



**AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Ca İLAVESİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İdris GÖKALP

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU**

**AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE Ca İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İdris GÖKALP

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU**

**KARABÜK
Kasım 2022**

İdris GÖKALP tarafından hazırlanan “AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Ca İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21/11/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU (KOÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim 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.”

İdris GÖKALP

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE Ca İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İdris GÖKALP

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU

Kasım 2022, 60 sayfa

Bu çalışmada, AZ serisi magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık mekanik özelliklerinde Ca ilavesinin etkisini incelemek amacıyla kokil döküm yöntemi ile 3 farklı alaşım (AZ21, AZX211 ve AZX311) üretilmiştir. Alaşımları üretmek için AZ63 alaşım hurdaları, Mg-Ca mastır alaşımı ve %99,5 saflıkta magnezyum kullanılmıştır.

Alaşımların mikro yapısal karakterizasyonu, elementel ve faz analiz sonuçları XRF, XRD, optik mikroskop ve SEM-EDS kullanılarak yapılmıştır. Alaşımların oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık servis koşulları performanslarını ortaya çıkarmak için 25 °C, 150 °C ve 200 °C'de çekme ve aşınma testleri uygulanmıştır. Ayrıca alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik ölçümü (25 °C'de) gerçekleştirilmiştir. AZ21 alaşımının mikro yapısı sadece α -Mg içerirken, AZX211 ve AZX311 alaşımlarının mikro yapıları Ca ilavesinden dolayı α -Mg, (Mg, Al)₂Ca ve Al₂Ca'dan oluşmaktadır. AZX211 alaşımının akma ve çekme mukavemetlerinin tüm

sıcaklıklarda daha iyi olduğu ve diğer alaşımlara göre en düşük sertliğe (51.6 HV) sahip olduğu görülmüştür. Tüm sıcaklıklarda aşınma oranları karşılaştırıldığında, AZX211 alaşımının uygulanan tüm yük değerleri için kararlı bir aşınma oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Sözcükler : Sıcak kuru aşınma, triboloji, Mg-Al-Zn-Ca alaşımları, AZ serisi.

Bilim Kodu : 91518

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CA ADDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AZ SERIES MAGNESIUM ALLOYS

İdris GÖKALP

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgy and Material Engineering Education

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Alper İNCESU

November 2022, 60 pages

In this study, to investigate the effect of Ca addition on elevated temperature mechanical properties of AZ series magnesium alloys, 3 different alloys (AZ21, AZX211 and AZX311) were produced by the gravity die casting method. AZ63 alloy scraps, Mg-Ca master alloy and %99.5 purity magnesium were used to produce the alloys. Elemental and phase analyses, microstructural characterization were performed by using XRF, XRD, optical microscope and SEM-EDS. Tensile and wear tests were applied at 25 °C, 150 °C and 200 °C to reveal the room and elevated temperature service condition performances of alloys. Also, hardness (at 25 °C) was measured to figure out the mechanical properties of alloys. While the microstructure of AZ21 alloy contains only α -Mg, microstructures of AZX211 and AZX311 alloys composed of α -Mg, $(\text{Mg,Al})_2\text{Ca}$ and Al_2Ca due to the addition of Ca. It has been observed that the yield and tensile strengths of AZX211 alloy are better for all temperatures and it also has the lowest hardness (51.6 HV) as compared to the other

alloys. When all temperatures wear rates are compared, it is understood that the AZX211 alloy has a stable wear rate for all applied load values.

Key Words : Hot dry wear, tribology, Mg-Al-Zn-Ca alloys, AZ series.

Science Code: 91518

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın Dr. Öğr. Üyesi Alper İNCESU hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Annem-Babam ve tüm kardeşlerimin bu zorlu süreçte maddi-manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için ve ailemizin hocası olan Dr. Öğr. Üyesi İslam GÖKALP ağabeyime tüm kalbimle őükranlarımı sunarım.

Çalışmanın gerçekleşmesinde sağladığı maddi destekleri (Proje No: KBU BAP-21-YL-064) için Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
MAGNEZYUM	3
2.1. MAGNEZYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ	6
2.2. ELEKTROLİTİK PROSESLER	7
2.2.1. I. G Farben Hücresi.....	7
2.2.2. Dow Hücresi	7
2.2.3. Alcan Hücresi	8
2.3. TERMİK PROSESLER	9
2.3.1. Silikotermik Prosesi.....	9
2.3.2. Alüminotermik Prosesi	9
2.3.3. Kalsiyum Karpit Prosesi	10
2.3.4. Karbotermik Prosesi	10
2.4. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI.....	10
2.4.1 Magnezyum Alaşımlarının Standart Gösterimi.....	12
2.4.2. Yaygın Kullanılan Alaşım Elementleri	12
2.5. AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA Ca İLAVESİ.....	16

	<u>Sayfa</u>
2.6. MAGNEZYUM DÖKÜM YÖNTEMLERİ	17
2.6.1. Kum Kalıba Döküm.....	18
2.6.2. Yüksek Basıncılı Döküm	18
2.6.3. Kokil Kalıp Döküm	19
2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA	20
2.7.1. Adezif (Kopma) Aşınma.....	21
2.7.2. Abrasif (Çizik) Aşınma.....	21
2.7.3. Yorulma (Pitting) Aşınması.....	21
2.7.4. Korozi Aşınma	21
2.7.5. Erozyon Aşınması.....	22
2.8. MAGNEZYUM ALAŞIMININ KULLANIM ALANLARI	22
2.8.1. Uzay ve Havacılık Uygulamaları.....	23
2.8.2. Otomotiv Uygulamaları	24
2.8.3. Biyomedikal Uygulamalar.....	25
BÖLÜM 3	27
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1. DÖKÜM YÖNTEMİ	27
3.2. ISIL İŞLEM.....	28
3.3. METALOGRAFİK İNCELEMELER.....	29
3.5. SEM ANALİZİ.....	30
3.6. XRD ANALİZİ	31
3.7. SERTLİK TESTİ.....	32
3.8. AŞINMA TESTİ	32
3.9. ÇEKME TESTİ.....	33
BÖLÜM 4	35
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	35
4.1. ELEMENTAL ANALİZ	35
4.2. MİKROYAPILAR VE FAZ ANALİZLERİ.....	35
4.2.1. Optik Mikroskop Görüntüleri.....	35
4.2.2. XRD Analizi	36

	<u>Sayfa</u>
4.2.3. SEM-EDS Analizleri	37
4.3. ÇEKME TESTİ	40
4.4. SERTLİK TESTİ	43
4.5. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER	44
4.5.1 Aşınma Sonrası Yüzey SEM Analizi	46
BÖLÜM 5	49
SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Mg ve diğer metallerin öz kütleli olarak karşılaştırılması.	3
Şekil 2.2.	Hekzagonal sıkı paket (HSP) kristal kafes yapısı	6
Şekil 2.3.	I. G Farben hücresi 1) Refrakter tabaka 2) Katot (çelik) 3) Anot (grafit) 4) Üst ve alt elektrolit solüsyon seviyeleri 5) Anot hazne 6) Diyafram....	7
Şekil 2.4.	Dow hücresi 1) Silindirik anot (grafit) 2) Konik katot (çelik) 3) Çelik katman 4) Dış katman 5) Mg birikme haznesi	8
Şekil 2.5.	Alcan elektroliz hücresi 1) Refrakter ayırıcı katmanlar 2) Elektroliz ve metal ayırma bölümleri 3) Katot (çelik) 4) Anot (grafit) 5) Mg biriktirme parçası 6) Katot çubuklar 7) Gaz çıkışı (A), elektroliz (B) ve metal ayırma bölgesi	8
Şekil 2.6.	AZ serisi Mg alaşımı örnek gösterimi.....	11
Şekil 2.7.	Mg-Al ikili faz diyagramı	13
Şekil 2.8.	Mg-Zn ikili faz diyagramı	14
Şekil 2.9.	Mg-Ca ikili faz diyagramı	15
Şekil 2.10.	A) Askeri/ticari helikopter için T5 temperli ZE41A Mg alaşımında kuma dökülen ana şanzıman muhafazası B) Askeri/ticari helikopter için T5 temperli QE22A Mg alaşımında kuma dökülen ana şanzıman parçası...	18
Şekil 2.11.	Mg esaslı döküm braket	19
Şekil 2.12.	Kokil kalıp döküm yöntemi ile üretilen AZ91 Mg alaşımı.....	20
Şekil 2.13.	Mg esaslı Sikorsky S-56 askeri hava aracı	23
Şekil 2.14.	AZ91 Mg alaşımı kullanılarak üretilen otomobil parçalar	25
Şekil 2.15.	İmplant malzemesi olarak kullanılan Mg esaslı vida.....	26
Şekil 3.1.	Atmosfer kontrollü döküm fırını.	27
Şekil 3.2.	Dökümden sonra kalıptan çıkarılmış AZ-XCa Mg alaşımı.	28
Şekil 3.3.	Protherm ısı işlem cihazı.	28
Şekil 3.4.	Zımparalama ve parlatma için bakalite alınmış numuneler.	29
Şekil 3.5.	Zımparalama ve parlatma cihazı.	29
Şekil 3.6.	Kimyasal kompozisyonların belirlendiği XRF cihazı.	30
Şekil 3.7.	Mikro yapı analizlerinin yapıldığı SEM cihazı.	31
Şekil 3.8.	Alaşımın fazlarını belirlemede kullanılan XRD cihazı.	31
Şekil 3.9.	Q/10A+ mikro sertlik ölçüm cihazı.....	32
Şekil 3.10.	UTS Tribomotor T10/20 aşınma cihazı.	33

