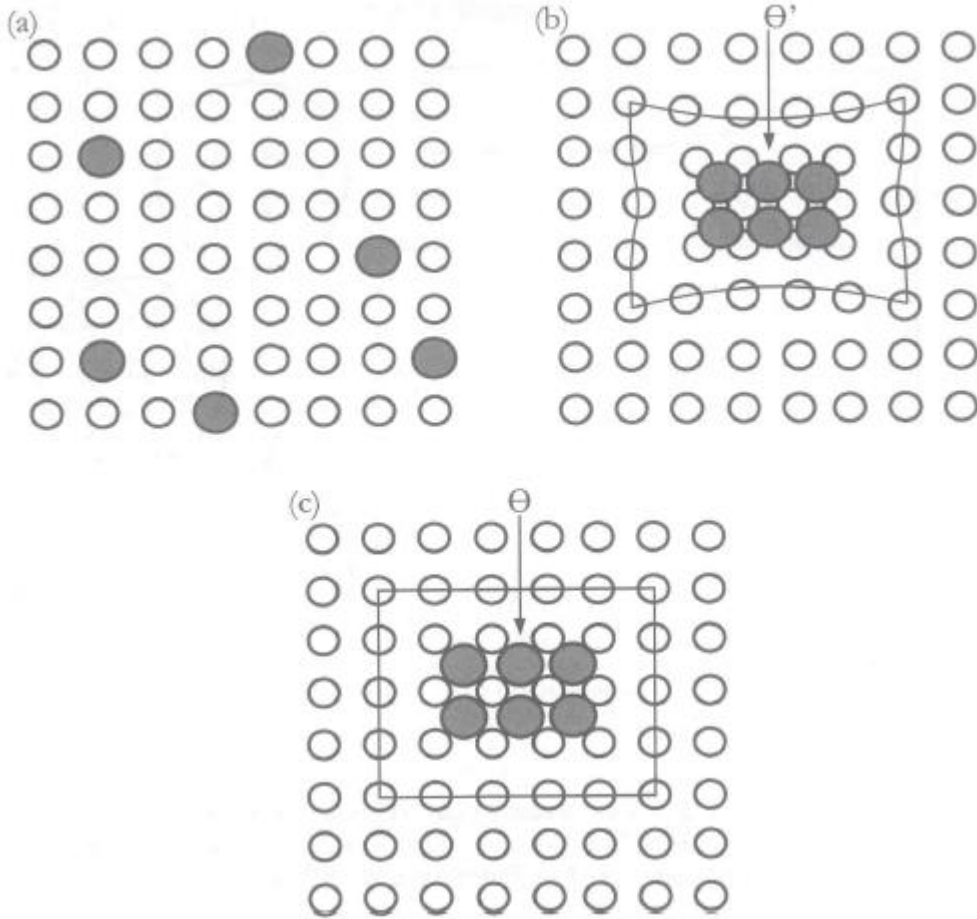
Aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisi ile yeni bir fazın meydana gelmesi olayına teknolojiye “yaşlanma olayı” denir. Burada dikkat edilecek husus, meydana getirilen ikili fazın (üçlü ve daha fazla olabilir),  $\beta$  şeklinde değil de  $\beta$  fazının  $\alpha$  fazı içinde hapsedilerek meydana getirilmesi gerektiğidir. Bu durum ise katı-hal reaksiyonları vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Aslında esas olarak yaşlanma olayı da bir katı-hal reaksiyonudur [24]. Yaşlanma, soğuma ve deformasyon yaşlanmasından meydana gelmektedir. Deformasyon yaşlanması kendi içerisinde statik ve dinamik deformasyon yaşlanması olmak üzere iki türe ayrılmaktadır.

#### 3.5.1. Soğuma Yaşlanması

Solüsyona alma işleminden sonra su verme işlemi sonucunda yapılan yaşlandırma işlemine aynı zamanda soğuma yaşlanması da denilmektedir. Şekil 3.1’ de görüldüğü üzere öncelikle malzeme solüsyona alındıktan sonra ardından su verme işlemi yapılarak yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir.

Yaşlandırma işlemi; hazırlık aşaması, yaşlandırma aşaması ve aşırı yaşlandırma aşaması olmak üzere üç aşamayı içerir. Kuluçka aşaması da denilen hazırlık

aşamasında fazlalık atomlar bir araya gelip kümeleşerek, ilk embrioyu meydana getirirler. Yaşlandırma aşamasında ise çekirdeklenme mekanizması daha etkin hale gelir, yani fazlalık atomlar  $\beta$  fazının çekirdeklerini oluştururlar. Yaşlandırma aşamasında oluşan ara kristal yapısı veya geçiş kafesi, matrisin kafes ile uyumludur. Bu dönemde çökelen faz ( $\beta$ ), matristen farklı bir kafes parametresine sahiptir. Bu fazın, matris yapısı ile uyumlu olması nedeniyle matrisin kafes yapısında çarpılma veya distorsiyon meydana gelir. Kafes yapısında meydana gelen çarpılmanın dislokasyon hareketini engellemesi nedeniyle, bu aşamada alaşımın sertlik ve mukavemeti hızlı şekilde artar. Yaşlandırma sırasında meydana gelen çökeltme aşamaları Şekil 3.3’ de görülmektedir.



Şekil 3.3. Düzenli bir çökeltinin oluşma aşamaları: (a) aşırı doymuş katı çözelti, (b) katı çözelti ile uyumlu olan geçiş kafesi ve (c) katı çözüldüden bağımsız olan kararlı çözelti [67].

Yaşlandırma aşamasında, çökelen fazın kendi kafes yapısını oluşturarak matris kafes yapısından ayrılması sonucunda, matris yapısı ile uyumluluk durumu ortadan kalktığından, matris yapısındaki çarpılma azalır. Çarpılmanın gittikçe azalması nedeniyle alaşımın sertlik ve mukavemetinde azalma meydana gelir. Alaşımın sertlik ve mukavemetinde azalma meydana geldiği aşamaya aşırı yaşlanma aşaması denilir. Bu aşamada, çökelti mikroskop altında görünür hale gelir. Yaşlandırma işlemindeki etkin mekanizma çekirdeklenme ve büyümedir, mekanizma da difüzyona bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda difüzyon hızı düşük olduğundan çekirdeklenme hızı da nispeten düşük olur. Ancak, yaşlandırma süresi arttıkça oluşan çekirdek sayısı arttığından, uzun süreli yaşlandırma sonucunda daha yüksek sertlik değerleri elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda ise difüzyon hızı yüksek olduğundan, hem çekirdeklenme hızı ve hem de büyüme hızı yüksek olur. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde kısa sürede meydana gelen tane büyümesinden dolayı alaşımın sertlik ve mukavemeti azalır.

### **3.5.2. Deformasyon Yaşlanması**

Malzemeler soğuk deformasyondan sonra genellikle düşük sıcaklıklarda tavlama veya oda sıcaklığında uzun süre bekletilmesi sonucunda akma ve çekme mukavemetlerinin artması, sünekliğin azalması olayına deformasyon yaşlanması denir. Soğuk deformasyon ile giderilmiş olan akma olayı yaşlanma sonunda tekrar görülür. Deformasyon yaşlanma sertleşmesi statik deformasyon yaşlanması ve dinamik deformasyon yaşlanması olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

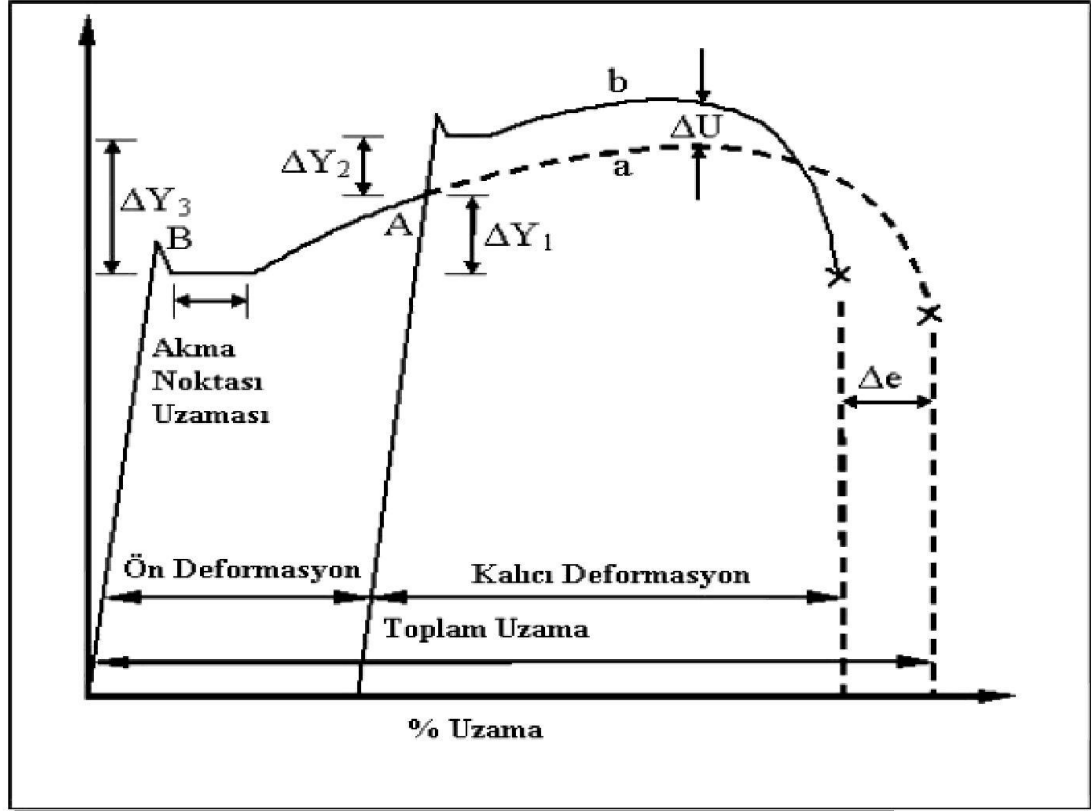
#### **3.5.2.1. Statik Deformasyon Yaşlanması Sertleşmesi**

Statik deformasyon yaşlanma sertleşmesi, plastik deformasyondan sonra meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Statik deformasyon yaşlanma sertleşmesinin etkisi, akma gerilmesinde bir artış ve uzamada bir düşüş olarak görülmektedir. Bu etkilere, hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen demirli metallere karbon ve azot ara yer atomları, demir dışı metallere ise ikinci faz partiküllerinin neden olduğu kabul edilmektedir.

Şekil 3.4’de statik yaşlanma sertleşmesi olayının temel prensibi görülmektedir. Burada; normalize edilmiş yumuşak çeliğin gerilme-uzama diyagramı Şekil 3.6’daki (a) eğrisinde görülmektedir. Eğer numune akma sınırını aşmış belirli bir oranda plastik deformasyona maruz kalırsa ve çekme test cihazı durdurulup ardından fazla bekletilmeden çekme testine devam edilirse gerilme-uzama eğrisi farklı bir akma noktası göstermez ve (a) eğrisini takip eder. Ancak; numune belirli bir oranda plastik deformasyona uğradığında test cihazı durdurulur ve numune oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda (25-400°C) belli bir süre bekletildikten (yaşlanma) sonra çekme işlemine tabi tutulursa; ilk akma noktasına göre daha yüksek bir akma noktası oluştuğu ve gerilme-uzama eğrisinin(b) eğrisini takip ettiği görülür.

Akma noktasındaki bu artış, statik deformasyon yaşlanma sertleşmesinin en önemli kriteri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca statik yaşlanma neticesinde çekme dayanımında bir artış, % uzama değerlerinde ise bir azalma meydana gelebilir, fakat bunlar her zaman olmayabilir. Yaşlanma sertleşmesi olayı çeliklerin sünek/gevrek geçiş sıcaklığını, yüksek sıcaklık dayanımını, elektriksel ve manyetik özelliklerini de etkilemektedir.





$\Delta Y_1$ : Ön deformasyonla oluşturulan gerilimdeki artış  
 $\Delta Y_2$ : Yaşlanma ile oluşturulan gerilimdeki artış  
 $\Delta Y_3$ : Deformasyon ve yaşlanmadan dolayı gerilimdeki artış ( $\Delta Y_1 + \Delta Y_2$ )  
 $\Delta U$ : Deformasyon ve yaşlanmadan dolayı UTS'deki değişim.  
 $\Delta e$ : Deformasyon ve yaşlanmadan dolayı toplam uzamadaki değişim.

Şekil 3.4. Statik yaşlanma sertleşmesinin temel prensibi.

Yaşlanma sertleşmesi karbon (C) ve azot (N) gibi arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellemesiyle metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin değişmesine neden olan bir mekanizma olarak tanımlanabilir. Mg-Al alaşımlarında deformasyon yaşlanması  $Mg_{17}Al_{12}$  gibi ikinci faz partiküllerin çökmesi ile meydana gelir. Bu partiküller alaşımın mekanik özelliklerinin değişmesine neden olur. Deformasyon yaşlanma sertleşmesi statik deformasyon yaşlanması ve dinamik deformasyon yaşlanması olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.

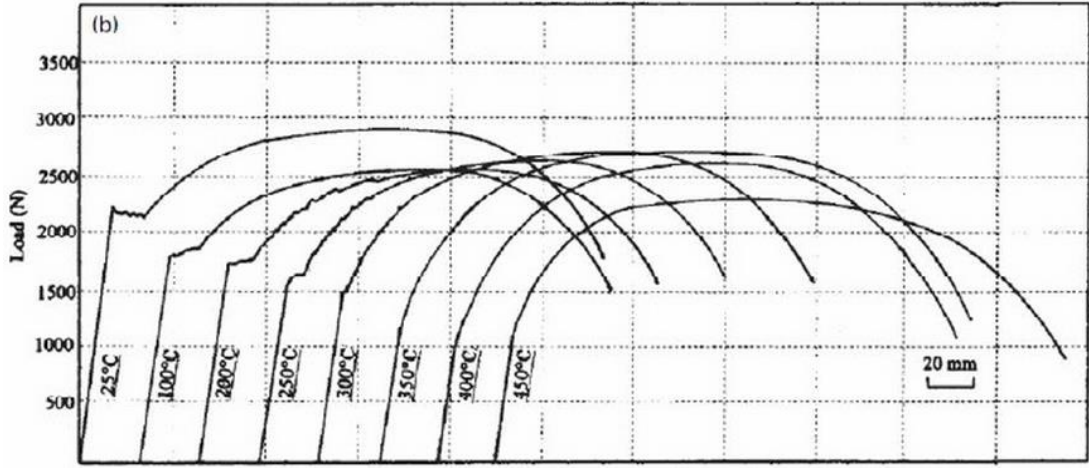
### 3.5.2.2. Dinamik Deformasyon Yaşlanması Sertleşmesi

Dinamik yaşlanma sertleştirilmesi, plastik deformasyon esnasında meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Dinamik yaşlanmanın düşük karbonlu

çeliklerde en çok görüldüğü sıcaklık aralığı 150 °C – 250°C'dir. Bu sıcaklık aralığında meydana gelen dinamik yaşlanma olayı mavi kırılmalık etkisi olarak adlandırılmaktadır. Mavi kırılmalık, C ve N atomlarının yüksek sıcaklıkta dislokasyonların hareketini engellemesinden dolayı oluşmaktadır. C ve N atomu içermeyen çeliklerin çekme dayanımları 25-500°C aralığında yapılan sıcak çekme testlerinden sonra düzgün olarak düşerken; C ve N ilavesi, 100–350°C sıcaklık aralığında yapılan testlerde dayanımda artış sağlamaktadır. Azot düşük sıcaklıklarda (25-200°C) karbona göre daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluşmasına neden olur. Fakat 200°C üzerindeki sıcaklıklarda karbon, çözünürlüğünün artmasından dolayı dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluşmasında başlıca rol oynar.

Yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme testi sonucunda gerilme-uzama diyagramında görülen testere dişi (zig-zag) akma davranış ve çalışma sertleşmesi oranındaki artış dinamik yaşlanma sertleşmesinin nedeni olarak kabul edilmektedir. Ancak bazı durumlarda, testere dişi (zig-zag) davranış görülmezken yaşlanma sertleşmesi oluşabilir. Yapılan çalışmalarda, karbonlu çeliklerde testere dişi davranış olmadan da yaşlanmanın oluşabileceği gösterilmiştir. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında yapılan çekme testleriyle, yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme testleri kıyaslandığında; akma noktasından itibaren maksimum çekme noktası arasındaki bölgede bir dikleşme olması çalışma sertleşmesinin bir göstergesidir. Bu şekilde artan bir çalışma sertleşmesi oranı dinamik yaşlanma sertleşmesinin bir belirtisidir.

Dinamik yaşlanma sertleşmesi, çekme testi sırasında sıcaklığın etkisiyle hareket eden dislokasyonlar ile ara yer atomlarının etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yaşlanma, sadece dislokasyonların serbest hareketi esnasında değil, aynı zamanda bekleme süresi olarak bilinen ve dislokasyonların geçici olarak kayma düzlemindeki bölgesel engellerde tutulduğu süre boyunca da ortaya çıktığı ileri sürülmüştür.



Şekil 3.5. Dinamik yaşlanma sertleşmesi neticesinde vanadium mikro alaşım çeliğinin kuvvet-uzama diyagramında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişim.

### 3.6. YAŞLANDIRMANIN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mg alaşımlarının yaşlandırılmasında mekanik özellikler, Al alaşımlarında olduğundan daha az değişirler. Doğal yaşlandırmanın mekanik özellikleri çok etkilemediği literatür taramalarında tespit edilmiştir. 175-200°C da yaşlandırmaya maruz kalan Mg alaşımlarında ise akma mukavemetin ve sertliğin arttığı görülmüştür.

380-420°C' de solüsyona alınan AZ63 Mg alaşımını beş yıl süreli 22 ilâ 32°C'ta yaşlandırılmasından sonra çekme mukavemetinin yaklaşık % 14, akma mukavemetinin % 68 ve Brinell sertliğinin de % 22 arttığı ve aynı süre içinde sünekliğinin yaklaşık % 32 ve darbe mukavemetinin de % 57 azaldığı tespit edilmiştir.

Şekillendirilmiş AZ31, AZ61 alaşımları deformasyona bağlı olarak iç yapısında gerilmeler oluşabilir. Bu durum alaşımlarda gerilme korozyonu çatlmasına neden olabilir. Bunu önlemek için alaşımların gerilim giderme ısı işlemine tabi tutulmaları gerekir. Bu amaçla 1 saatlik 150°C' de yapılan ısı işlem yeterli olur [45].

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yaşlanmanın mekanik özelliklere etkisini araştırmak için AZ31 Magnezyum alaşımına uygulanan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Bölüm 4.1’ de deneysel malzemenin özellikleri belirtilmiştir. Bölüm 4.2’ de çekme deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanması anlatılmıştır. Bölüm 4.3’ de solüsyona alma ve ön deformasyon işlemi, bölüm 4.4’ de ise yaşlanma ısıl işleminin nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Bölüm 4.5’ de çekme deneyi testleri ve bölüm 4.6’ da mikroyapı çalışmaları anlatılmıştır.

#### 4.1. DENEYSEL MALZEME

Deneysel çalışmalarda, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan AZ31 Magnezyum sac malzeme kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

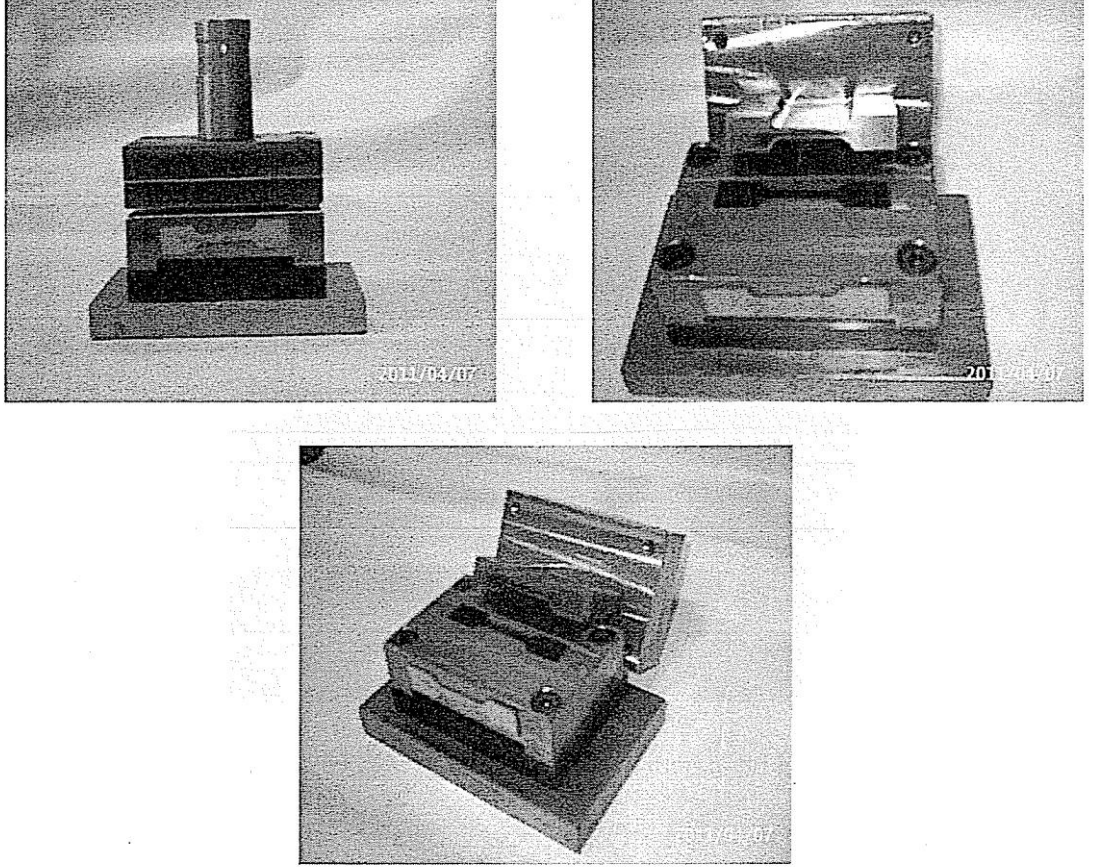
Çizelge 4.1. AZ31 Magnezyum malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Be	Cu	Mg
3.19	0.81	0.334	≤0.005	0.02	0.01	0.005	Bal.

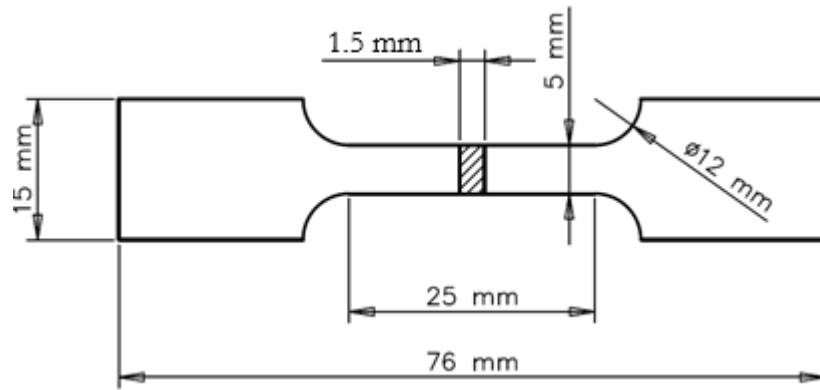
#### 4.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Çözüm Metal İmalat Sanayi firmasından 200x200x1,5 mm boyutlarında temin edilen AZ31 magnezyum sac malzeme, çekme deney numunesi hazırlamak için 78 mm genişliğinde dilimlere ayrılmıştır. Kesilmiş olan numuneler daha sonra ASTM standartlarına göre Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim ABD atölyesinde bulunan kesme kalıbı kullanılarak çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 4.1 çekme deney numunesinin elde edildiği kesme kalıbını

gösterirken Şekil 4.2’ de çekme deney numunesinin boyutlarını vermektedir. 42 adet deformasyonsuz durumda, 42 adet ise ön deformasyon yapılacak durumda olmak üzere toplamda 84 adet çekme deney numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Çekme deney numunesinin elde edildiği kesme kalıbı.



Şekil 4.2. Çekme deney numunesinin boyutları.

### 4.3. SOLÜSYONA ALMA VE ÖNDEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI

Çekme test numuneleri, 400 °C’ de PROTHERM marka ve PLF 120/27 model fırında 3 saat bekletilerek solüsyona alma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler 3 saatin sonunda fırından alınarak bekletilmeden suda soğutulmuştur. Solüsyona alma ısıl işleminde kullanılan fırına ait görüntü Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. PROTHERM marka ve PLF 120/27 model ısıl işlem fırını.

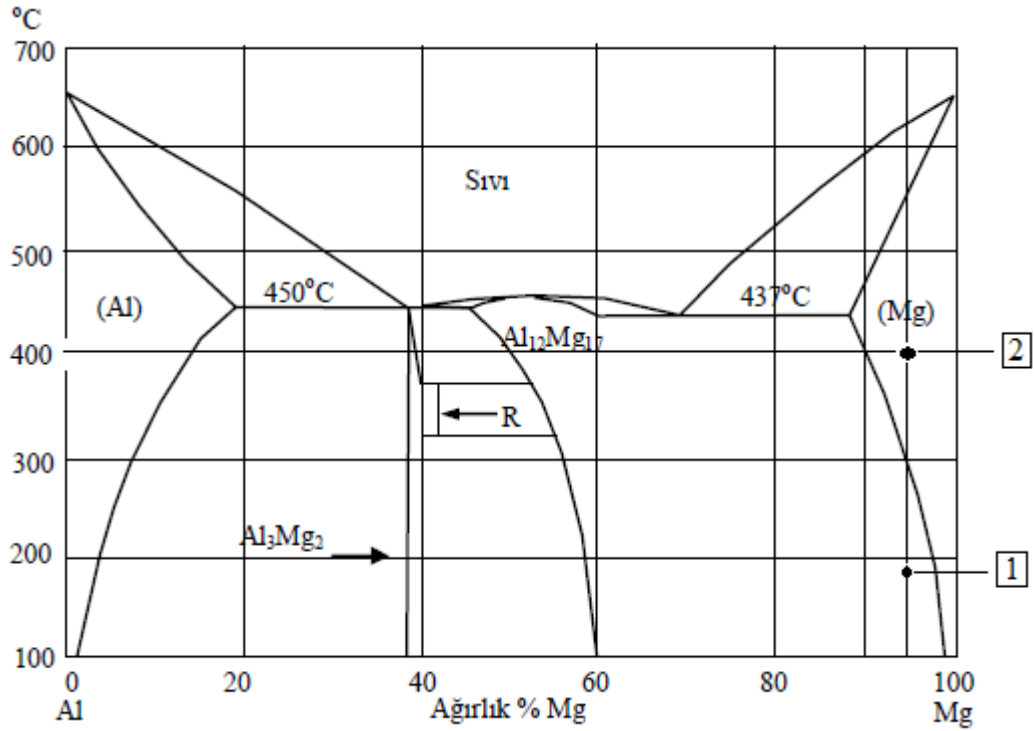
Solüsyona alma ısıl işleminden sonra 180 °C’ de farklı sürelerde yaşlandırılacak olan numunelerin 42 tanesi SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazında, 1 mm/dak çekme hızında, boyuna % 0,5 ön deformasyon işlemi uygulanmıştır. Geri kalan 42 adet numune herhangi bir ön deformasyon uygulanmadan solüsyona alınmış durumda bırakılmıştır. Ön deformasyon işleminde kullanılan çekme cihazı Şekil 4.4’ te görülmektedir.



Şekil 4.4. SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazı.

#### 4.4. YAŞLANMA ISIL İŞLEMİNİN UYGULANMASI

Solüsyona alınan ve solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deformasyon uygulanan numuneler, 180°C' de 10-360 dakika aralığında ısıl işlem fırınında bekletilerek yaşlanma işlemine tabi tutulmuşlardır. Fırından çıkarılan numuneler hava akımı olmayan bir ortamda oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Her bir şart için 3 adet numune yaşlandırılmıştır. Şekil 4.5. solüsyona alma ve yaşlanma ısıl işlemlerinin yapıldığı sıcaklığı Mg-Al faz faz diyagramı üzerinde göstermektedir.



Şekil 4.5. Mg-Al faz faz diyagramı üzerinde solüsyona alma ve yaşlanma ısıl işlem sıcaklıkları: 1) Yaşlanma ısıl işlemi, 2) Solüsyona alma ısıl işlemi sıcaklığı.

#### 4.5. ÇEKME TESTİNİN UYGULANMASI

Ana malzeme, solüsyona alınan numuneler, solüsyona alındıktan sonra farklı sürelerde yaşlandırılan numuneler ve solüsyona alınıp % 0,5 ön deformasyon uygulandıktan sonra farklı sürelerde yaşlandırılan numuneler SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazında 1 mm/dak çekme hızında çekilerek koparılmışlardır. Deney sonrası numunelerin, gerilme-uzama diyagramları, çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerleri bilgisayar kontrollü TRAPEZIUM programından otomatik olarak elde edilmiştir. Şekil 4.4' de SHIMADZU AG-IS marka çekme test cihazı görülmektedir.

#### 4.6. SERTLİK TESTİNİN UYGULANMASI

Ana malzeme, solüsyona alınan, solüsyona alındıktan sonra yaşlandırılan ve solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından yaşlandırılan numunelere sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, çekme işlemi yapılan



numunelerin orta kısımlarından alınarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri SHİMADZU marka ML7100 model vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde elmas piramit uca 0,5 kg yük uygulanmıştır. Deney işlemi sırasında malzemenin sertliğini belirlemek için numune üzerinde 5 ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır.

#### **4.7. OPTİK VE TARAMA ELEKTRON MİKROSKOP İNCELEMELERİ**

Mikroyapı incelemeleri, şekil 4.5' de verilen X50-X1000 büyütme kapasitesine sahip Epiphot 200 Nikon marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Her numunenin değişik bölgelerinden farklı büyüklüklerde görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikroyapıyı temsil edebilir nitelikte olmasına ayrıca dikkat edilmiştir.

Çekme numunelerin kırık yüzeylerinin incelenmesi TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Malzeme Enstitüsü laboratuvarında bulunan JEOL-100C marka Tarama Elektron Mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 180°C' de deformasyonsuz ve % 0,5 ön deformasyon uygulanarak yaşlandırıldıktan sonra çekme deneyi sonucunda kopan uçlarının kırık yüzey görüntüleri alınarak yaşlandırma sıcaklığının, zaman aralığının ve ön deformasyonun AZ31 Mg alaşımlarında kırılma davranışlarını nasıl etkilediği yapılan çalışmalarda görülmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.5. X50-X1000 büyütme kapasitesine sahip Epiphot 200 Nikon marka optik mikroskop.