Sayfa

Şekil 3.11. Çekme test cihazı.	34
Şekil 4.1. a) AZ21 Mg alaşımı b) AZX211 Mg alaşımı ve c) AZX311 Mg alaşımlarının 200X büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri.	36
Şekil 4.2. Mg alaşımlarının XRD analiz sonuçları.	37
Şekil 4.3. a) AZ21 b) AZX211 ve c) AZX311 Mg alaşımlarının SEM görüntüleri.	38
Şekil 4.4. a) AZ21, b) AZX211 ve c) AZX311 alaşımlarının.	38
Şekil 4.5. Mg alaşımlarının oda sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.	40
Şekil 4.6. Mg alaşımlarının 150 °C sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.	41
Şekil 4.7. Mg alaşımlarının 200 °C sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.	42
Şekil 4.8. AZ21 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.	45
Şekil 4.9. AZX211 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.	45
Şekil 4.10. AZX311 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.	46
Şekil 4.11. 40N uygulanan yükün aşınmış yüzey SEM görüntüleri.	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Magnezyumun özellikleri	4
Çizelge 2.2. Mg, Al ve Fe karşılaştırılması	4
Çizelge 2.3. Mg alaşımındaki elementleri gösteren harf kodları	11
Çizelge 2.4. Mg alaşımlarının standart gösterimleri.....	12
Çizelge 3.1. Nital ve asidik pikral'in kimyasal bileşimi.....	30
Çizelge 4.1. Üretilen alaşımların XRF analiz sonuçları (% ağı.).....	35
Çizelge 4.2. Mg alaşımların ortalama tane boyutları (µm).....	36
Çizelge 4.3. Mg alaşımlarının noktasal EDS analiz sonuçları.....	39
Çizelge 4.4. Mg alaşımlarının 25 °C'deki çekme testi değerleri.....	40
Çizelge 4.5. Mg alaşımlarının 150 °C'deki çekme testi değerleri.....	41
Çizelge 4.6. Mg alaşımlarının 200 °C'deki çekme testi değerleri.....	41
Çizelge 4.7. Mg alaşımlarının sertlik değerleri.....	43
Çizelge 4.8. Oda sıcaklığı aşınma hızları.....	44
Çizelge 4.9. 150 °C sıcaklığındaki aşınma hızları	44
Çizelge 4.10. 200 °C sıcaklığındaki aşınma hızları	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

MgCl	: magnezyum klorür
MgSO ₄	: magnezyum sülfat
MgO	: magnezyum oksit
HV	: vickers sertlik
SiO ₂	: silisyum dioksit
NaCl	: sodyum klorür
CaO	: kalsiyum oksit
CO ₂	: karbondioksit
Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Mn	: mangan
Ca	: kalsiyum
Si	: silisyum
N	: newton
C	: karbon
P	: fosfat
Zn	: çinko

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu) Birliği
ISO	: International Organization for Standardization Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	: Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)

- XRF : X-ray Elementel Analysis (X-ışını Element Analiz)
- XRD : X-Ray Diffractometer (X-ışını Difraktometresi)
- EN : European Norms (Avrupa Normları)
- HSP : Hekzagonal Sıkı Paket
- TS : Türk Standartları

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Magnezyum adı, Teselya'da Magnesia adı verilen bir bölge için Yunanca kelimeden türetilmiştir. 1808 yılında Sir Humphrey Davy tarafından keşfedilmiş ve metalik olarak Antoine Busy tarafından 1831 yılında elde edilmiştir. Magnezyumun Dünya'da en çok bulunan elementler arasında 8. sırada yer alması, hafif ($1,74 \text{ g/cm}^3$) bir metal olması ve okyanuslar da yaklaşık %0,13 oranında bulunması nedeniyle oldukça dikkat çekmektedir. Ayrıca magnezyum karnalit $\text{KCl-MgCl}_2-6\text{H}_2\text{O}$ (8% Mg), manyezit Mg-CO_3 (27% Mg), ve dolomit $\text{MgCO}_3-\text{CaCO}_3$ (13% Mg) gibi cevher minerallerden elde edilmektedir. Çoğunlukla deniz suyunda ergimiş magnezyum klorürün (MgCl_2) elektrolizi (ilk üretim J. Von Liebling ve Michael Faraday 1833) yöntemiyle elde edilmektedir [1, 2].

Magnezyum, Simgesi Mg ve atom numarası 12 olan periyodik cetvelde 2A grubunda yer alan toprak alkali bir metaldir. Magnezyum yaygın olarak kullanılan çelik, titanyum ve alüminyum gibi metallere göre hafif bir metal olarak karşımıza çıkmaktadır. Bundan dolayı özellikle otomotiv ve uzay-havacılık endüstrisinde yakıt tasarrufu ve ağırlık kazancı açısından kullanımı artarak devam etmektedir [3, 4]. Ancak magnezyumun düşük mukavemet özellikleri ve kolay oksidasyonu saf halde kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle alüminyum, çinko, kalsiyum ve toprak alkali gibi uygun elementlerle alaşımlandırılarak magnezyumun mekanik ve korozyon özellikleri iyileştirilmektedir. En yaygın olarak üretilen magnezyum alaşımları AZ (AZ91), AM (AM50), AE (AE21), AS (AS21) ve WE (WE43) serileridir [5]. AZ (magnezyum-alüminyum-çinko) serisi, iyi bir dökülebilirlik ve dövülebilirlik kombinasyonu gibi dikkat çekici özellikleri, mekanik özellikleri ve ayrıca hammaddenin daha ucuz olması nedeniyle diğer magnezyum alaşımlarına göre yüksek oranda kullanım alanına sahiptir [6, 7].

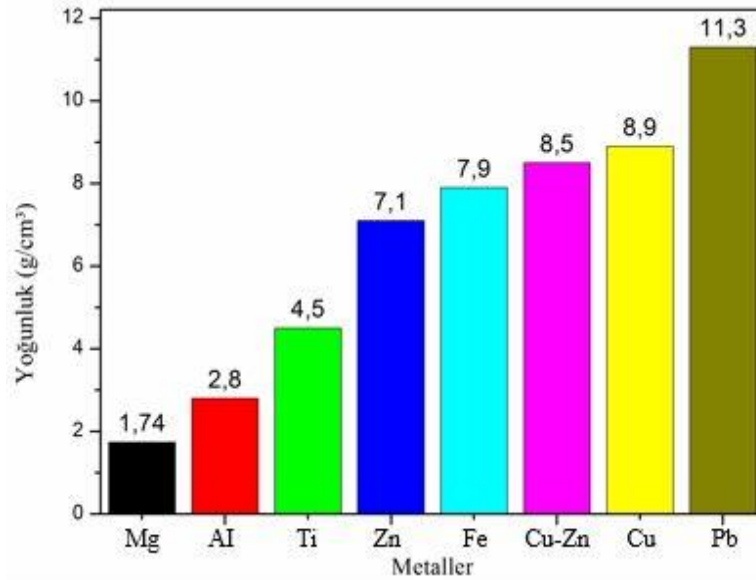
Endüstriyel olarak yaygın kullanılan AZ serisi magnezyum alaşımlarında mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok alaşım elementi kullanılmaktadır. Özellikle Ca elementi ilavesi ile ince taneli mikroyapı ve dolayısıyla yüksek mekanik özelliklere sahip AZ serisi magnezyum alaşımları dikkat çeker hale gelmektedir. Ancak AZX (X=Ca) alaşımlarında güncel çalışmalar olmasına rağmen, bu alaşımların yüksek sıcaklık tribolojik özelliklerinin araştırılmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada AZ serisi magnezyum alaşımına Ca ilave edilerek AZX serisi magnezyum alaşımları üretilmiştir. Üretilen alaşımların mikro yapı analizleri SEM, XRF, XRD ve Optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak farklı sıcaklıklarda tribolojik özellikler ve akma-çekme dayanımları incelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, birinci bölümde magnezyum metalinin tarihsel süreç ve yapısal özellikleri hakkında özet bilgi verilmiştir. İkinci bölümde magnezyumun genel özellikleriyle beraber yaygın kullanılan alaşım elementleri ve üretim süreçleri hakkında genel bir literatür araştırması yapılarak değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, cihazlar ve test parametrelerine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, önceki benzer çalışmalar ile neden-sonuç ilişkisi bakımından analiz edilmiştir. Son bölümde ise deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak açıklanmıştır.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM

Mg diğer yapısal metallere göre düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı ilgi çekici bir malzeme haline gelmektedir. Şekil 2.1’de Mg ve diğer metallerin yoğunlukları grafiksel olarak verilmektedir. Mg ve alaşımlarının özellikle ağırlığın önemli rol oynadığı başta havacılık, savunma, elektronik, otomotiv sağlık ve spor ekipmanları gibi uygulamalarda son yıllarda kullanımı artmaktadır [8]. Özellikle otomobil gövde parçalarındaki kullanımında Bugatti’nin 1939 tarihli 57-C tipi Atlantik ve 1969 model Porsche 962 modelleri örnek olarak verilebilir. Diğer yandan magnezyumun yakıt tasarrufu ve azaltılmış CO₂ emisyonu yoluyla çevre koruma konusundaki faydaları önemini artıran özellikleri arasında yer almaktadır [9, 10]. Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan Mg özellikleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Mg ve diğer metallerin öz kütleli olarak karşılaştırılması [8].

Çizelge 2.1. Magnezyumun özellikleri [11].

Element Simgesi	Mg
Atomik Yarıçap	1,72 Å
Atomik Hacim	13,97 cm ³ /mol
Özgül Isı	1,02 J/gK
Buharlaşma Isısı	127,40 kJ/mol
Elektriksel İletkenlik	0,226 10 ⁶ /cm ohm
Termal İletkenlik	1,56 W/cmK
İyonlaşma Enerjisi	737,7 (kJ/mol)
Elektron İlgisi	-230 (kJ/mol)
Elektronegatiflik	1,31 g/mol
Buhar Basıncı (650 °C)	360 Pa
Isı Kapasitesi	1,025 kJ/kg. K
Yüzey Gerilimi:	0,56 N/m
Burger Vektörü	0,321 nm
0,2% Akma Mukavemeti	21 MPa

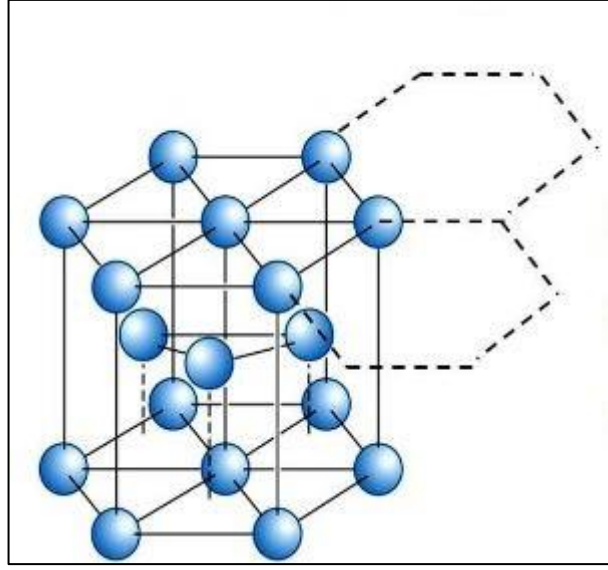
Magnezyum geleneksel metalik malzemelere alternatif olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Çizelge 2.2’de özellikle ticari olarak yaygın kullanılan alüminyum ve çeliğe göre üstün özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Mg, Al ve Fe karşılaştırılması [9].

Özellikler	Magnezyum	Alüminyum	Demir
Atomik numara	12	13	26
Atomik ağırlık	24,305	26,98	58,7
Kristal kafes yapısı	HSP	YMK	HMK
Yoğunluk (g/cm ³)	1,738	2,70	7,86
Elastik modül (GPa)	44.4	69	207
Erime noktası °C	648,8	660	1536
Kaynama noktası °C	1090	2520	2862
Poisson oranı	0,35	0,33	0,33
Özgül mukavemet (kNm/kg)	35-260	7-200	30-50
Özgül sertlik (MNm/kg)	21-29	25-38	28-30
Termal genleşme katsayısı (20°C –100°C (×10 ⁶ /C)	24.8	23,6	11,7
Çekme mukavemeti (MPa)	240 (AZ91D)	320 (A380)	350

Görüldüğü üzere magnezyum HSP kristal yapısına sahip olmasından dolayı yüksek kayma direnci sağlamaktadır. Özellikle alüminyum ve çeliğe göre oldukça hafif olan magnezyum endüstriyel olarak mükemmel bir ağırlık kazancı sağlamaktadır. Mg alaşımları ses ve titreşimi absorbe etme yeteneğinden dolayı birçok endüstriyel makine ve ekipmanların kullanım ömrünün artmasını sağlamaktadır [12]. Ayrıca dökme demire göre yüksek oranda titreşim sönümlene kapasitesine sahip olmakla beraber hafif bir metal olması gelecek yıllarda kullanım alanının artmasındaki diğer etkindir. Özellikle Mg alaşımlarının biyomedikal uygulamalarda yüksek biyouyumluluk ve biyo metalik malzemeler arasında üstün bozunma özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir [13]. Mg ve alaşımlarının hem insan kompakt kemik yoğunluğuna ($1,8 \text{ g/cm}^3$) hem de elastisite modülüne (45 GPa) yakın bir değerde olması biyomedikal alandaki kullanımının diğer önemli sebepleri olarak sıralanabilir [14]. Bu nedendir ki magnezyum Al, Fe ve Ti gibi metallerle karşılaştırıldığında iyi bir biyo metalik malzeme özelliklerine sahip olmaktadır. Ayrıca Mg^{+2} iyonu insan vücudunda önemli bir bileşendir. Kemik ve miyokardiyal hücrelerde yaygın olarak dağılır ve enerji metabolizması, çeşitli enzim sistemlerinin aktivasyonu yanı sıra normal organ fonksiyonlarının korunması dahil olmak üzere insan vücudunun çeşitli fizyolojik faaliyetlerine katılmaktadır [15]. Bahsedilen mükemmel özelliklere dayanarak, Mg ve Mg bazlı alaşımlar geniş ilgi görmekte ve özellikle ortopedik implantlar ve koroner stentler olmak üzere biyomedikal implant materyalleri olarak yaygın kullanılmaktadır [16].

Üstün özelliklerine rağmen Mg alaşımların uygulanmasında bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Şekil 2.2'de gösterilen sıkı paket hekzagonal (HSP) kafes yapısına sahip olan Mg soğuk şekillendirme gibi işlemlere elverişli değildir [17].



Şekil 2.2. Hekzagonal sıkı paket (HSP) kristal kafes yapısı [18].

Özellikle 225 °C ve altındaki sıcaklıklarda şekillendirme işlemlerinde tek kayma düzlemine sahip olması magnezyumu kırılgan hale getirmektedir. Ayrıca düşük korozyon direnci ve reaktif özelliği de kullanım alanını sınırlayan diğer önemli etkenlerdir [19].

Ayrıca Mg döküm yöntemi ile üretildikten sonra özellikle katılaşma esnasında yaklaşık %5'lik bir kalıp büzülmesine neden olmaktadır. Bu kalıp büzülmesi mikro porozite ve düşük tokluğa neden olmaktadır. Diğer yandan yüksek termal genleşme katsayısı (Al ile karşılaştırıldığında yaklaşık %10 üzerinde), Mg alaşımlarının kullanımına karşı bir dezavantaj olarak öne sürülmektedir. Bundan dolayı yüksek mekanik özellik gösteren Mg üretimi için alaşımlandırma işlemi uygulanmaktadır.

Bu kapsamda Mg içerisinde belirli oranlara mükemmel çözünürlüğe sahip olan Al, Zn ve Ca gibi elementler kullanılmaktadır [1, 6].

2.1. MAGNEZYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

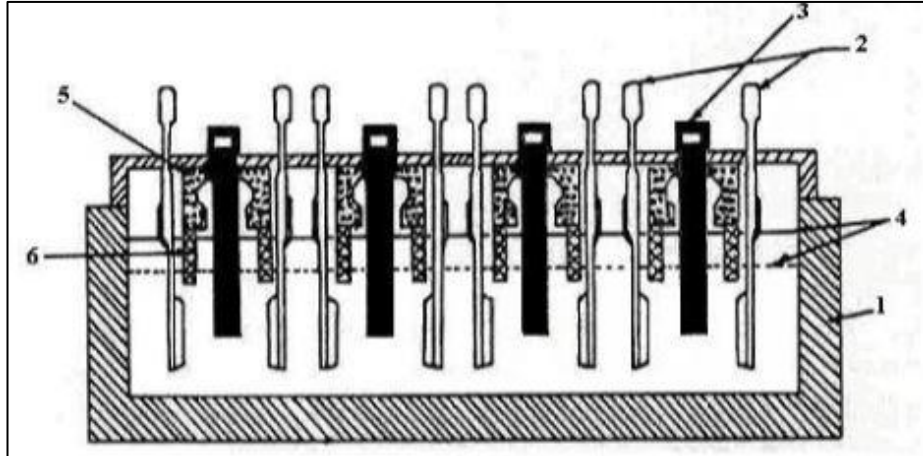
Mg elektrolitik proses ve termik proses olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmektedir. Elektrolitik proses, elektrik akımı yardımıyla kimyasal bileşiklerin sıvı içinde çözünmesidir. Bu çözünme elektron alma veya elektron verme

durumundan kaynaklanmaktadır. Termik proses ise ısı enerjisi altında gerçekleşmektedir [20, 21].