#### **4.7.1. Metalografik İncelemelerde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması**

Metalografik incelemeler için 5x5x1,5 mm ölçülerinde numuneler kesilmiştir. Daha sonra bu parçalar bakalite gömülerek sırasıyla 320, 600, 800, 1200 meshlik su zımparalarıyla yüzeydeki pürüzler yok edilinceye kadar saf su ile beraber zımparalanmıştır. Bu yüzeyler daha sonra alümina kullanılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir.

#### **4.7.2. Dağlayıcıların Hazırlanması ve Dağlama İşleminin Yapılması**

Metalografik incelemeler için parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numunelerin dağlama işlemi için, 5 ml asetik asit, 6 gr pikrik asit, 100 ml su ve 100 ml ethanolden olmak üzere dağlayıcı solüsyonu hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanan solüsyon içerisine daldırılarak 10-15 sn. bekletilerek dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir.

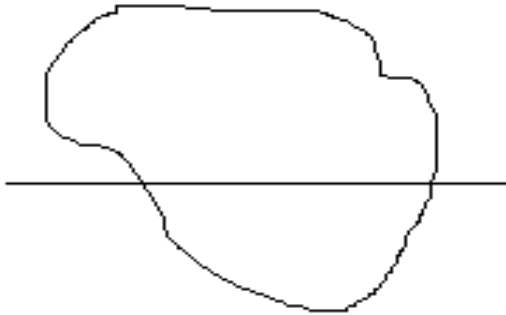
### 4.7.3. Tane Boyutunun Ortalama Doğrusal Kesme Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

Tane boyutu, ölçüm çizgisinin haddeme yönüne  $45^\circ$  açı oluşturacak şekilde belirlenmesini içeren ortalama doğrusal kesme metodu kullanılarak ölçülmüştür. Bu metoda, ölçüm çizgisinin kesmiş olduğu tane sınırları sayılmıştır. Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu, bulunan tane sınırı sayısına bölünerek ortalama tane boyutu bulunmuştur. Ölçüm işlemi için en az 500 tane sınırı sayılmıştır. Sayım işlemi yapılırken aşağıda belirtilen önemli noktalar göz önünde bulundurulmuştur [64].

Eğer ölçüm çizgisi tane sınırını teğet kesiyorsa; 0,5 sayılır.



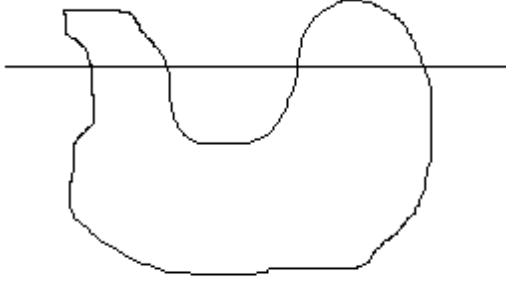
Eğer ölçüm çizgisi tane sınırını tam olarak kesiyorsa; 1 sayılır.



Eğer ölçüm çizgisi 3 taneyi birleşim yerinden kesiyorsa; 1,5 sayılır.



Eğer ölçüm çizgisi aynı taneyi farklı yerlerinden 4 defa kesiyorsa; 2 sayılır.



## BÖLÜM 5

### BULGULAR VE TARTIŞMA

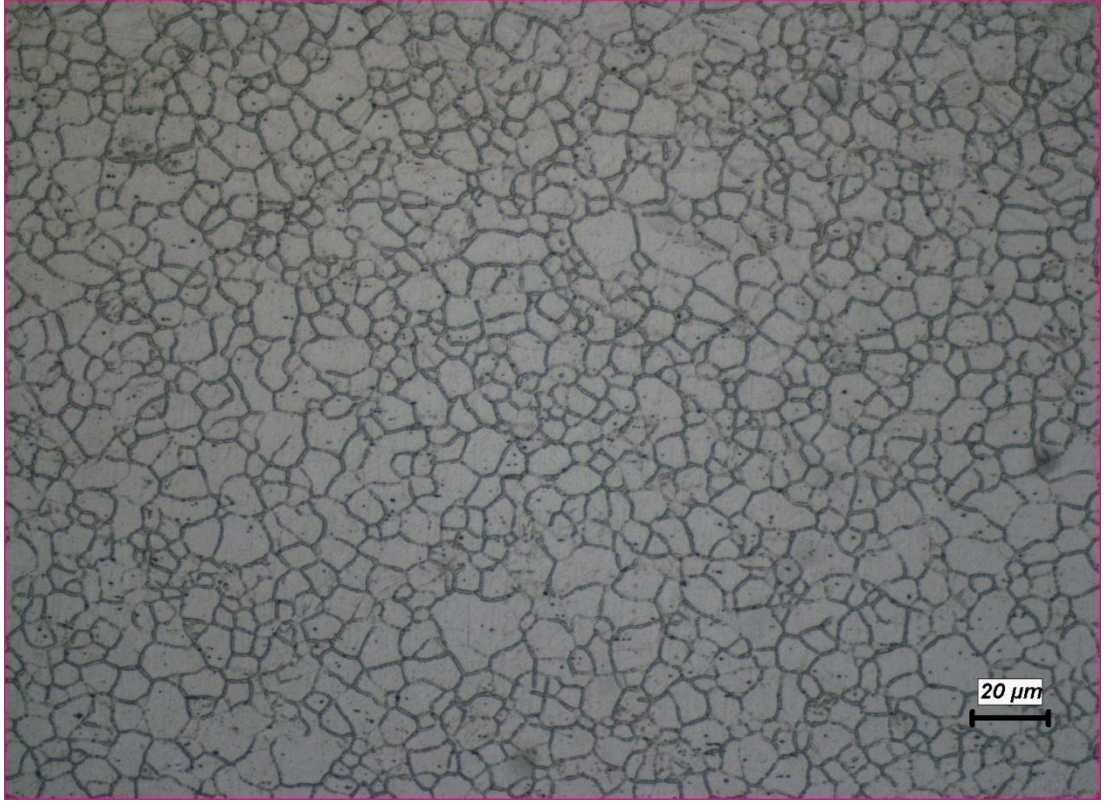
#### 5.1. GİRİŞ

Bu bölüm AZ31 Magnezyum alaşımının deneysel sonuçları ve bu sonuçların tartışılmasını içermektedir. Bölüm 5.2, ana malzeme, solüsyona alınan, ön deformasyonlu ve deformasyonsuz malzemelerin mikroyapı sonuçlarını ve bu sonuçların değerlendirilmesini içermektedir. Bölüm 5.3’ de numunelerin çekme deney sonuçları ve bu sonuçların tartışılması verilmektedir. Bölüm 5.4 ise çekme deney sonucunda kopan numunelerin kırık yüzey resimlerini ve bu resimlerin değerlendirilmesini içermektedir.

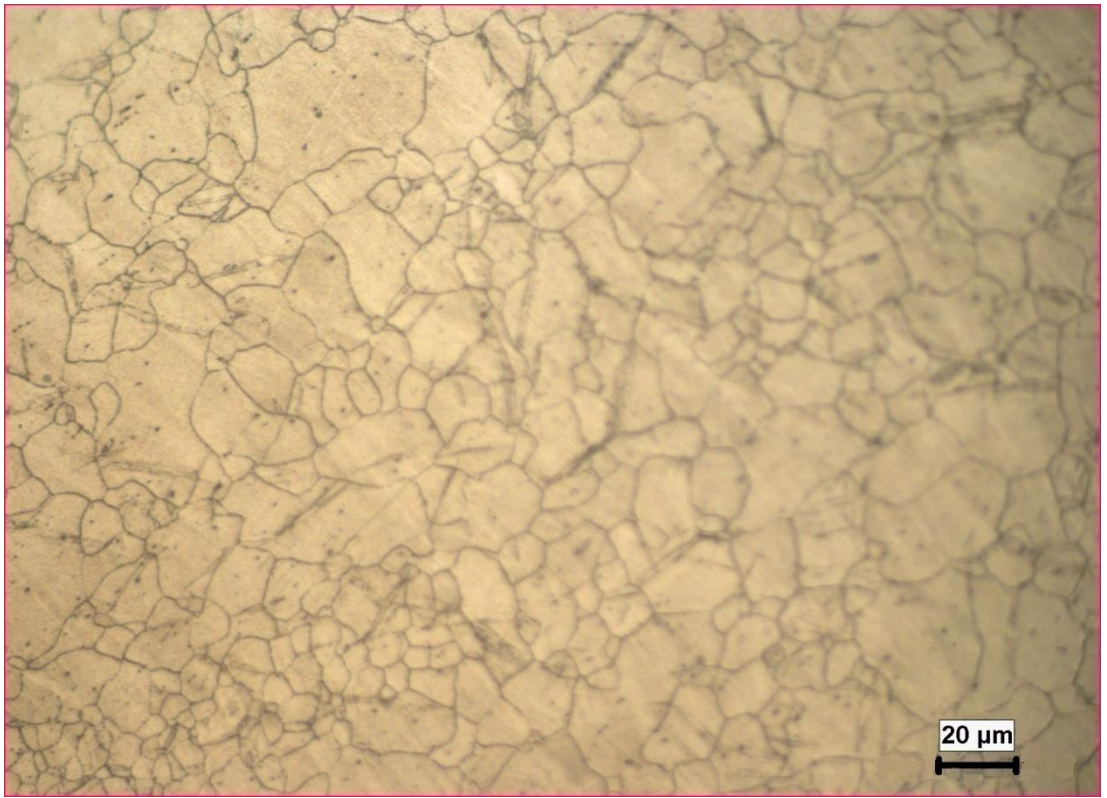
#### 5.2. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

##### 5.2.1. Ana Malzeme ve Solüsyona Alınan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları ve Değerlendirilmesi

AZ31 Magnezyum alaşımının ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.1-5.2’ de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin taneleri farklı boyutlarda eş eksenli tanelerden meydana gelmiştir. Fakat solüsyona alınan numunenin doğrusal kesişme yöntemi ile hesaplanan tane boyutu (12  $\mu\text{m}$ ), ana malzemenin tane boyutundan (6  $\mu\text{m}$ ) büyük olduğu görülmüştür. Çünkü solüsyona alınan numunenin tane boyutu 400 °C’de 3 saat süreyle yapılan solüsyona alma ısı tavlama işlemi neticesinde büyümüştür. Tavlama sıcaklığında veya yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda uzun süre tutulan malzemelerin taneleri yayılma ile zamanla büyürler. Tanelerin büyümesi tavlama sıcaklığı ve süresine bağlıdır [46].



Şekil 5.1. Ana malzemenin optik mikroskop görüntüsü.



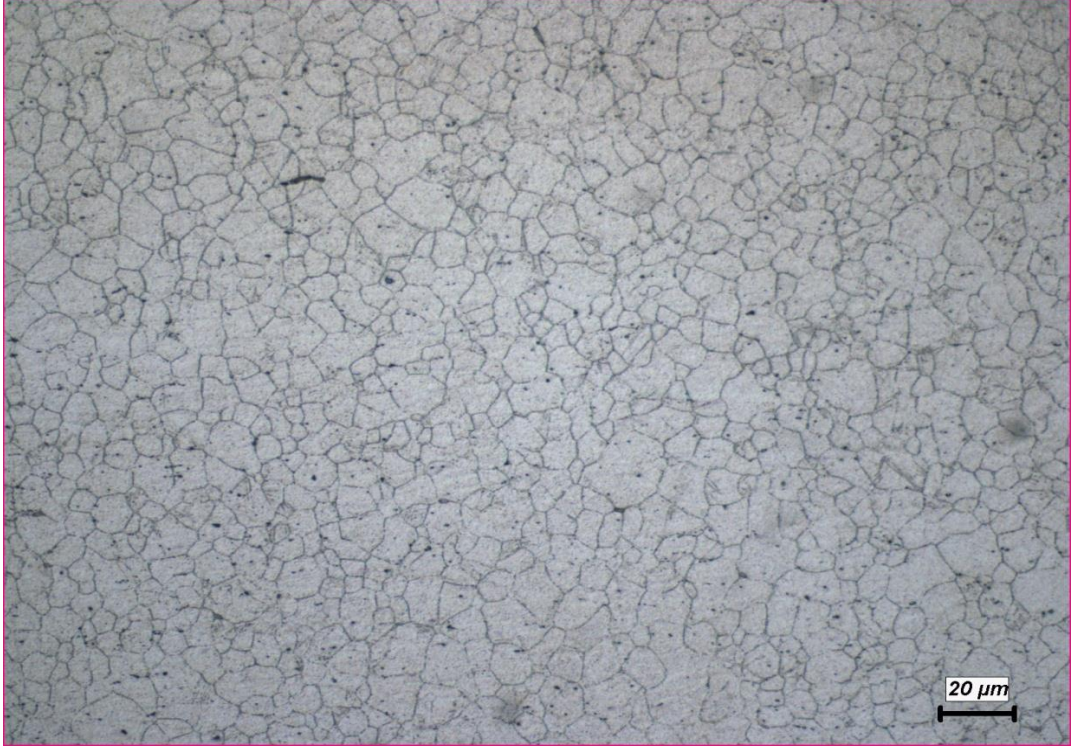
Şekil 5.2. Solüsyona alınan numunenin optik mikroskop görüntüsü.

### 5.2.2. Solüsyona Alınan Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

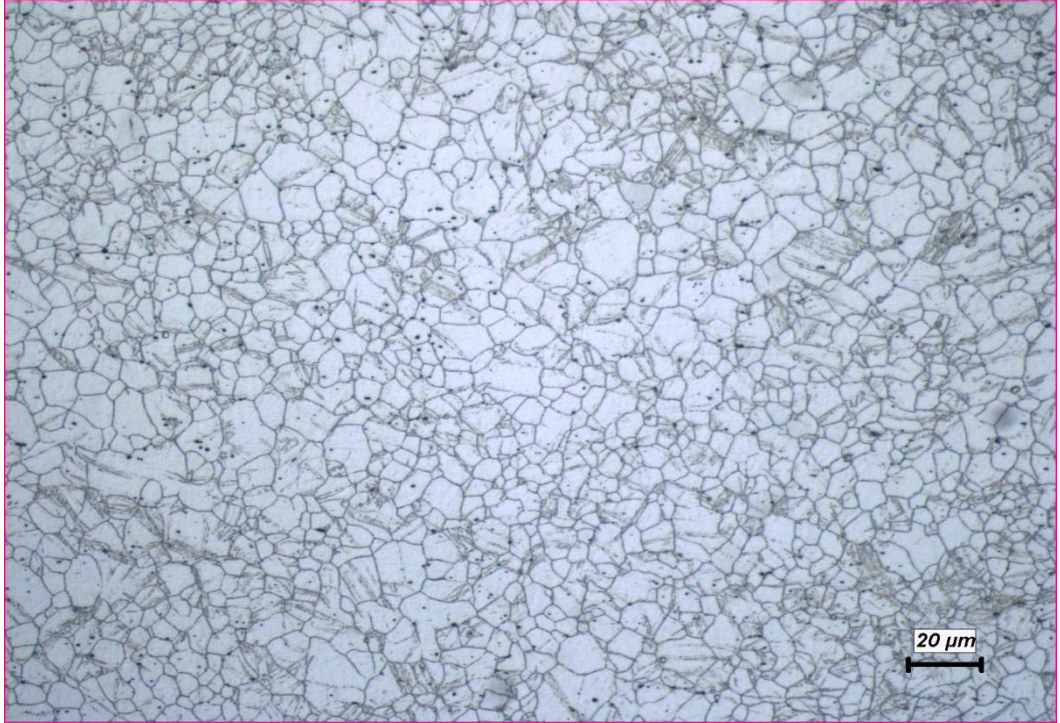
Solüsyona alındıktan sonra 180 °C’de yaşlandırılan numunelerin optik mikroskop sonuçları Şekil 5.3-5.7 de verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri sonucunda numunelerin ortalama tane boyutlarında yaşlandırma zamanına bağlı olarak değişimler görülmüştür. Örneğin 30-45 dakikalarda ortalama tane boyutları (8 µm) aynı iken, yaşlandırma süresinin 1,5 saate çıkması ile tane boyutunda (6 µm) düşüş olduğu görülmektedir. Daha sonra yaşlandırma zamanının 4 saate çıkması ile tane boyutunun 8 µm ye çıktığı ve zamanın artmasıyla tane boyutunun arttığı, 6 saatte 9 µm olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yaşlandırma işlemi sonucunda numunelerin ortalama tane boyutları solüsyona alınan numuneye göre düşük olduğu görülmüştür. Yaşlanma süresinin artmasına bağlı olarak tane boyutunun artması, AZ31 Mg alaşımında oluşan Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltilerinin kabalaşmasının bir sonucudur. Kaba çökeltiler tane büyümesini engelleyemez ve malzemenin kaba taneli olmasına neden olur [61].