2.2. ELEKTROLİTİK PROSESLER

2.2.1. I. G Farben Hücresi

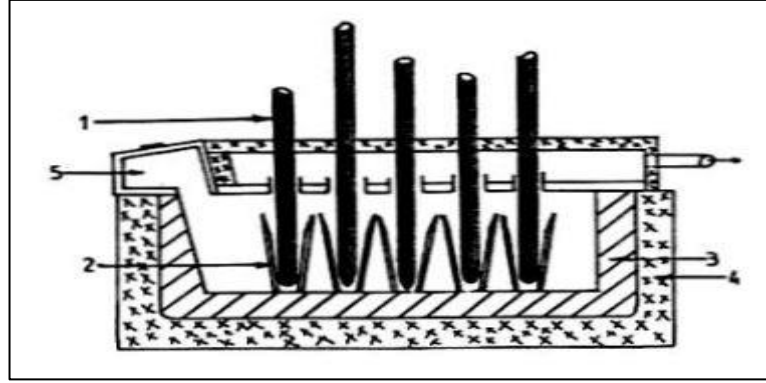
Alman bilim insanı olan I.G Farben tarafından geliştirilen bir yöntem olan Farben hücresi Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Mg üretimi elektrolit bir sıvı içerisinde yer alan ve her birinde 4 ile 5 anot bulunan bir hücrede gerçekleşmektedir. Üretim esnasında takviye bir enerjiye gerek duyulmaksızın elektrolit direncinden sağlanan enerji ile Mg elde edilmektedir. Ancak sıvı ortamdan kaynaklı yüksek korozyon sebebiyle kullanımları kısıtlı olmaktadır [22, 23].



Şekil 2.3. I. G Farben hücresi 1) Refrakter tabaka 2) Katot (çelik) 3) Anot (grafit) 4) Üst ve alt elektrolit solüsyon seviyeleri 5) Anot hazne 6) Diyafram [23].

2.2.2. Dow Hücresi

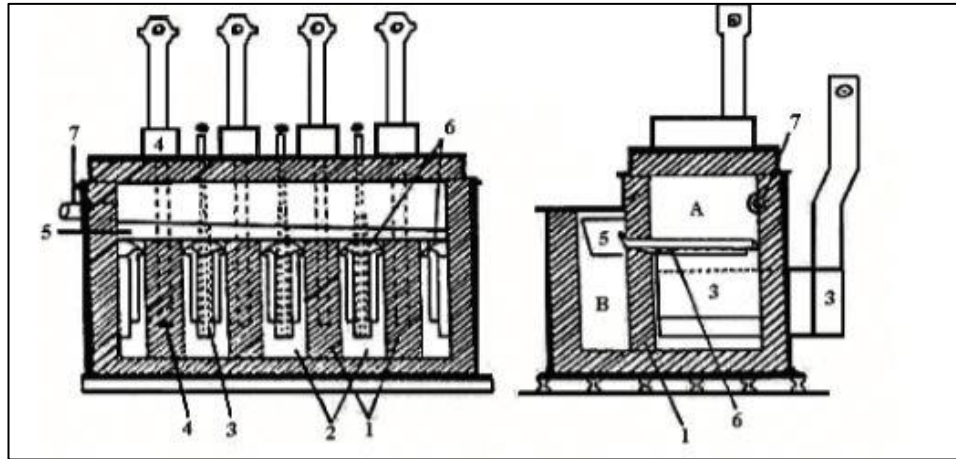
Şekil 2.4'te yer alan Dow elektroliz hücresinde dışarıdan bir gaz ile ısıtılan konik şekilli refrakter tuğlalardan oluşan çelik bir kasa içerisinde Mg üretimi gerçekleşmektedir. Farben hücresi gibi katot ve anot parçalardan oluşan hücre, yüksek enerji akımlarında çalışmaktadır. Ancak bu yüksek enerji maliyetlerinden dolayı kullanılmaları önerilmemektedir [22, 23].



Şekil 2.4. Dow hücresi 1) Silindirik anot (grafit) 2) Konik katot (çelik) 3) Çelik katman 4) Dış katman 5) Mg birikme haznesi [23].

2.2.3. Alcan Hücresi

Mg üretiminde henüz 20. yüzyıl ortalarından itibaren başta ABD ve Japonya olmak üzere birçok ülkede Şekil 2.5.'te yer alan Alcan hücresi kullanılmaya başlanmıştır. Bu elektroliz hücresi elektrolitin düşük viskozite sıcaklıkları olan yaklaşık 600-700 °C gibi sıcaklıklarda çalışmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklarda kullanılan magnezyum klorür ($MgCl_2$) iyonlarına ($Mg^{+2} - Cl^-$) parçalanarak elektroliz havuzunda biriktirilir ve döküm yöntemi ile ingot haline getirilen Mg endüstriyel olarak kullanıma hazır hale getirilmektedir [22, 23].



Şekil 2.5. Alcan elektroliz hücresi 1) Refrakter ayırıcı katmanlar 2) Elektroliz ve metal ayırma bölümleri 3) Katot (çelik) 4) Anot (grafit) 5) Mg biriktirme parçası 6) Katot çubuklar 7) Gaz çıkışı (A), elektroliz (B) ve metal ayırma bölgesi [23].

2.3. TERMİK PROSESLER

Termik proses ile magnezyum üretiminde alüminotermik, silikotermik, kalsiyum karpit ve karbotermik gibi farklı üretim yöntemleri kullanılmaktadır [22].

2.3.1. Silikotermik Prosesi

Genellikle oksit içeren hammaddeler kullanılarak magnezyumun üretildiği bir yöntemdir. Yaklaşık 1200 °C sıcaklıklarda magnezyum oksidin (MgO) 2.1' de yer alan tepkime gibi indirgenmesiyle elde edilmektedir.



Yüksek sıcaklıklarda indirgenme reaksiyonu gerçekleştiği için magnezyum gaz fazında bulunmaktadır. Bu sebeple indirgeyici olarak silisyum kullanılır ve indirgenme reaksiyonu gerçekleşmektedir [24]. Ancak bu yöntem oldukça verimsiz olduğu için pek tercih edilmemektedir. Çünkü reaksiyon sonucu magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO₂) tepkimeye girerek bileşik yapmakta ve indirgenme reaksiyonu durma noktasına gelebilmektedir [23].

2.3.2. Alüminotermik Prosesi

Alüminotermik prosesi diğer proseslere göre her ne kadar maliyetli olsa da yer yüzünde bol miktarda alüminyum olduğu için Mg üretiminde en önemli redükleyici madde olarak kullanılmaktadır [25]. Bu proseste alüminyum ve bir diğer metal olan demir modifiye edilerek kullanılmaktadır. Bu modifiye metaller ilk olarak elektrik fırınında üretilir ve daha sonra ikinci bir elektrik fırınında ise dolomit üretimi için redükleyici görevi üstlenirler. İkinci fırında gerekli sıcaklıkta alümina cürufu oluşturmak için magnezyum buharı oluşturulur. Oluşan bu reaksiyonda MgAl₂O₄ ve CaO₇Al₂O₃ bileşikleri elde edilir. Daha sonraki saflaştırma işleminde ise Mg üretimi gerçekleştirilir [22].

2.3.3. Kalsiyum Karpit Prosesi

Mg üretiminde kullanılan kalsiyum karpit prosesinde ise magnezyum klorür ($MgCl_2$), magnezyum oksit (MgO) ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) bileşikleri kullanılmaktadır. Yaklaşık $1200^{\circ}C$ - $1600^{\circ}C$ sıcaklıklara çıkıldığından bu bileşikler yüksek ergimeden kaynaklı metalik magnezyuma redüklenmektedirler [26]. Bu redüklenme reaksiyonu sonucunda özellikle kalsiyum oksit (CaO) ve karbon (C) katı olarak reaksiyondan çıkarken, magnezyum gaz fazında bir ürün olarak elde edilir [23].

2.3.4. Karbotermik Prosesi

Mg üretiminde kullanılan bir diğer yöntem olan karbotermik prosesinde ise kok kömürünün doğrudan magnezyum oksit (MgO) ile silikayı (SiO_2) termodinamik olarak reaksiyona sokarak magnezyum gazını elde etme prensibine dayanmaktadır. Ancak kömür maliyeti açısından ekonomik olmayan bu yöntem pek tercih edilmemektedir [23, 27].

2.4. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

Magnezyum $1,74 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip olarak mühendislik metalleri arasında en hafif metal olarak kabul edilmektedir. Alüminyumdan %35 ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ve çelikten ($7,86 \text{ g/cm}^3$) dört kat daha hafif olması en önemli tercih sebebi olmaktadır. Ancak saf halde istenilen mekaniksel performansı gösteremediğinden dolayı genellikle alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri iyileştirmek için kullanılan alaşımlar yapı içerisinde çökelme sertleşmesi veya katı çözeltili sertleşmesi oluşturarak saf Mg göre üstün mekanik özellikler kazandırmaktadırlar. Bu yöntemlerden katı çözeltili sertleşmesi atomik oranındaki farklılıklar ile belirlenirken çökelme sertleşmesinin amacı ise esas olarak düşük sıcaklıkta çözünürlük ve intermetalik fazların magnezyum içeriği içerisindeki homojen dağılımını sağlamasıdır. Oluşan intermetalik fazlar (Mg, Al) $_2Ca$, Al_2Ca ile Mg alaşımlarında mukavemet değerlerinin artması beklenmektedir. Bundan dolayı Mg genellikle Al, Zn, Ca, metaller ile alaşımlandırılmaktadır [1, 28, 29]. Mg alaşımları ASTM

(American Society for Testing and Materials) B275-94 standardına göre kodlanarak isimlendirilmektedir. İlk iki harf magnezyum alaşımında en çok bulunan iki alaşım elementini ifade etmektedir. Yaygın olarak kullanılan magnezyum alaşım sistemlerinden biri ise Mg-Al-Zn üçlü alaşım sistemidir. Şekil 2.6'da Mg en çok alaşımlandırıldığı AZ serisinin örnek gösterimi verilmektedir.

AZ31

Alaşımdaki Al elementi	Alaşımdaki Zn elementi	Alaşımdaki %3 Al elementi oranı	Alaşımdaki %1 Zn elementi oranı
---------------------------	---------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

Şekil 2.6. AZ serisi Mg alaşımı örnek gösterimi [30].

Ayrıca Mg-Al-Zn-Mn, Mg-Mn, Mg-Al-Mn, Mg-Zr, Mg-Zn-Zr, Mg-RE-Zr, Mg-Ag-RE-Zr, Mg-Y-RE-Zr en önemli diğer magnezyum alaşım sistemleridir [31]. Magnezyum alaşımları harf kodları ile isimlendirilmektedir. Çizelge 2.3'te Mg ile alaşımlandırılan metallerin ASTM standardına göre belirlenmiş harf kodları gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. Mg alaşımındaki elementleri gösteren harf kodları [1].

Harf	Alaşım Elementi	Harf	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir Toprak M.	S	Silisyum
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	W	İtriyum
J	Stronsiyum	Y	Antimon
K	Zirkonyum	Z	Çinko
L	Lityum	X	Kalsiyum
M	Mangan		

2.4.1. Magnezyum Alaşımlarının Standart Gösterimi

Mg alaşımları uluslararası sistemde iki harf ve iki veya  haneli rakamlar ile gösterilmektedir. Harfler alaşım elementini ve rakamlar da alaşıma eklenen elementlerin yüzdeliklerini ifade etmektedir. Çizelge 2.4'te yaygın olarak kullanılan magnezyum alaşımlarının standart gösterimleri verilmektedir.

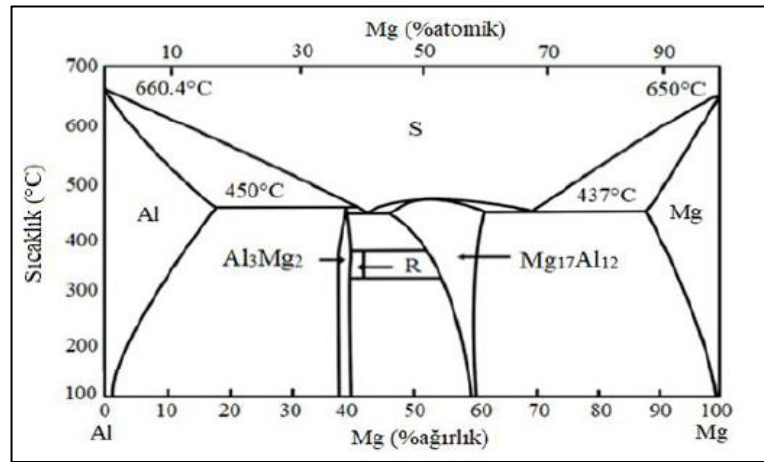
Çizelge 2.4. Mg alaşımlarının standart gösterimleri [32, 33].

Seriler	Alaşım Elementleri	rnek Alaşım
ZT	Magnezyum, inko ve toryum	ZT32
ZK	Magnezyum, inko ve zirkonyum	ZK11
AE	Magnezyum, alüminyum ve nadir toprak	AE42
AJ	Magnezyum, alüminyum ve stronsiyum	AJ52
AM	Magnezyum, alüminyum ve mangan	AM60B
EZ	Magnezyum, nadir toprak ve inko	EZ33A
HM	Magnezyum, toryum ve mangan	HM21A
HZ	Magnezyum, toryum ve zirkonyum	HZ32A
ZC	Magnezyum, inko ve bakır	ZC71
WE	Magnezyum, itriyum ve nadir toprak	WE43
QH	Magnezyum, gümüş ve toryum	QH21
QE	Magnezyum, gümüş ve nadir toprak	WE22A
AZ	Magnezyum, alüminyum ve inko	AZ91D
EQ	Magnezyum, nadir toprak ve gümüş	EQ21

2.4.2. Yaygın Kullanılan Alaşım Elementleri

Alüminyum: Magnezyum ile yaygın olarak kullanılan bir element olarak Mg-Al ikili faz diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Magnezyum ile alaşımlandırılan Al, yapıda önemli oranda tane inceltme etkisi göstererek oluşan alaşımın saf magnezyuma göre daha ince taneli olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda oluşan

Al_2Ca ve Mg_2Ca intermetalik bileşikler ile alaşımanın mukavemet değerleri ve sertlik değerleri de artmaktadır [34]. Alüminyum (Al) 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda Mg alaşımlarının çekme mukavemetini, sünekliliğini ve dökülebilirliğini iyileştirir ve alaşımdaki artan Al miktarı (ağırlıkça %9'a kadar) nedeniyle oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik bileşik mikro sertlik değerini artırmaktadır [35]. Al içeriği ağırlıkça %2'yi aştığında, tane sınırları boyunca α -Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ içeren ötektik bir mikro yapı oluşur. $Mg_{17}Al_{12}$ fazı, korozyon için bir bariyer etkisi oluşturduğundan korozyon hızını azaltmaktadır [36, 37]. Bununla birlikte, $Mg_{17}Al_{12}$ fazı, 120 °C'nin üzerinde mikro yapısal kararsızlığa yol açan, nispeten düşük bir erime sıcaklığına (~437 °C) sahiptir. Tane sınırı kayması ile açıklanabilen bu olay nedeniyle Mg-Al alaşımlarının mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda olumsuz etkilenmektedir [38].

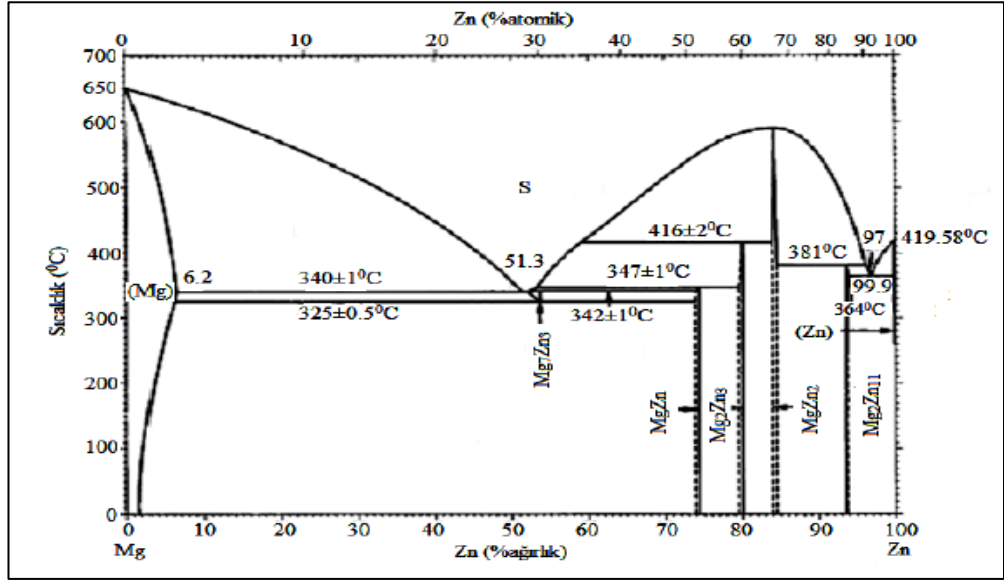


Şekil 2.7. Mg-Al ikili faz diyagramı [37].