Şekil 5.3. 180 °C’de 30 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 5.4. 180°C’de 45 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 5.5. 180°C’de 1,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.





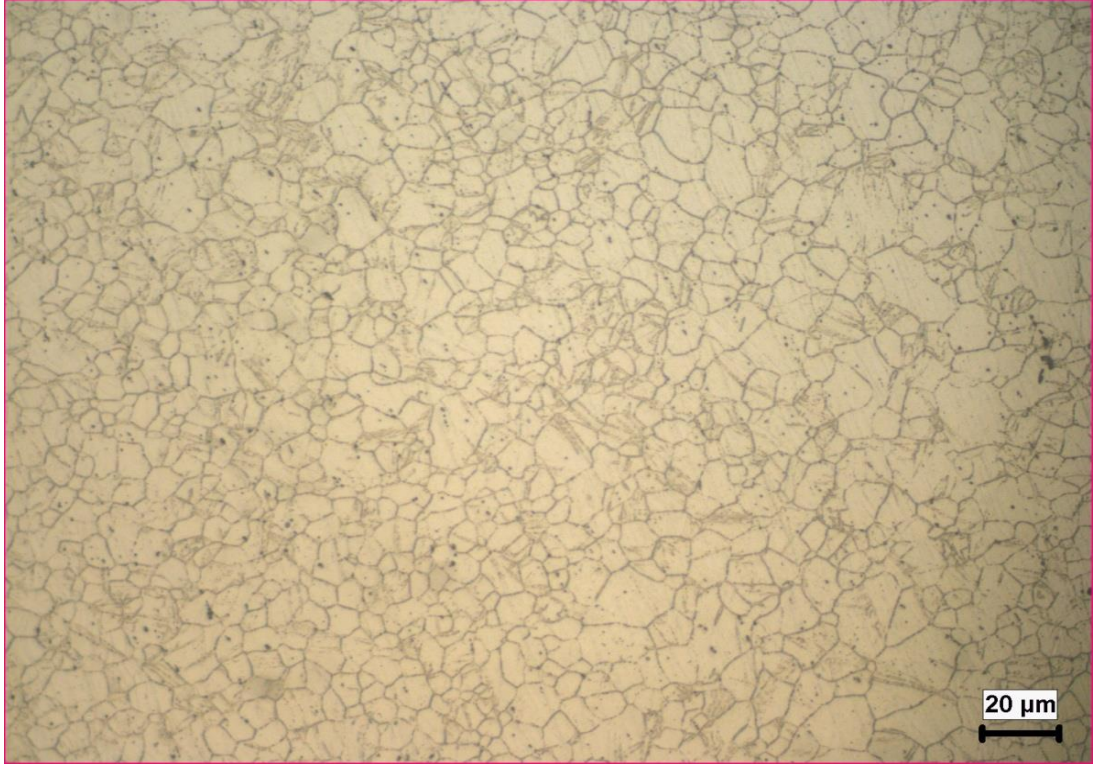
Şekil 5.6. 180 °C’de 4 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



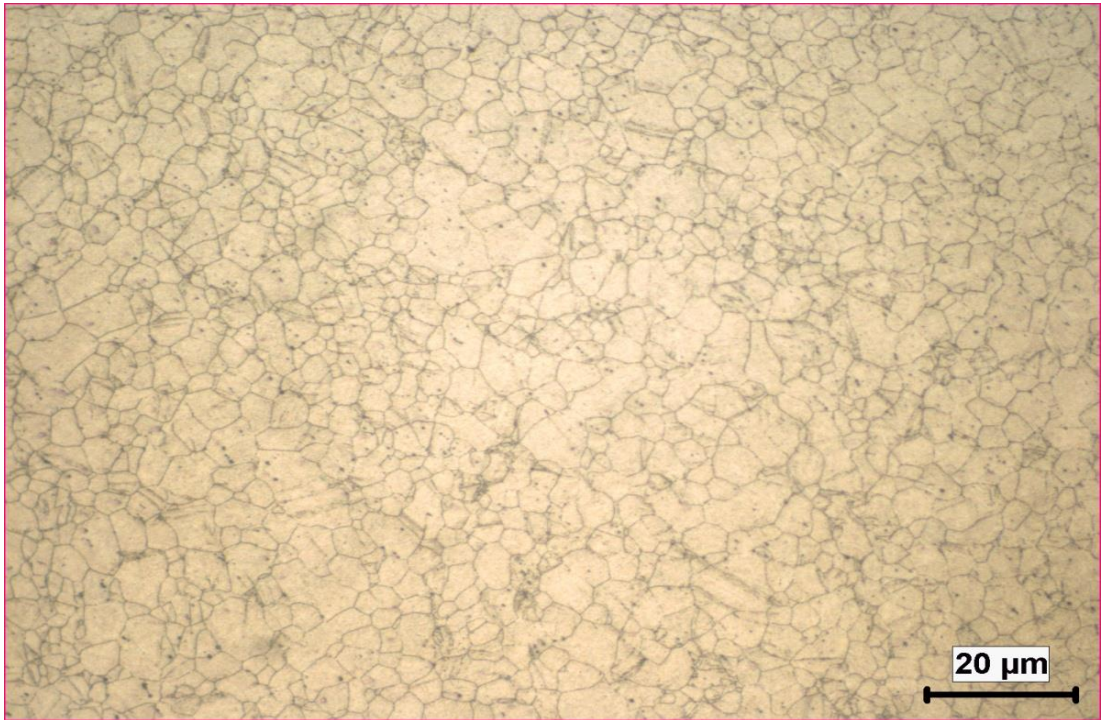
Şekil 5.7. 180 °C’de 5,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.

### **5.2.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Mikroyapı Sonuçları Ve Değerlendirilmesi**

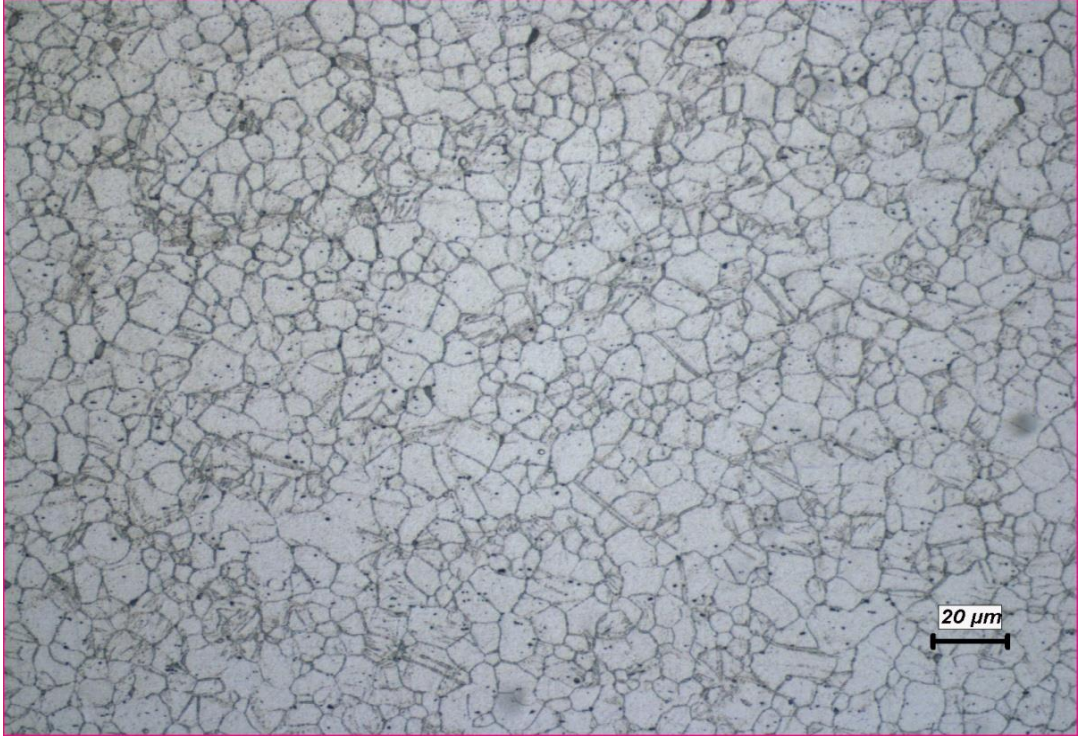
Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 180 °C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.8-5.13’de verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri sonucunda numunelerin ortalama tane boyutlarında yaşlanma süresine bağlı olarak değişimler gözlenmiştir. Örneğin 10-30 dakikalarda yapılan yaşlandırmada ortalama tane boyutları (5 µm) aynı iken, yaşlandırma süresinin 1 saate çıkması ile tane boyutunda (7 µm) artış olduğu görülmektedir. Daha sonra yaşlandırma zamanının 1,5- 3 saat olduğu aralıkta tane boyutunun 6 µm ye düştüğü ve bu saatten sonraki zamanlarda tane boyutunun arttığı, 6 saatte 8 µm olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yaşlandırma işlemi sonucunda numunelerin ortalama tane boyutları ön deforme edilmeyen numunelere göre düşük olduğu görülmüştür. Buna neden olarak ön deforme işlemi sonucunda meydana gelen Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltilerin ön deforme edilmeyen numunelere göre daha fazla olmaları söylenilebilir. Deformasyon oranının artması dislokasyonların çoğalmasına neden olmaktadır. Oluşan dislokasyonlar ise çökeltilerin çekirdekleşmesini hızlandırarak sayılarını arttırmaktadır [52].



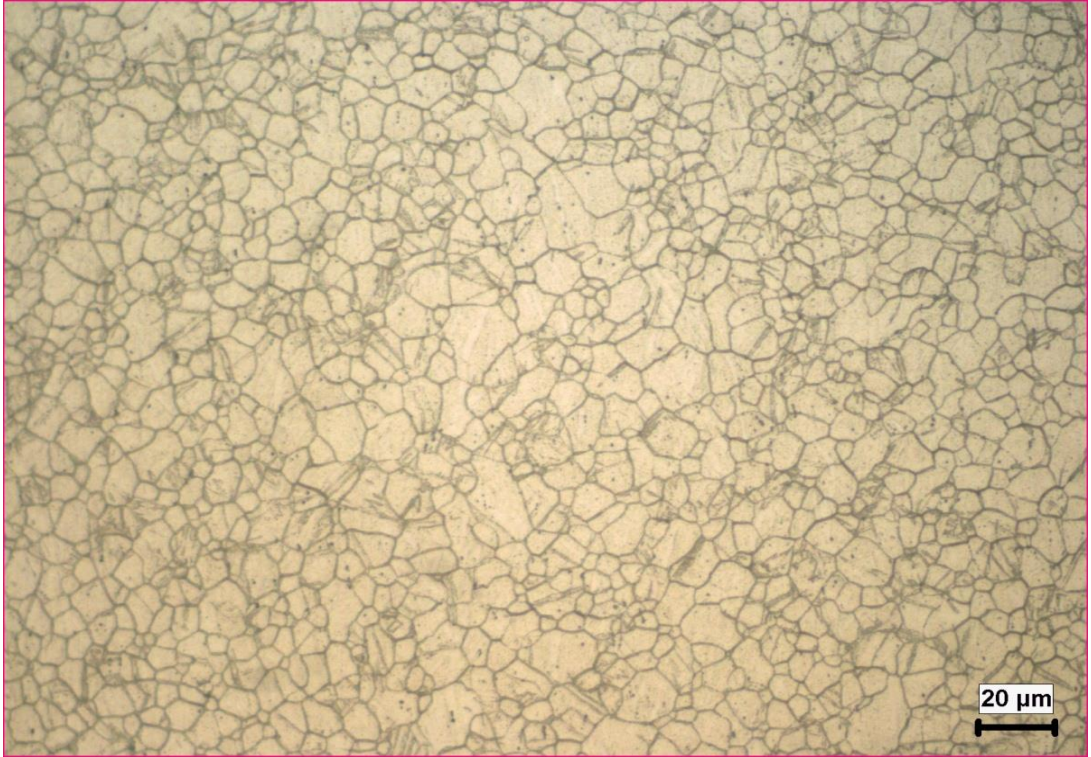
Şekil 5.8. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 30 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



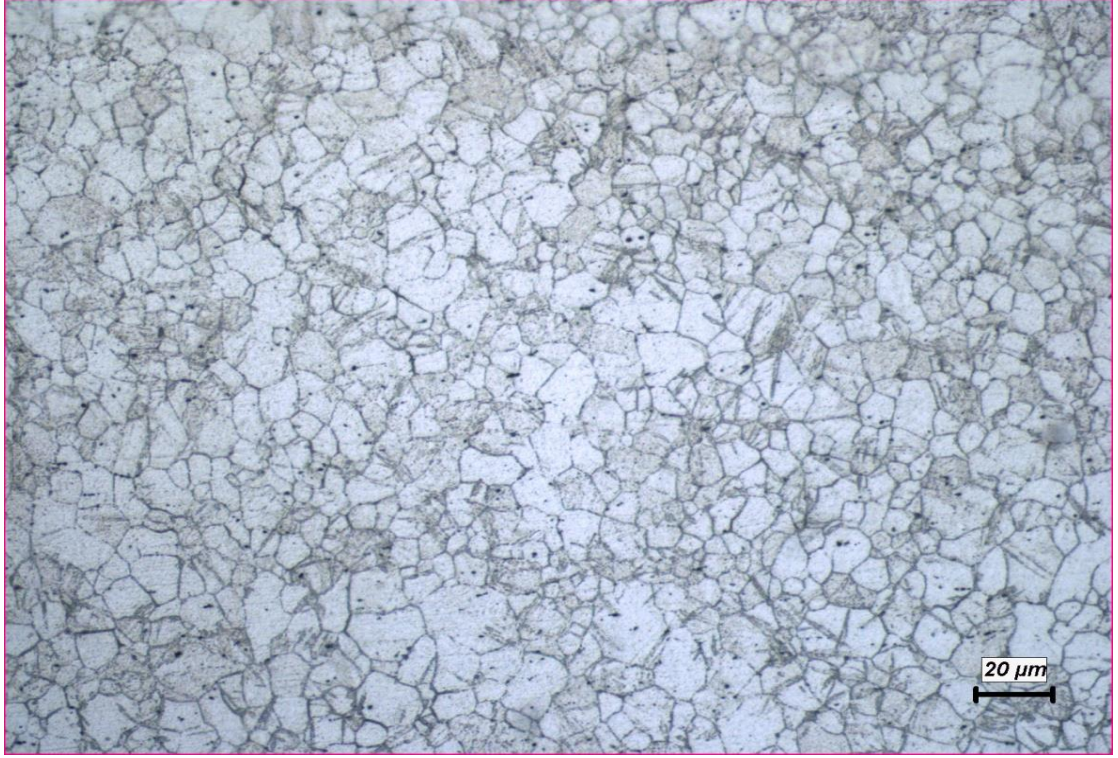
Şekil 5.9. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 45 dakika yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