L.Zhang ve ark. tarafından Mg-Al alaşımına Al elementi ilavesi edilerek döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Mg-Al alaşımlarının mikro yapıları, α -Mg katı çözültisi, β - $Mg_{17}Al_{12}$ ve ötektik karışımlar (α -Mg + β - $Mg_{17}Al_{12}$) incelenmiştir. Elde edilen önemli iki sonuç şu şekilde açıklanmıştır. İlk olarak α -Mg'de çözünen Al, katı eriyik sertleştirme yapmıştır. Bir diğerinde ise β - $Mg_{17}Al_{12}$, mikro sertliği yaklaşık 280 (HV) olan sert ve kırılabilir bir faz oluşmuştur. $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin hacmi ve morfolojisinden dolayı Mg-Al alaşımlarının mekanik özellikleri olumsuz etkilenmiştir [39]. Chaoyue Zhao ve ark. ekstrüde edilmiş Mg-xAl (x: 1, 2, 3 ve 4 ağırlık%) alaşımında farklı oranlardaki alüminyumun mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. En iyi özellik gösteren Mg-3Al alaşımının tane boyutlarının 16,9

μm 'den $10,7 \mu\text{m}$ 'ye kadar düştüğü ve dolayısıyla saf magnezyuma göre daha ince taneli ve mukavemetli bir yapının meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmadan Mg-Al alaşımlarında alüminyum ilavesinin daha ince taneli yapılar oluşturması ve yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği anlaşılmaktadır [40].

Cinko: Şekil 2.8'de Mg-Zn ikili faz diyagramı verilmektedir. Zn ilavesi ile Al gibi dökülebilirlik ve mukavemet değerlerinin artmasına etki etmektedir. Katı eriyik sertleştirilmesi yoluyla magnezyum alaşımlarının çekme özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca, Zn'nin Mg'de çözünmesi, indirgeme gücünü azaltarak oksidasyon direncini artırmaktadır [1, 41].

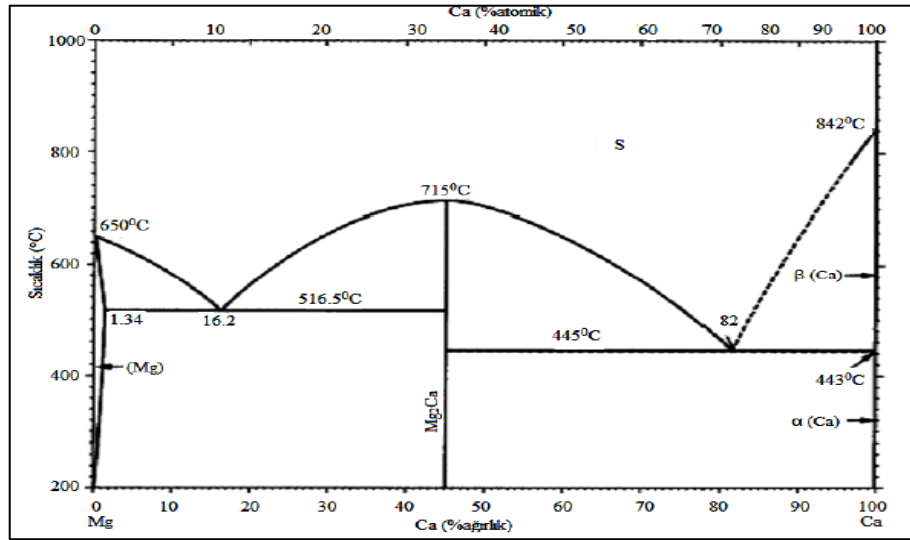


Şekil 2.8. Mg-Zn ikili faz diyagramı [37].

Yu Jingyuan ve ark. tarafından Mg ve Zn tozu kullanılarak Mg-Zn toz alaşımı üretilmiştir. Zn içeriğinin Mg-Zn alaşımlarının sinterleme yoğunluğu, mikro yapısı, faz bileşimi, eğilme özellikleri ve mikro sertliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mg-Zn alaşımlarının korozyon direnci de ayrıca ölçülmüştür. Mg-Zn alaşımlarının farklı oranlarda (%3 ve %4) Zn ilavesi ile daha ince tane boyutuna ve daha yüksek sinterlenmiş yoğunluğa sahip olduğunu göstermiştir. Mikro yapı analizinde ise ağırlıkça % Mg-3Zn alaşımı esas olarak α -Mg fazından oluştuğunu göstermiştir. Zn içeriğinin artmasıyla, Mg-Zn alaşımlarının eğilme mukavemeti önce artmış ve daha sonra azalmıştır. Ancak Mg-Zn alaşımlarının mikro sertlik daima artış göstermiştir.

Ağırlıkça Mg-3Zn alaşımının bükülme mukavemeti ve mikro sertliği sırasıyla 123,6 MPa ve 101,7 MPa olarak ölçülerek saf Mg göre yüksek mekanik özellikler sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca korozyon direnci ölçümleri sonucunda da Zn elementinin eklenmesiyle Mg-Zn alaşımlarının korozyon oranının azaldığı ve Mg-3Zn alaşımının en iyi korozyon direnci gösterdiği sonucuna varılmıştır [41, 42].

Kalsiyum: Ca elementi magnezyum alaşımlarında %1,34 oranında maksimum çözünürlüğe sahiptir [43]. Mg alaşımlarına ilave Ca ile ince taneli bir yapı ve Mg₂Ca gibi intermetalik faz oluşması nedeniyle Mg alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme özellikleri iyileştirilmektedir [44]. Magnezyum alaşımlarında yaygın kullanılan Ca elementinin magnezyum ile yaptığı ikili faz diyagramı Şekil 2.9’da verilmektedir.



Şekil 2.9. Mg-Ca ikili faz diyagramı [37].

Wang Qudong ve ark. tarafından AZ91 magnezyum alaşımına farklı oranlarda xCa (x: 0,5-1-2) ilavesi yapılarak mikroyapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Ca ilavesi ile Al₂Ca fazının oluşarak, kırılğan ve sert olan Mg₁₇Al₁₂ fazının azaltıldığı sonucuna varılmıştır. 150 °C gibi yüksek sıcaklıkta ve %1 Ca ilavesinin en iyi mukavemet özelliği ve en ince taneli mikroyapı oluşturduğu görülmüştür. Dolayısıyla Ca içeren magnezyum alaşımları yüksek rijitlik ve yüksek sürünme direnci gibi özellikler göstermektedir [45, 46].

2.5. AZ SERİSİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA Ca İLAVESİ

Endüstride, özellikle otomotiv sanayinde kullanılacak metallerin mukavemetlerinin yanında en önemli faktörlerinden biri de enerjiyi absorbe edebilme yeteneğidir. Gelen darbelere karşı gösterilecek darbe direnci, malzemenin ömrünü artırmakla beraber ekonomik kaybı da büyük oranda azaltmaktadır [47]. Bu noktada özellikle magnezyum alaşımlarının hafiflik, yüksek mukavemet ve iyi sönümlenme özelliklerinden dolayı günümüz dünyasında yapılan çalışmalarda AZ serisi magnezyum alaşımlarında %0,5 Ca ilavesi ile mükemmel sonuçlar ortaya çıkmaktadır. %0,5 Ca ilavesi ile daha ince taneli bir mikro yapı, yüksek mukavemet ve yüksek sönümlenme özelliği gösteren alaşımlar meydana gelmektedir [46, 48].

AZ serisi magnezyum alaşımları, AZX (X=Ca) alaşımlarına göre büyük taneli mikro yapıya sahip olmaktadır. Ca ilavesi ile AZ serisi magnezyum alaşımlarında ince taneli mikro yapı ve dolayısıyla yüksek mukavemet değerlerine ve sürünme direncine sahip alaşımlar elde edilmektedir [49]. Cheng Zhang ve ark. tarafından AZ31 magnezyum alaşımına farklı oranlarda (% ağırlık 0,05-0,1-0,2) Ca ilavesi ile mikro yapı analizi yapılmıştır. AZ31 alaşımına göre eklenen Ca ilavesinde %0,1 ve %0,2 oranlarında daha fazla ince taneli yapı ve aynı zamanda daldırma yöntemi ile %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon testi yapılarak yüksek korozyon direnci sonucu elde edilmiştir. %0,05 Ca ilaveli alaşımda oluşan Mg-Al-Ca fazları nedeniyle ciddi oranda galvanik korozyon meydana gelmiştir. %0,1 ve %0,2 Ca ilaveli AZ31 alaşımında oluşan Al₂Ca fazları ise korozyona karşı daha fazla direnç göstermiştir [50].