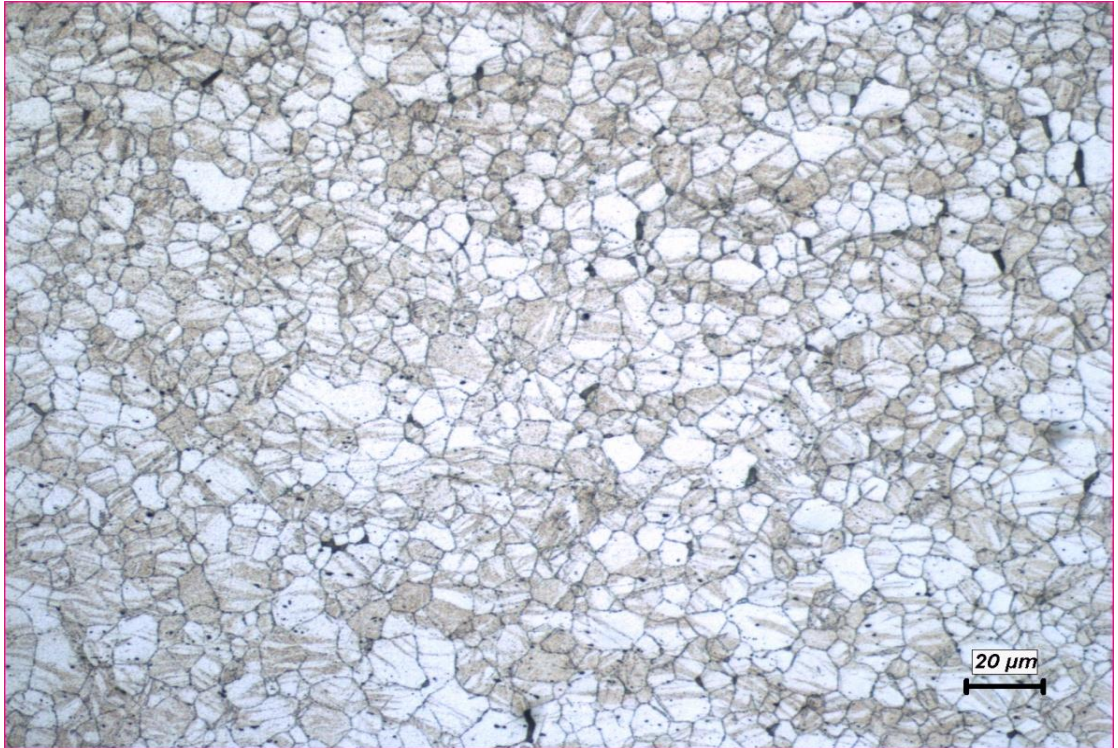
Şekil 5.10. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 1 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 5.11. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 1,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.

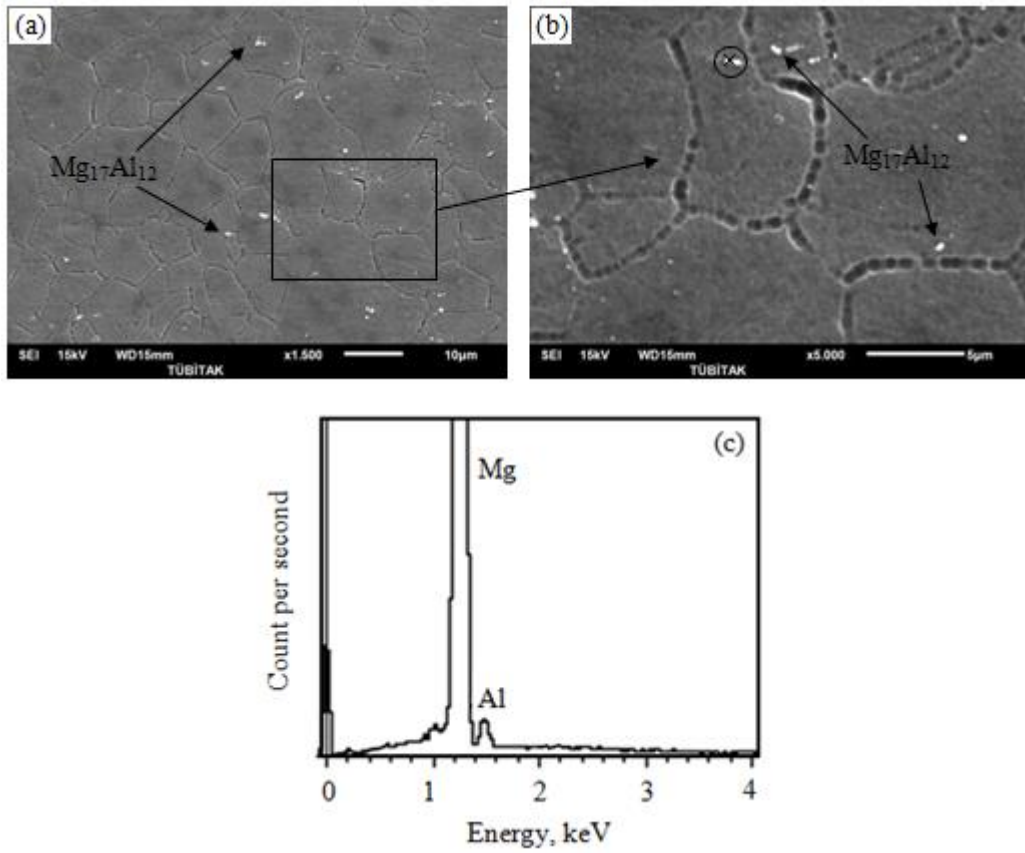


Şekil 5.12. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 4 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 5.13. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 5,5 saat yaşlandırılan numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.14 % 0,5 ön deforme edildikten sonra 180 °C’ de 5,5 saat yaşlandırılan numuneden alınmış SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucunu göstermektedir. EDS analiz sonucu çökeltilerin Al ve Mg elementlerini içerdiği ve bu çökeltilerin  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı olduğunu ispatlamaktadır. AZ31 Mg alaşımının tane boyutunu etkilediği düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Marya ve arkadaşları [42] ve Liu ve arkadaşlarının AZ63 Mg alaşımları üzerine yapmış oldukları çalışmalarda da görülmektedir.



Şekil 5.14 Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C’ de 5,5 saat yaşlandırılan numunelerin SEM görüntüleri a) düşük büyütme, b) yüksek büyütme ve c) işaretlenen çökeltiden alınan EDS analiz sonucu.

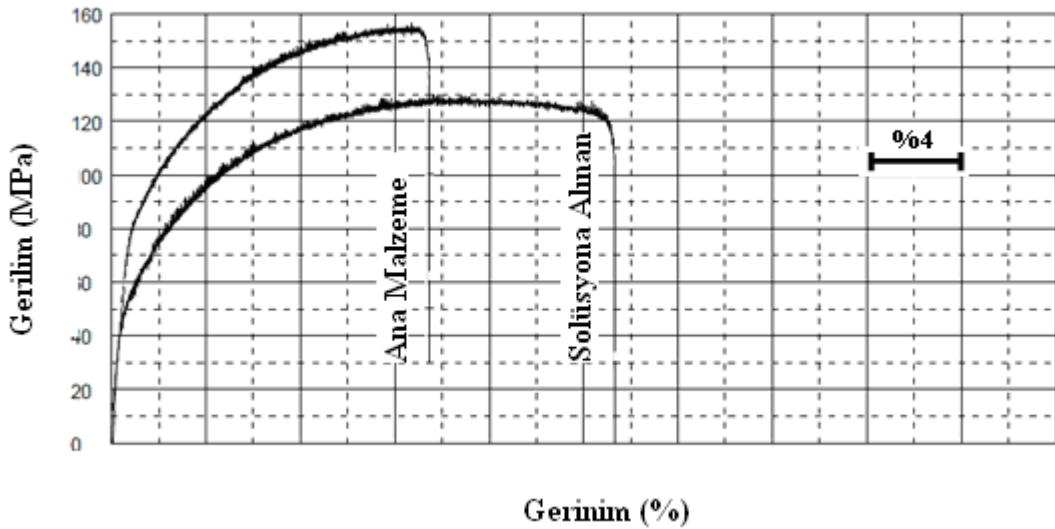
### 5.3. ÇEKME DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.3.1. Ana Malzeme Ve Solüsyona Alınan Numunelerin Çekme Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

Ana malzeme ve 400 °C’de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan numunelerin % 2 akma noktasındaki dayanımları, çekme dayanımları, ortalama tane boyutları ve % toplam uzama değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.15 ise ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin gerilim- % uzama diyagramlarını göstermektedir.

Çizelge 5.1. Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin çekme test sonuçları.

Numune	Akma dayanımı 2 % (MPa)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Toplam uzama (%)	Ortalama tane boyutu (µm)
Ana malzeme	83	157	13	6
Solüsyona alınan	77	130	14	12



Şekil 5.15. Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı.

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.15'den görüldüğü gibi ana malzemenin % 2 akma dayanımı 83 MPa, çekme dayanımı 157 MPa, toplam uzama % 13 ve ortalama tane boyutu 6  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. 400 °C'de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan numunenin % 2 akma dayanımı 77 MPa'a, çekme dayanımı 130 MPa'a düşerken, toplam uzama % 14 ve ortalama tane boyutu 12  $\mu\text{m}$ 'ye çıkmıştır. Bu durum solüsyona alınan numunenin, ana malzemeye göre akma ve çekme dayanımlarının düştüğü, fakat % uzama ve ortalama tane boyutu değerinin ise arttığını açıkça göstermektedir. Çünkü Magnezyum alaşımına dayanım kazandıran çökelti solvüs eğrisinin üzerindeki bir sıcaklık olan 400 °C'de 3 saat bekletme süresince çözülerek çözeltiliyi oluşturan atomlar katı eriyik içerisinde serbest halde kalmışlardır. Daha sonra bu katı eriyik suda hızlı soğutulmuş, oda sıcaklığında  $\beta$  fazını oluşturan atomlarca zengin  $\alpha$  katı eriyiği haline dönüşmüştür. Hızlı soğumaya bağlı olarak  $\beta$  atomları difüzyon yoluyla çökelti oluşturmaya yeterli zaman bulamadıklarından dolayı yapıda bir dayanım düşüklüğü yaşanmıştır. Bu sırada aşırı doymuş katı eriyik içerisinde boşluk kümelerinin oluştuğu rapor edilmiştir [54, 55]. Bu boşluk kümelerinin solüsyona alma ısıl işleminden sonra oda sıcaklığında soğutulurken veya hemen sonrasında oluştuğu bilinmektedir [56]

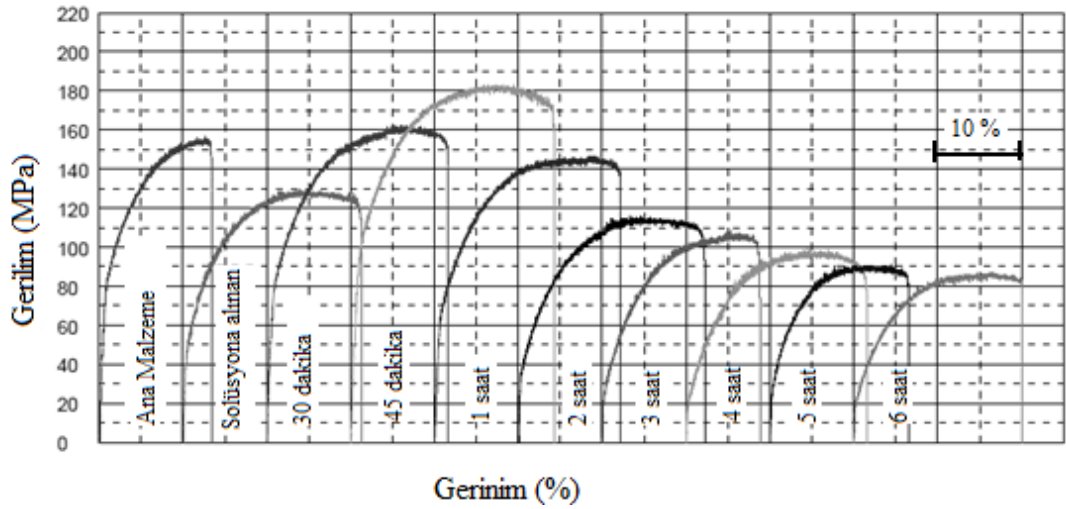
### **5.3.2. Solüsyona Alınan Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Çekme Sonuçları Ve Değerlendirilmesi**

400 °C'de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 180 °C'de 30-360 dakika aralığında yaşlandırılan numunelerin % 2 akma dayanımları, çekme dayanımları, % toplam uzama ve ortalama tane boyutları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.16 solüsyona alındıktan sonra 180 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin gerilim-% uzama diyagramlarını göstermektedir.



Çizelge 5.2. Solüsyona alınan ve ardından 180 °C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme test sonuçları.

180°C’de Yaşlanma zamanı (min.)	Akma dayanımı 2 % (MPa)	Maksimum çekme dayanımı	Toplam uzama (%)	Ortalama tane boyutu (µm)
10 min	80	130	14	8
30 min	108	163	15	8
45 min	126	183	18	8
1 h	91	147	18	7
1.5 h	65	121	14	6
2 h	63	116	15	7
2.5 h	61	114	15	7
3 h	55	108	15	8
3.5 h	54	109	14	7
4 h	48	99	15	8
4.5 h	46	96	16	8
5 h	57	91	14	8
5.5 h	44	88	15	9
6 h	44	87	16	9



Şekil 5.16. Solüsyona alınan ve ardından 180 °C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı.

Solüsyona alındıktan sonra yaşlandırılan numunelerin % 2 akma dayanımı ve çekme dayanımı 180 °C’ de artan yaşlanma zamanına bağlı olarak bir artış göstermektedir. Solüsyona alındıktan sonra yaşlandırılan numunenin en yüksek % 2 akma dayanımı ve çekme dayanımı 180 °C’ de 45 dakika yaşlandırıldıktan sonra elde edilmiştir. Yaşlanma zamanı artarak 6 saate çıkması ile numunenin % 2 akma dayanımı ve

çekme dayanımı düşmüştür. Solüsyona alındıktan sonra yaşlandırılan numunenin % toplam uzama değeri 180 °C' de 45 dakika veya 1 saat yapılan yaşlandırmaya kadar bir artış gösterirken yaşlanma zamanının artması ile az miktarda düşüş göstermiştir. Ming-Hong ve arkadaşları Mg alaşımlarının yaşlanma özelliklerini inceledikleri çalışmada 170 °C' de 6 saat yaşlandırılan numunelerin sertlik, çekme dayanımı ve uzama değerlerinin arttığını göstermişlerdir [57]. Dayanım ve uzama değerlerinin 180 °C' de 45 dakika ve 1 saat yapılan yaşlanmaya kadar artması Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltilerinin dislokasyonların hareketini engellemesinden kaynaklanmaktadır.

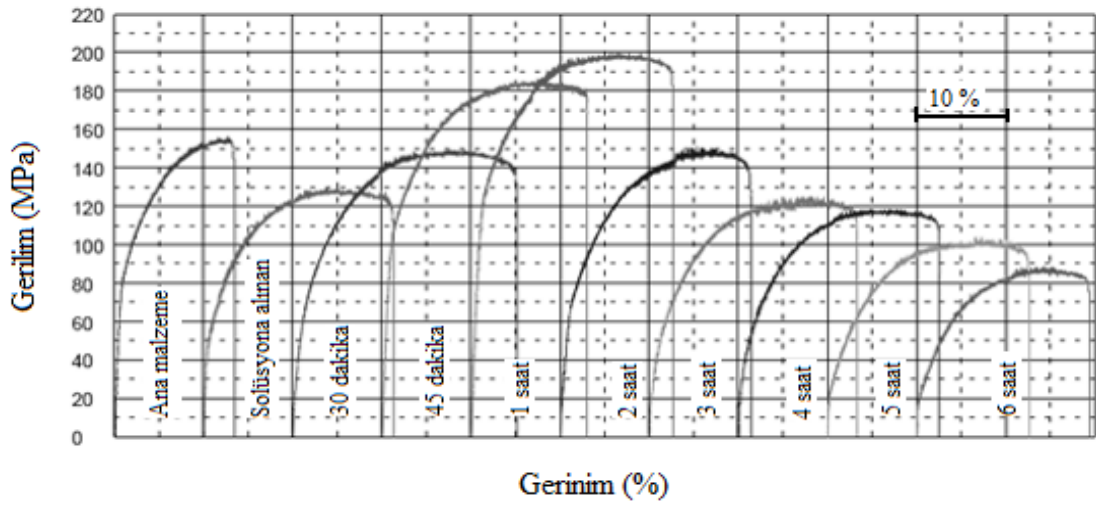
400 °C' de 3 saat solüsyona alındıktan sonra yapılan suda soğutma işlemi sonrasında Mg ve Al atomları katı eriyik içerisinde serbest halde kalmışlardır. Yaşlanma sırasında Mg ve Al atomları birleşerek Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltilerini meydana getirmektedir. Bu çökeltiler AZ31 Mg alaşımının dayanımını artırmışlardır [58]. Yapılan diğer bir çalışmada AZ80 Mg alaşımı 400 °C' de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulmuş ve ardından 170 °C' de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılmıştır. Yapılan bu işlem sonucunda AZ80 Mg alaşımının sertlik ve çekme dayanımının arttığı görülmüştür [57].

### **5.3.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Çekme Sonuçları Ve Değerlendirilmesi**

400 °C' de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulup % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C' de 10-360 dakika aralığında yaşlandırılan numunelerin % 2 akma dayanımları, çekme dayanımları, toplam % uzama ve ortalama tane boyutları Çizelge 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.17 solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilip ardından 180 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin gerilim- % uzama diyagramlarını göstermektedir.

Çizelge 5.3. Solüsyona alınıp % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme test sonuçları.

180°C'de yaşlanma zamanı (min.)	Akma dayanımı 2 % (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Toplam uzama (%)	Ortalama tane boyutu (µm)
10 min	102	154	17	5
30 min	97	150	17	5
45 min	131	185	18	6
1 h	150	200	17	7
1.5 h	113	170	16	6
2 h	95	151	15	6
2.5 h	73	128	17	6
3 h	68	125	18	6
3.5 h	77	128	16	7
4 h	66	118	16	7
4.5 h	60	113	18	8
5 h	52	104	17	8
5.5 h	48	96	16	8
6 h	44	89	15	8



Şekil 5.17. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C' de yaşlandırılan numunelerin gerilim- % uzama diyagramı.

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.17' den görüldüğü gibi solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numuneler ön deforme edilmeyen numunelere benzer mekanik davranışlar sergilemişlerdir. Örneğin % 0,5 ön deforme edildikten sonra yaşlandırılan numunenin en yüksek % 2 akma dayanımı ve çekme dayanımı 180 °C' de 1 saat

yaşlandırıldıktan sonra elde edilmiştir. Yaşlanma zamanının artarak 6 saate çıkması ile numunenin % 2 akma dayanımı ve çekme dayanımı düşmüştür. Bu durum yaşlanma sırasında oluşan ve yaşlanma zamanının artması ile büyüyen çökeltilerden kaynaklanmaktadır [59]. Boyutları büyüyen çökeltiler dislokasyonların hareketini engelleyemediği için dayanım değerleri düşmüştür.

Tosh ve arkadaşları Mg ve Cu içeren Al alaşımının yaşlanma özelliklerini araştırmışlardır. Al alaşımını 180 °C' de 2 saat yaşlandırdıklarında matris fazı ile uyumsuz CuAl<sub>2</sub> ve MgSi<sub>2</sub> çökeltilerinin oluştuğunu ve bunun sonucunda dayanımın arttığını ifade etmişlerdir [60]. Yaşlanma sıcaklığının 220 °C' ye çıkması ile CuAl<sub>2</sub> ve Mg<sub>2</sub>Si çökeltileri büyüyerek matris fazı ile uyumlu olduğunu ve buna bağlı olarak Al alaşımının dayanımının düştüğünü göstermişlerdir.

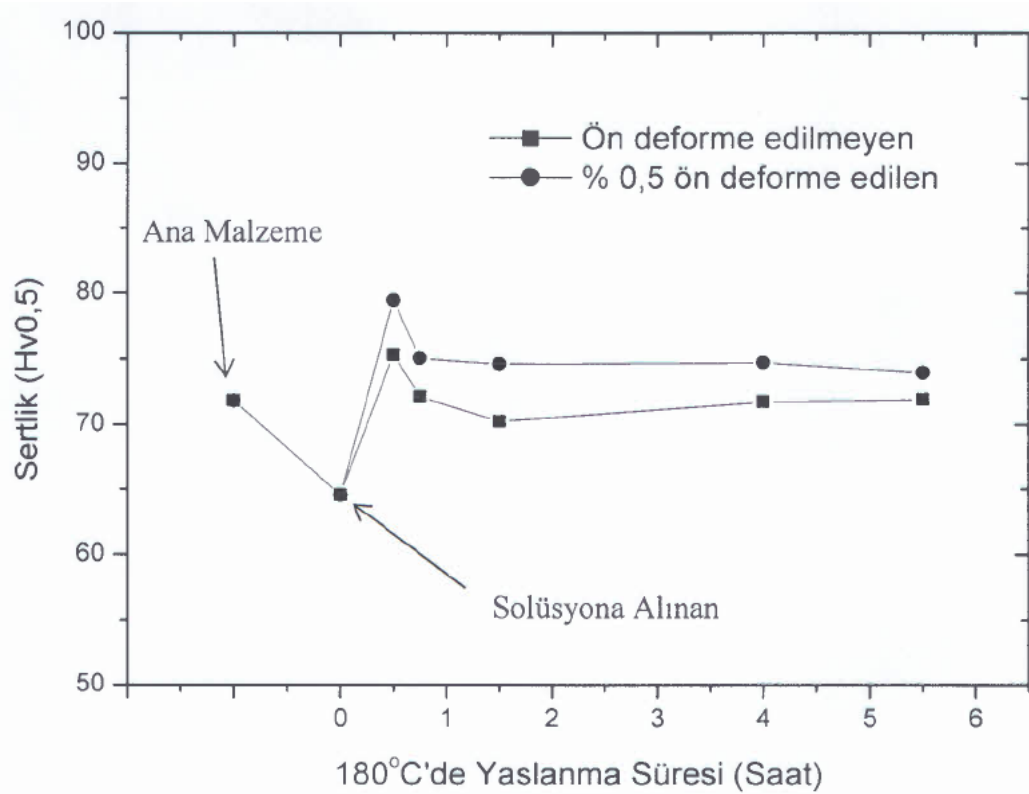
Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C' de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin dayanım değerleri ön deforme edilmeyen numunelere göre bütün yaşlandırma zamanları için yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni ön deforme edilen numunelerde çökelti sertleşmesinin daha fazla olmasındandır. Zheng ve arkadaşları yapay yaşlandırmadan önce plastik deformasyon uygulanan Mg alaşımının mekanik davranışlarını incelemişlerdir [61]. Çalışma sonucunda plastik deformasyon uygulanan ve yaşlandırılan numunelerin deformasyon uygulanmayan numunelere göre daha yüksek dayanım değerleri sergilediğini bulmuşlardır. Dayanım artışını yüksek oranda çökelti artışına ve tane sınırı kilitlenmesine bağlamışlardır. Gündüz ve Kaçar yapmış oldukları çalışmada ön deforme edilen 6063 Al alaşımlarını 180 °C' de farklı zaman aralıklarında yaşlandırmışlardır ve bu numunelerde ön deforme edilmeyenlere göre önemli derecede dayanım artışının olduğunu görmüşlerdir [62]. Ayrıca Al alaşımları ile ilgili yapılan çalışmalarda uygulanan plastik deformasyonun matris içerisindeki çökeltilerin meydana gelmesi için homojen çekirdekleşme merkezleri oluşturarak yaşlanmayı hızlandırdığı ifade edilmiştir [63-64]. Buda ön deforme uygulanan numunelerin, uygulanmayan numunelere göre daha yüksek dayanım göstermelerine neden olmuştur. Soğuma ve deformasyon yaşlanmasına maruz kalan AZ31 Mg alaşımının gerilme-uzama diyagramlarına bakıldığında yaşlanma sıcaklığının artmasına bağlı olarak diyagram üzerinde testere dişi davranış görülmektedir. Bu

davranış yaşlanma süresinin artmasıyla malzemede ikizlenmenin oluşmasının bir sonucudur. Soğuma ve deformasyon yaşlanması uygulanan numunelerden alınan mikroyapı resimleri bu sonucu desteklemektedir.

#### 5.4. SERTLİK SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ana malzeme, solüsyona alınan, solüsyona alındıktan sonra yaşlandırılan ve solüsyona alınıp % 0,5 ön deforme edildikten sonra yaşlandırılan numunelerin sertlikleri belirlenmiştir.

Bu amaçla numunelerin her biri için 5 farklı noktadan mikrosertlik değeri ölçülmüş ve ortalamaları alınarak Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Ana malzeme, solüsyona alınan, solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve deforme edilmeyen numunelerin 180°C’de farklı yaşlanma zamanına bağlı olarak elde edilen sertlik grafiği.

Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin sertliği sırayla 71,8- 64,54 Hv0,5 olarak elde edilmiştir. Suda soğutulan  $\alpha$  katı eriyiğinin içerisinde hızlı soğumadan

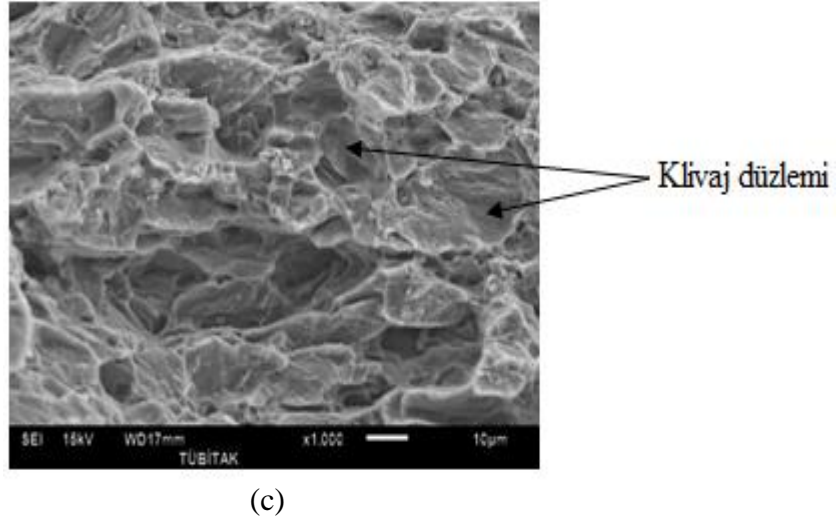
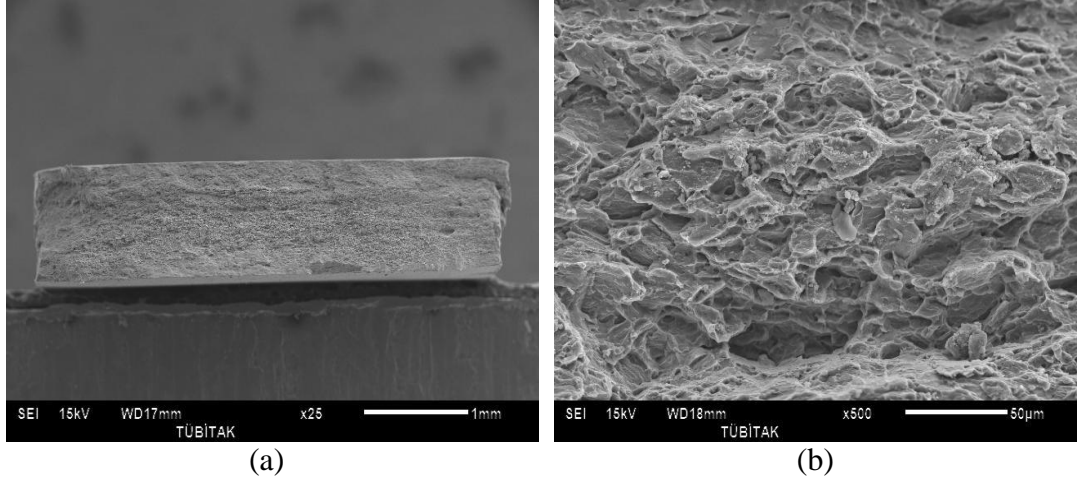
dolayı Mg-Al atomlarının serbest halde bulunması ve tane boyutunun büyük olması, solüsyona alınan numunelerde sertliğin düşmesine neden olmuştur. Şekil 5.18'de görüldüğü gibi 180 °C' de yapılan yaşlandırma ısıl işleminin süresindeki artışa paralel olarak deformasyonlu ve deformasyonsuz numunelerin sertlik değerlerinde de bir artış olmuştur. En yüksek sertlik değeri, 180°C'de 30 dakika yaşlandırma işlemi sonrasında deforme edilmeyen numunelerde 75,36 Hv0,5, deforme edilmiş numunelerde ise 79,46 Hv0,5 olarak elde edilmiştir. Sertlik değerlerindeki bu artış dislokasyonlar ile katı eriyik içerisinde serbest halde bulunan atom kümelerinin veya ikinci faz partiküllerinin etkileşiminin bir sonucudur. Bu atom kümeleri ve ikinci faz partikülleri dislokasyonların hareketlerini engelleyerek sertliğin artmasına neden olmuşlardır.