Ayrıca AZ alaşımları sertlik ve kırılabilirliğe sebep olan Mg₁₇Al₁₂ fazı sebebiyle kullanım alanı sınırlanmaktadır. Bu kırılabilir fazı minimize etmek veya yok etmek için Ca ilavesi yapılarak mikro yapı içerisinde Al₂Ca ve Mg₂Ca fazları oluşturulmaktadır. Oluşan bu fazlar sayesinde daha ince tanelere sahip bir mikro yapı ve alaşımların hem yüksek mukavemet ve sürünme direnci hem de yüksek tokluk değerleri elde edilmektedir [45]. Ca katkılı AZ serisi magnezyum alaşımları uzun yıllardır çalışılmasına ve günümüzde de çalışılmaya devam etmesine rağmen,

literatürde yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini araştıran sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Zhong-tao JIANG ve ark.[51], AZ31 magnezyum alaşımına kütle oranı %1,1 Al₂Ca bileşik takviyesi ile alaşımının ortalama tane boyutunu 354 µm 'den 198 µm'ye kadar azalan bir sonuç elde etmişlerdir. Tane inceltme mekanizması, Al₂Ca'dan çözünen ve heterojen çekirdeklenmenin etkilerine atfedilebilmektedir. Umer Masood Chaudry ve ark. Tarafından [52] ağırlıkça %0,5 Ca (AZ31-0,5Ca) içeren yeni geliştirilmiş AZ31 Mg alaşımında süper plastik özellik araştırılmıştır. Ca ilavesinin 300 °C'de alaşımın süper plastikliğini arttırdığını göstermektedir. Artan süper plastik davranış, temel olarak tane sınırlarında bulunan ince ikinci faz parçacıklarının neden olduğu mikroyapı stabilitesine ve dolayısıyla tane sınırlarının kaymasının aktivasyonuna dayalı olarak açıklanabilmektedir. Diğer bir çalışmada ise Villegas-Armenta ve ark. [53] lineer sürtünme kaynağının döküm AZ91 ve AZ91+2 ağırlıkça %2 Ca alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. AZ91/AZ91 ve AZ91+ ağ. %2 Ca / AZ91+ ağ. %2 Ca bağlantılarında kaynak bölgesinin daha yüksek mukavemete, ince tane boyutuna, ince ikinci faz yapısına ve güçlü bazal dokuya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

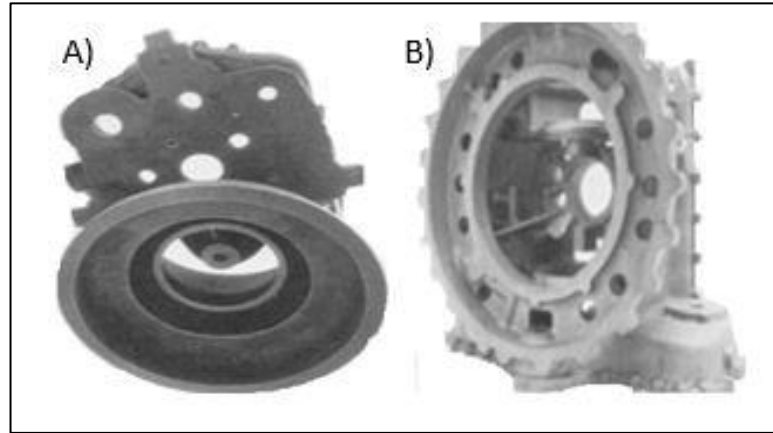
2.6. MAGNEZYUM DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Yüksek sıcaklıklara çıkılarak ergitilen metallerin istenen şekli alabilmesi için belirlenen kalıplarda soğutulmasına döküm işlemi denilmektedir. Belirli bir döküm parça kalitesi için yöntemin seçimi, önerilen tasarımın konfigürasyonu, uygulama alanı, gereken toplam döküm sayısı ve alaşımın özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır [54].

Mg döküm alaşımları başta savunma-havacılık, bilgisayar bileşenleri, kamera gövdeleri, taşınabilir alet ve ekipmanlar gibi hafiflik ve rijitliklerinin büyük bir avantaj sağladığı birçok ticari uygulamada kullanım alanı bulmaktadır [55, 56]. Mg ve alaşımları genel olarak kum kalıba döküm, yüksek basınçlı döküm ve kokil kalıba döküm yöntemleri ile üretilebilmektedir [57].

2.6.1. Kum Kalıba Döküm

Kum kalıplama yönteminde kalıpların mukavemet kazanabilmesi için ilk önce 150°C -350 °C sıcaklıkta ısıtılmaktadır. Daha sonra ergimiş metal kalıbın içine dökülmekte ve kum içinde hava hapsolmektedir. Bu sıkışmış hava üretilen döküm parçanın içinde boşluklar oluşturabilir ve akabinde döküm hatası meydana gelebilmektedir. Bu boşluklar sebebiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir [58]. Bu sorunu çözmek amacıyla özellikle kalıcı metal kalıplarında sıkışan havayı dışarı atmak için özel havalandırma delikleri açılmaktadır. Mg alaşımlı kum kalıba döküm, alüminyum ve diğer malzemelere göre belirgin bir ağırlık avantajı sundukları için özellikle havacılık uygulamalarında kullanılır. Düşük maliyeti ve farklı büyüklükteki parçalara uygulanabilir olduğundan dolayı en çok tercih edilen döküm yöntemlerinden biri olmaktadır. Şekil 2.10'da kum kalıba döküm yöntemi ile üretilen farklı alaşımlara sahip magnezyum esaslı uçak parçaları verilmektedir [57, 59].

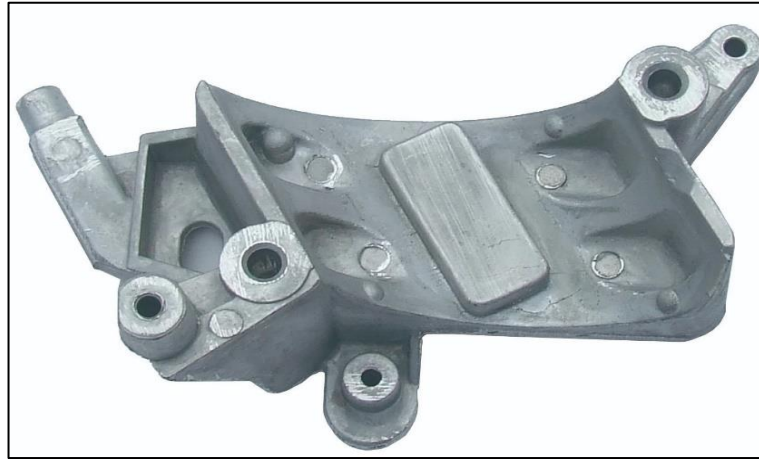


Şekil 2.10. A) Askeri/ticari helikopter için T5 temperli ZE41A Mg alaşımında kuma dökülen ana şanzıman muhafazası B) Askeri/ticari helikopter için T5 temperli QE22A Mg alaşımında kuma dökülen ana şanzıman parçası [57].

2.6.2. Yüksek Basıncılı Döküm

Şekil 2.11'de verilen magnezyum alaşımlı döküm braketleri gibi kompleks şekillerde ve boyutlarda yüksek miktarda bir döküm sağladığı için kullanımı oranı artmaktadır.

Yüksek basınç sayesinde ergimiş alaşım ve kalıp arasında iyi bir temas sağlanır ve hızlı soğutma, kalıp-erişik ara yüzeyinde ısı akışı ve ısı transferinde artış olmaktadır. Döküldüğü kalıbın şeklini alarak istenen parça elde edilmektedir. Döküm sonunda hemen hemen kusursuz bir parça meydana gelmektedir. Döküm parça ağırlıkları birkaç gramdan yaklaşık 15 kg'a kadar değişen ve karmaşık dökümlerin seri üretiminde oldukça ekonomik olmaktadır [60, 61]. Mükemmel bir döküm ile sonuçlandırıldığından dolayı döküm sonrası talaşlı işlemeye maruz kalmamaktadır. Genellikle demir dışı metallerde kullanılıp özellikle Mg ve Al alaşımlarında otomotiv ön uç veya gösterge panellerinde kullanılmaktadır. Her ne kadar ince boyutlu ve karmaşık şekillerin üretiminde etkili olsa da küçük parçaların üretimi, yüksek sıcaklıkta bazı malzemelerin erimesi ve yüksek maliyeti açısından da bir dezavantaj oluşturmaktadır [57].