Yaşlanma zamanının artması ile AZ31 Mg alaşımının sertlik değerlerinde düşmeler meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> gibi çökeltilerin büyümesi ve çökeltiler arasındaki mesafelerin artması gösterilebilir. Çökeltilerin büyümesi ve aralarındaki mesafenin artması dislokasyonların engellenmeden rahat hareket etmesine neden olmuştur.

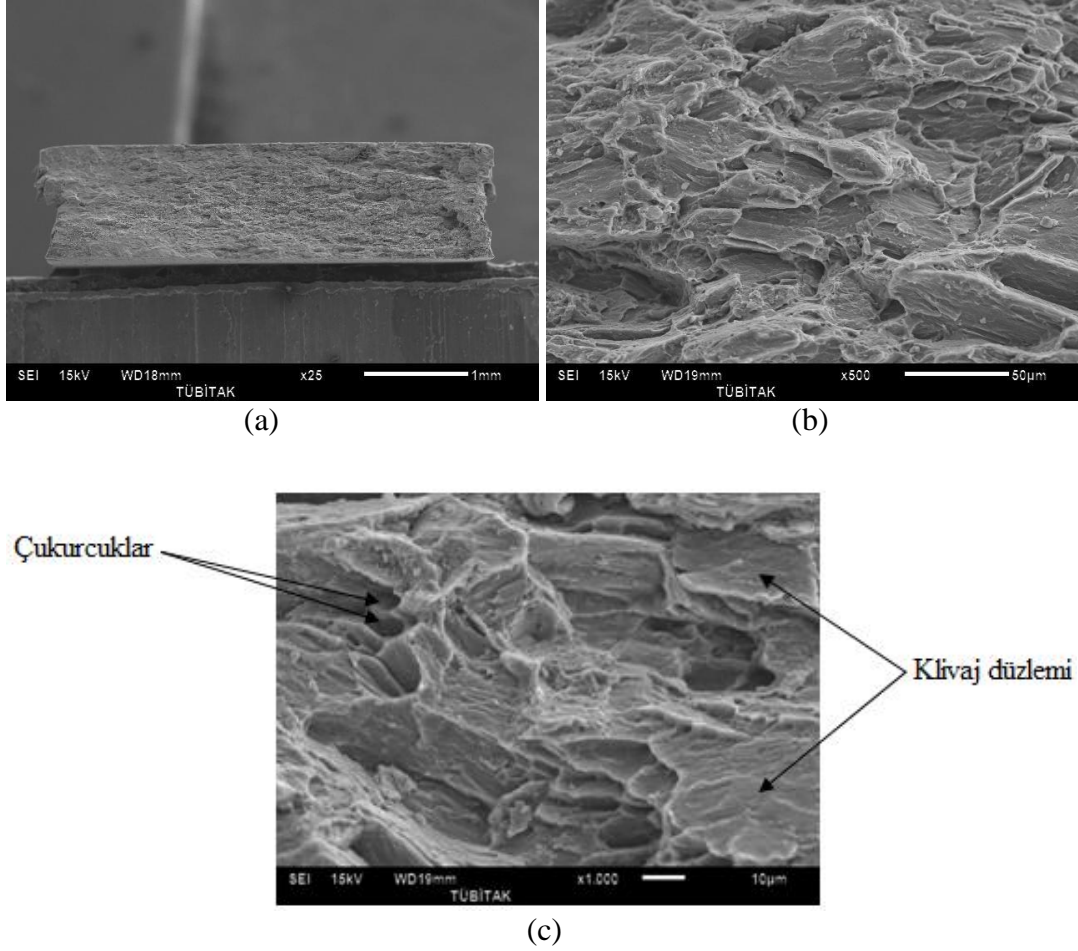
## **5.5. KIRIK YÜZEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **5.5.1. Ana Malzeme Ve Solüsyona Alınan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları Ve Değerlendirilmesi**

Şekil 5.19-5.20 ana malzeme ve 400 °C'de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan numunelerin kırık yüzey resimlerini göstermektedir. Kırık yüzey resimleri X25, X500 ve X1000 büyütmede alınmıştır. X25 büyütme numune yüzeyinin tamamını, X500 ve X1000 büyütme ise numune yüzeyinin genelini yansıtan alansal bir kesiti göstermektedir.



Şekil 5.19. Tarama elektron mikroskop ile ana malzemeden elde edilen kırık yüzey resimleri a) X25 büyütme, b) X500 büyütme ve c) X1000 büyütme.



Şekil 5.20. Tarama elektron mikroskop ile solüsyona alınan numunelerden elde edilen kırık yüzey resimleri a) X25 büyütme, b) X500 büyütme ve c) X1000 büyütme.

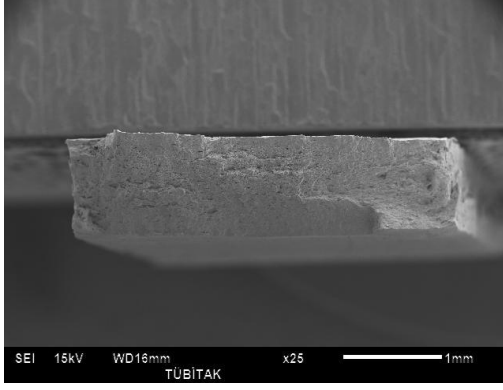
Ana malzemenin kırık yüzey resimlerine bakıldığında yüzeyde birkaç büyük çukurcukla birlikte birçok ayrılma düzlemlerinin olduğu görülmektedir. Bu durum ana malzemenin klivanj şeklin de camsı kırık yüzey sergilediğini göstermektedir. AZ31 Mg alaşımının hegzagonal sıkı paket yapıya sahip olması malzemenin gevrek bir davranış sergilemesine neden olmuştur. Hegzagonal sıkı paket yapının kayma sistem sayısı 3'tür. Bu nedenle deformasyon sırasında dislokasyonlar kolay hareket edemedikleri için AZ31 Mg alaşımının klivanj bir kırılma sergilemesi beklenen bir durumdur. Solüsyona alınan numune ana malzeme gibi klivanj bir kırılma sergilemekle birlikte ana malzemeye göre biraz daha fazla çukurcuklara sahip olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda solüsyona alınan numunenin, ana malzemeye göre daha sünek bir davranış sergilediği söylenebilir. Çekme sonuçları da bu durumu desteklemektedir, çünkü solüsyona alınan numunenin % toplam uzama değeri ana



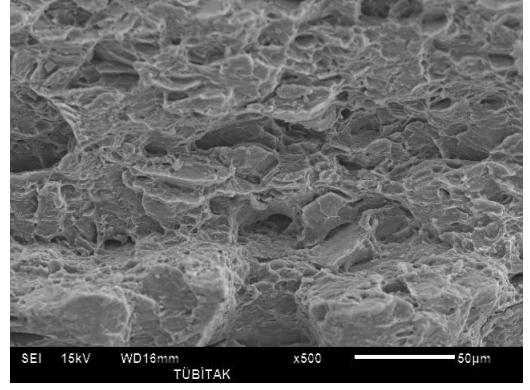
malzemeye göre daha yüksektir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü solüsyona alınan numunenin % 2 akma, çekme dayanımları düşüktür (Bakınız Çizelge 5.1 ve Şekil 5.15). Ayrıca solüsyona alınan numunelerin kırık yüzeylerinde yönlenmiş ayrılma düzlemlerinin olması kırılmanın ikiz sınırları veya kayma bantları boyunca olduğu göstermektedir.

### **5.5.2. Solüsyona Alınan Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları Ve Değerlendirilmesi**

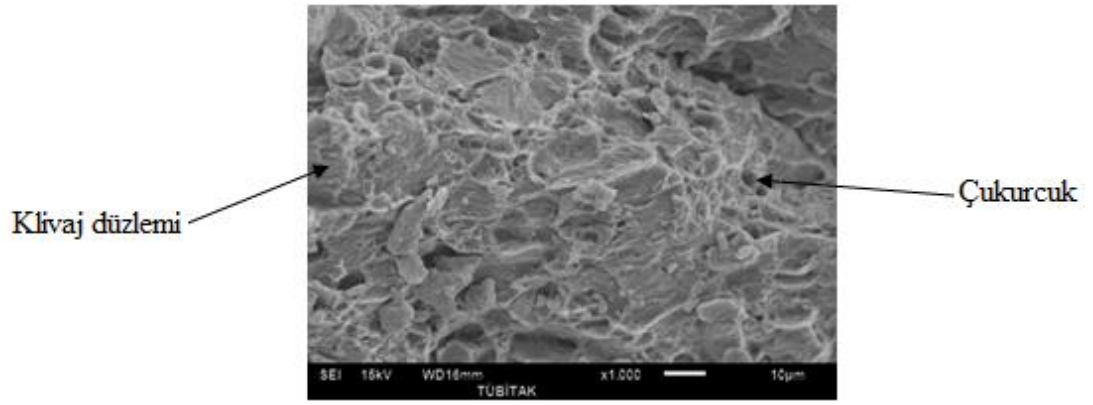
Şekil 5.21-5.22 400 °C' de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 180 °C'de 45 dakika ve 5.5 saat yaşlandırılan numunelerin kırık yüzey resimlerini göstermektedir. Şekil 5.21-5.22'den 45 dakika ve 5.5 saat yaşlandırılan numunelerin ikisinin de yüzeylerinin girintili çıkıntılı olduğu ve kısmen camsı görünüm sergilediği görülmüştür. Fakat yaşlanma zamanının 45 dakikadan 5.5 saate çıkmasıyla kesitteki daralmanın arttığı görülmektedir. Buda 5.5 saat yapılan yaşlanma işleminin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu durum yaşlanma neticesinde meydana gelen  $Mg_{17}Al_{12}$  çökeltilerin 45 dakika da dislokasyonların hareketini daha çok engellemesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır [65]. Yaşlanma süresinin 5,5 saate çıkması sonucunda  $Mg_{17}Al_{12}$  çökeltilerinin kabalaşarak dislokasyonların hareketini engelleyemediğini ve numunelerin aşırı yaşlanma sürecine girdiği anlaşılmaktadır.



(a)

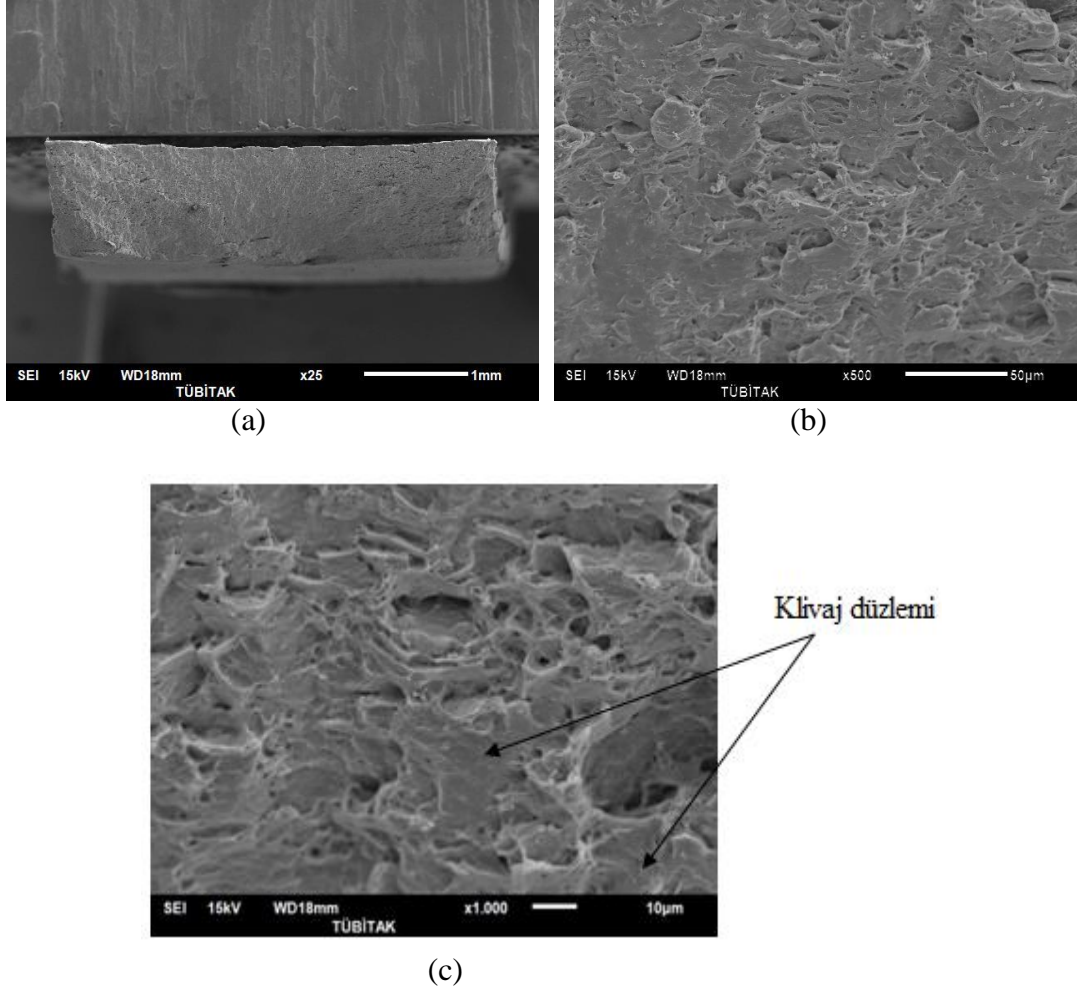


(b)



(c)

Şekil 5.21. Solüsyona alındıktan sonra 180 °C’de 45 dakika yaşlandırılan numunenin kırık yüzey resimleri a) X25 büyütme, b) X500 büyütme ve c) X1000 büyütme.

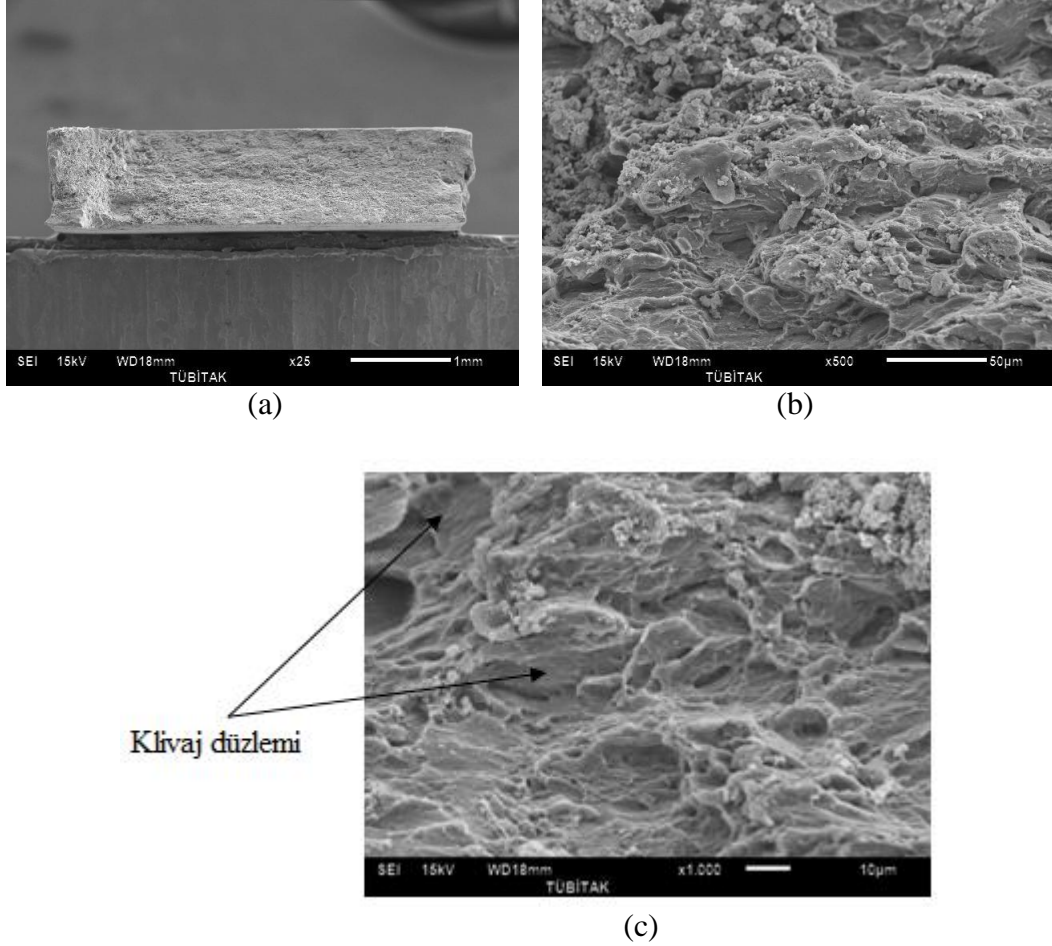


Şekil 5.22. Solüsyona alındıktan sonra 180 °C’de 5.5 saat yaşlandırılan numunenin kırık yüzey resimleri a) X25 büyütme, b) X500 büyütme ve c) X1000 büyütme.

### 5.5.3. Solüsyona Alındıktan Sonra % 0,5 Ön Deforme Edilen Ve Ardından Yaşlandırılan Numunelerin Kırık Yüzey Sonuçları Ve Değerlendirilmesi

400 °C’de 3 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulup % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C’de 1 saat yaşlandırılan numunenin kırık yüzey resimleri Şekil 5.23’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi 1 saat yaşlandırılan numunenin yüzeyi girintili çıkıntılı ve klivaj düzlemlerinin bulunduğu bir yüzeydir. Bu durum 1 saat yaşlandırılan numunenin kısmen sünek ve kısmen gevrek bir kırılma sergilediğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuç toplam % uzama değerleri ile uyumludur (Çizelge 5.13 ve Şekil 5.17). Bu durum 180 °C’ de 1 saat yaşlandırılan numunelerin küçük tane boyutuna sahip olmasına ve yaşlanma sırasında  $Mg_{17}Al_{12}$

çökeltilerinin tane içi ve tane sınırında çökmesinin bir sonucudur. Küçük taneler ve yaşlanma sırasında oluşan çökeltiler mikro boşlukların büyümesini engelleyerek toplam % uzama değerlerinin artmasına neden olmuştur. Benzer sonuçlar yapılan diğer çalışmalarda da görülmüştür [66, 67].



Şekil 5.23. Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen ve ardından 180 °C'de 1 saat yaşlandırılan numunelerin kırık yüzey resimleri a) X25 büyütme, b) X500 büyütme ve c) X1000 büyütme.

## BÖLÜM 6

### GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, soğuma ve deformasyon yaşlanmasına tabi tutulan AZ31 Mg alaşımının mikroyapı mekanik özellik ilişkisi araştırılmıştır. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Optimum mekanik özellikler solüsyona alınan ve solüsyona alındıktan sonra 180°C’ de 45 dakika veya 1 saat yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. Bu şartlarda solüsyona alınan ve solüsyona alındıktan sonra ön deforme edilen numunelerin % 2 akma dayanımı sırayla % 63,66 ve % 94,8 olarak artarken % toplam uzamada sırayla % 28,6 ve % 21,42 olarak artmıştır.

Yaşlandırma sürecinde  $\alpha$ -Mg matris fazı içerisinde  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> çökeltilerinin hem tane içerisinde hem de tane sınırlarında oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu çökeltiler AZ31 Mg alaşımının dayanımını arttırmıştır.

Solüsyona alındıktan sonra % 0,5 ön deforme edilen numuneler, deforme edilmeyen numunelere göre bütün yaşlandırma zamanları için daha yüksek dayanım değerleri sergilemişlerdir. Dayanım artışı, ön deforme edilen numunelerde yüksek oranda çökelti oluşumunda ve tane sınırı kilitletlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Ana malzeme ve solüsyona alınan numunelerin kırık yüzeylerinde birkaç büyük çukurcuk ve yüksek oranda da kılıvaj düzlemleri görülmüştür. Bunun yanında solüsyona alınan ve solüsyona alındıktan sonra 180°C’ de 45 dakika veya 1 saat yaşlandırılan numunelerde ise küçük çukurcuklarla birlikte kılıvaj düzlemleri görülmüştür.

## KAYNAKLAR

1. Kütahya Manyezit İşletmeleri A.Ş., “Bilgi”, <http://www.kumas.com.tr/> (2014).
2. Kazdal, H. K., “Magnezyum alaşımları: otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği”, *Tubitak, Marmara Araştırma Merkezi*, Kocaeli, 3-39 (1999).
3. 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).
4. Barber, L. P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys”, M. Sc. Thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 10-46 (2004).
5. Luo, A. A., “Materials comparison and potential applications of magnesium in automobiles”, *Magnesium Technology*, Nashville, 89-99 (2000).
6. Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. and Wu, S., “Potential automotive uses of wrought magnesium alloys”, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).
7. Polmear I. J., “Magnesium alloys”, Light Alloys, *Butterworth Heinemann*, New York, 169-210 (1989).
8. Beffort, O. and Hausmann, C., “Das leichtmetall magnesium und seine egerungen”, *EMPA Mg Seminar*, Thun, 15-22 (1999).
9. Vogel, M., “Mikrostruktur und kriechverhalten von magnesiumdruckgusslegierungen im system Mg-Zn-Al-Ca”, Ph. D. Thesis, *Max Planck- Institut für Metallforschung*, Stuttgart, 6-20 (2002).
10. 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).
11. Brown, R., “Magnesium, Mining Journal Annual Review for 2004”, *International Magnesium Statistics*, 1-14 (2004).
12. Chung, Y. J, Park, J. L, Kim, N. J, and Shin, K. S, “Effects of alloying elements on mechanical properties of Mg-Al Alloys”, *Materials Science*, 488-489 : 845-848 (2005).

13. Arpaçay, D., “Magnezyum AZ80 alaşımında yüksek basınç burulma işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2009).
14. Bolstad, J., “Magnesium alloy development for intelligent magnesium designs”, *SinoMaG Seminar*, Beijing-China, 8-14 (2000).
15. Davis, J. R., “Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials”, ASM Handbook, *ASM International*, 2: 480-516 (1998).
16. Mordike B. L, and Kainer K. U., “Magnesium alloys and their applications”, *Werkstoff-Informationsgesellschaft*, Frankfurt, 34-48 (1998).
17. Eliezer, D., Aghion, E. and Froes, F. H., “Magnesium science, technology and applications”, *Advanced Performance Materials*, 201-212 (1998).
18. Mordike B. L, and Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, *Materials Science&Engineering A*, 302: 37-45 (2001).
19. Atalay, O., “Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
20. 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).
21. Kainer, K. U., “The Current State of Technology and Potential For Further Development of Magnesium Applications”, *Wiley-Vch*, Germany 3-20 (2006).
22. Kandemir, K. ve Can, A. Ç., “Otomotiv endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1: 37-45 (2003).
23. Watarai, H., “Trend of research and development for magnesium alloys”, *Science and Technology Trends*, 18: 84-97 (2006).
24. Jambor A, and Beyer M., “New cars-new materials”, *Materials&Design*, 4 (6): 203-209 (1997).
25. Tekin, E., “Demir Dışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi”, 1.Baskı, *Sagem*, 151-201 (1984).
26. Žaludová, N., “Mg-RE alloys and their applications”, *WDS’05 Proceedings of Contributed Papers*, 3: 643-648 (2005).
27. Johansson, S., “Magnesium alloys”, Light Alloys, I. J. Polmear, *Engineering Materials*, 5: 17-20 (2002).

28. 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).
29. Çıtak, K., “Magnezyum alaşımları seçim ve kullanım kriterleri”, *Metal Dünyası Dergisi*, Eylül (2004).
30. Baker, H., “Alloy phase diagrams”, ASM Handbook, *ASM International*, 3: 280-285 (1998).
31. Aizawa, T, and Song, R., “Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg<sub>2</sub>Si and Mg<sub>2</sub>Sn”, *Intermetallics*, 14: 382-391 (2006).
32. 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).
33. 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).
34. 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).
35. Dennis, W., “Demir dışı metallerin metalürjisi”, Çeviri Editörü, Doç. Dr. H. Erman Tulgar, *Akademi LTD. ŞTİ. Yayınları*, New York, 220-292 (1987).
36. 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).
37. Zhang, Z, Couture, A. and Luo, A., “An Investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys”, *Scripta Materialia*, 39: 45-53 (1998).
38. 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).
39. Landkof, B., “Magnesium alloys applications”, Magnesium Alloys Science, Tecnology and Application, Aghion E., and Eliezer D., *Dead Sea Magnesium*, 8: 293-316 (2005).
40. Kayalı, E. S., ve Çimenoğlu, H., “Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları Problemleri ve Çözümleri”, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 387-393 (1995)
41. Erdoğan, M., “Al-Li-Cu-Mg alaşımlarında yaşlandırma mekanizması ve ısıt işlemleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 140 (1996).



42. Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *Derya Kitabevi*, Trabzon, 285 (1999).
43. Yüksel, M., “Malzeme Bilgisi”, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, (2003).
44. Şendeniz, M., “Seçilen bir Al-Mg-Si alaşımının (AlMgSi0.5;Etial 60) ısıt işlemlerle özellik değişimlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa (2006).
45. Baker, S. P., Joo, Y. C., Knaub, M. P., and Arzt, E., “Electromigration damage in mechanically deformed al conductor lines: Dislocations as fast diffusion paths”, *Acta Mater.*, 48: 2199-2208 (2000).
46. Karabay, S, Yılmaz, Y, ve Zeren, M., “AA-6101 alaşımının yüksek gerilim çıplak havai hatlarında AAAC iletkeni olarak kullanımı”, *Metalürji Mühendisleri Odası*, 133: 56-62 (2003).
47. Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 364-370 (1998).
48. Öz, Ö., “Yaşlandırma ısıt işleminin AA 7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi*, Zonguldak (2007).
49. Ünal, M., “Magnezyum alaşımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 57-61 (2008).
50. Oğuz, B., “Demir Dışı Metallerin Kaynağı”, *Oerlikon Yayını*, İstanbul (1990).
51. Büyükdoğan, S., “Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).
52. Gündüz, S, and Kaçar, R., “Strengthening of 6063 aluminium alloy by strain ageing”, *Kovove Mater*, 46: 345–350 (2008).
53. Alez-Martínez, R. G., Göken, J., Letzig, D., Steinhoff, K., and Kainer, K. U., “Influence of aging on damping of the magnesium-aluminium-zinc series”, *J Alloys Comp*, 437: 127–132 (2007).
54. Chinh, N. Q., Lendvai, J, and Hono, S., “The effect of cu on mechanical and precipitation propertis of Al-Zn-Mg alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 378 (142): 52-60 (2004)
55. Somoza A. and Tolley A., “Microstructural evolution of 7012 alloy during the early stages of artificial ageing”, *Acta Materialia*, 47 (17): 4355-4364 (1999).

56. Werenskiold, J. C, Deschamps, A. and Brechet, Y., “Characterization and modeling of precipitation kinetics in an AL-Zn-Mg alloy”, *Materials Science And Engineering*, 293:267-274 (2000).
57. Ming-hong, S, Guo-dong, S, Yu, W, and Jun, Q., “Paint-bake response of AZ80 and AZ31 Mg alloys”, *Trans Nonferrous Met Soc, China*, 20: 571–575 (2010).
58. Marya, M, Hector, L. G, Verma, R, and Tong, W., “Microstructural effects of AZ31 magnesium alloy on its tensile deformation and failure behaviors”, *Mater Sci Eng A*, 418: 341–356 (2006).
59. Liu, C. L, Xin, Y. C, Tang, G. Y, Paul, K. C., “Influence of heat treatment on degradation behavior of bio-degradable die-cast AZ63 magnesium alloy in simulated body fluid”, *Mater Sci Eng A*, 456: 350–357 (2007).
60. Tosh, M., Samuel, F. H, Mucciardi, F., Doty, H. W. and Valtierra, S., “Effect of metallurgical parameters on the Machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys”, *Mater. Eng. A.*, 434: 207-217 (2006).
61. Ming-hong, S, Guo-Dong, S, Yu, W, and Jun, Q., “Paint-bake response of AZ80 and AZ31 Mg alloys”, *Trans Nonferrous Met. Soc, China*, 20: 571-575 (2010).
62. Liu, C. L, Xin, Y. C, Tang, G. Y, Paul, K. C., “Influence of heat treatment on degradation behavior of bio-degradable die-cast AZ63 magnesium alloy in simulated body fluid”, *Mater Sci Eng A*, 456: 350–357 (2007).
63. Sun, Y., Baydoğan, M. ve Çimenoğlu, H., The effect of deformation before ageing on the wear resistance of an aluminium alloy, *Materials Letters*, 38 (3): 221-226 (1991).
64. Mazzini, G., “Influence of deformation before artificial aging on properties of Al-Cu-Mg aluminum alloy”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 31 (9): 1127-1130 (1994).
65. Edwards, G. A., Stiller, K., Dunlop, G. L., and Couper, M. J., “The Precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys”, *Acta Mater*, 46: 3893-3904 (1998).
66. Yan, L, Zhi-min, Z., and Yong, X., “Influence of aging on microstructure and mechanical properties of AZ80 and ZK60 magnesium alloys”, *Tran. Nonferrous Met Soc, China* 21: 739-744 (2011).
67. Gündüz, S, and Kaçar, R., “Strengthening of 6063 aluminium alloy by strain ageing”, *Kovove Mater*, 46: 345–350 (2008).
68. Büyükdoğan, S., “Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).

69. 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).
70. Aizawa, T, and Song, R., "Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg<sub>2</sub>Si and Mg<sub>2</sub>Sn", *Intermetallics*, 14: 382-391 (2006).
71. Kima, J. M, Park, B. K, Jun, J. H, Kim, K. T, and Jung, W. J., "Microstructure and properties of Mg-Al based casting alloys modified with minor alloying elements", *Materials Science*, 488-489: 149-150 (2005).
72. Baker, H., "Alloy Phase Diagrams", *ASM International*, 3: 280-285 (1998).
73. Duffy, L., "Magnesium alloys-Zirconium containing casting alloys", *Materials World*, 4: 127-130 (1996).
74. Kurze, P., "Corrosion and surface protections", *Magnesium Technology*, *Springer*, 431- 494 (2006).
75. Kammer, C., "Wrought Alloys", *Magnesium Casting Alloys*, 204-214 (2006).

## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin KERENCİLER 1987 yılında Kars'ta doğdu; ilköğretim ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Hacı Hatice Bayraktar lisesinden mezun oldu. 2006 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2011 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2011 yılında KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2014 yılında Legrand Elektrik A.Ş' de çalışmaya başladı halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Barış Mah. 1824. Sok. Akkiraz Yapı Koop. Apartmanları A Blok D:7  
Gebze/Kocaeli

Tel : (535) 030 9626

E-posta : [kerencihuseyin@gmail.com](mailto:kerencihuseyin@gmail.com)