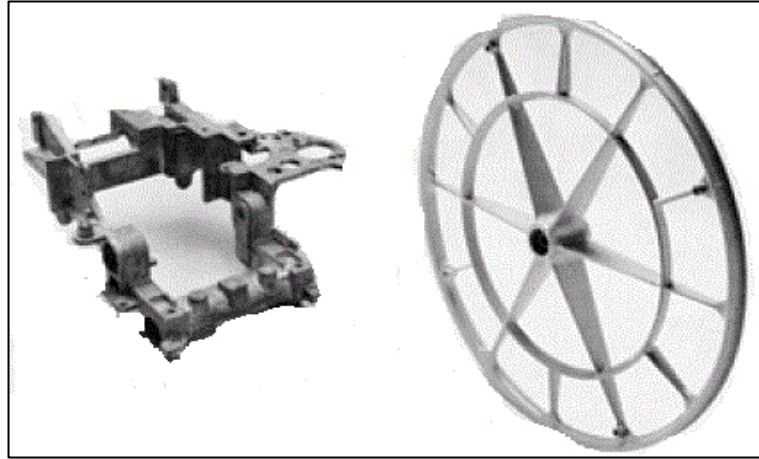


Şekil 2.11. Mg esaslı döküm braket [61].

2.6.3. Kokil Kalıp Döküm

Ergimiş metalin bir kokil kalıba döküldüğü ve katılaştıktan sonra çıkarıldığı döküm işlemidir. Kokil kalıp ile döküm yapılırken ilk önce ham metal eritilir ve döküm başlamadan önce kokil kalıp ısıtılır. Kalıbın ısıtılmasıyla ergimiş sıvı metal akışkanlığını kaybetmeden kalıbın şeklini almaktadır. Daha sonra kalıp soğutulularak kalıbın şeklini almış katı metal döküm parçası alınmaktadır. Kokil kalıp döküm yöntemi çoğunlukla pistonlar, biyel kolları, dişliler, silindir kapakları ve diğer bileşenler gibi motor bileşenlerinin üretimi için kullanılmaktadır. Demir dışı olarak

Mg, Al, bakır gibi metal ve alaşımlarında kullanılmaktadır [62]. Ancak yüksek sıcaklık, kalıp sıcaklığı ve bekletme süresi gibi döküm parametreleri genellikle döküm parçada homojen özellikler, gözeneklilik ve ayrışma sorunlarına neden olabilmektedir. Döküm sürecini optimize etmek, yönlü katılaşmayı teşvik etmek ve hatasız homojen yapı sağlamak için kalıp sıcaklıkları ve tutma süreleri dahil olmak üzere döküm parametrelerinin kontrolü önem arz etmektedir [63]. Bu yöntem ile yüksek hızlarda üretim yapılarak karmaşık şekilli parçaların üretim gerçekleştirilmektedir. Elde edilen parçaların yüzey kalitesinin yüksek ve kokil kalıbın tekrarlı kullanımı gibi üstün özelliklerinin olması sebebiyle ekonomik olarak avantaj sağlamaktadır [57, 61]. Şekil 2.12’de AZ91 Mg alaşımından elde edilen döküm parçalar verilmektedir.



Şekil 2.12. Kokil kalıp döküm yöntemi ile üretilen AZ91 Mg alaşımı [57].

2.7. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA

Uzun yıllardan beri birçok uzman araştırmacı ve endüstriyel kitle tarafından potansiyel yüzey mühendisliği uygulamaları için tribolojik özellikleri optimize etmek ve geliştirmekle ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir. Aşınma (tribolojik süreç), iki yüzey temas ettiğinde ve her ikisi/biri birbirine göre malzeme kaybına sebep olmakla meydana gelmektedir [64]. Aşınma/sürtünmede yaklaşık %15-20 azalmanın bile çevresel faydalarla ilgili ekonomik maliyetleri önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koymaktadır [65]. Aşınma türleri adezif, abrasif (çizik), korozif, yorulma (pitting) ve erozyon olarak sınıflandırılmaktadır.

2.7.1. Adezif (Kopma) Aşınma

Birbiri ile temas halinde bulunan iki malzemenin sürtünme esnasındaki plastik deformasyonu sonucunda meydana gelen malzeme kaybıdır. Sürtünen yüzeyler üzerinden malzemeler birbirine mikro bazda kaynaşmaktadırlar [66]. İki cisim arasında devam eden bu sürtünme hareketi sebebiyle kaynaşmadan kaynaklı oluşan bağlar kopmaktadır. Bu kopma sonucunda yumuşak olan malzeme yüzeyinde boşluklar oluşmakta ve diğer cismin yüzeyinde ise çıkıntılar meydana gelmektedir [67].

2.7.2. Abrasif (Çizik) Aşınma

Bir malzemenin kendisinden daha sert bir malzeme ile basınç altında malzeme kaybına uğraması ile tanımlanmaktadır. Laboratuvarlarda numunelerin zımparalama işlemi en bilindik örneklerden biri olmaktadır. Abrasif aşınmanın etkisini azaltmak için özellikle aktif çalışan makine parçalarının yüzeylerinin sürekli temiz tutulması gerekmektedir [67]. Aksi halde makine parçaları üzerindeki bazı yapışan ve sertleşmiş tortullar çalışma esnasında aşınmaya sebep olmaktadır. Yumuşak malzemelerin ısıl işlem veya kaplama yapılarak sertleştirilmesi ile abrasif aşınma oranı azaltılabilmektedir [68].

2.7.3. Yorulma (Pitting) Aşınması

Temas halindeki yüzeylerin içinde veya altında aşınma parçacıklarının delaminasyonuna yol açabilecek çatlakların oluşması ve büyümesidir [69]. Bu aşınma türü çatlakların çekirdeklenmesine yol açan tekrarlanan kayma döngüleri altında mikro yapısal kusurların döngüsel birikimine dayanmaktadır [70].

2.7.4. Korozyon Aşınma

Oksidasyon veya kimyasal aşınma olarak da bilinen korozyon aşınma, yüzey ve çevre arasındaki kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Çalışma koşullarında özellikle kömür madenciliği, petrol, kimyasal ve elektrik endüstrileri vb.

ekipmanlarında yaygın olarak bulunmaktadır [71]. Koroziif tabaka, kayma veya aşınma yoluyla yok edildiğinde veya kaldırıldığında, başka bir tabaka oluşmaya başlamakta ve koroziif tabaka oluşumu süreci tekrarlanmaktadır. Aşındırıcı olarak su, asitli-kimyasal içerikli solüsyonlar ve atmosferik hidrojen sülfür içeren ortamlar örnek olarak verilebilir. Korozyon ve aşınmanın neden olduğu malzeme kaybı neticesinde büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir [72].

2.7.5. Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, katı parçacıkların tekrarlanan etkileri nedeniyle malzemenin hedef yüzeyden aşamalı olarak çıkarılması işlemidir. Katı-sıvı karışımının akışında asılı kalan parçacıklar, sulu geçişleri aşındırarak taşıma sistemi için kullanılan ekipmanın hizmet ömrünü kısaltmaktadır [73]. Eroziif aşınma oranı genel olarak parçacık şekli, çarpma hızı-açısı ve setliğe bağlı olarak değişmektedir. Özellikle pompalarda, çarklarda, fanlarda, buhar hatlarında, nozüllerde, boru ve borulardaki keskin kıvrımların iç kısımlarında erozyon aşınması oldukça yaygındır [74].

Ayrıca keskin eğriler veya kıvrımlar, yumuşak eğrilerden daha fazla erozyon üretme eğilimindedir. Akış koşullarını değiştirmek için atılabilecek bazı özel adımlar arasında sıvı hızını azaltmak, hatalı hizalamalarda türbülansı ortadan kaldırmak ve keskin virajlardan kaçınmak gibi önemli etkenler yer almaktadır [75].

2.8. MAGNEZYUM ALAŞIMININ KULLANIM ALANLARI

Mg alaşımları uçak bileşenlerinden kara araçlarına ve elektronik cihazlardan tıbbi araç ve gereçlere kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlardaki yakıt maliyetleri ve lojistik yüklerden dolayı platform işlevselliğinde bir kayıp olmaksızın tüm silah platformları (kara, deniz ve hava) için hafif ağırlık stratejileri geliştirme ve uygulama ihtiyacının giderek daha fazla kabul görmesi sağlanmaktadır [76]. Hafif metallerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli iyileştirmeler potansiyeli, ultra hafif metal yapıların ve bileşenlerin tasarımını yönlendirecek, böylece büyük lojistik yükleri azaltacak, operasyonel kısıtlamaları ve yükümlülükleri en aza indirecek ve güvenlik açıklarını azaltacağı öngörülmektedir. Mg alaşımlarının

entegrasyonu ile ilgili bilimsel engeller ve bu sorunları ele almak için geliştirilmekte olan çözümlere odaklanarak geçmiş, şimdiki ve gelecekteki Mg alaşım uygulamalarının önemi giderek artmaktadır [9, 77].

2.8.1. Uzay ve Havacılık Uygulamaları

Uzay ve havacılık sektöründe, düşük yakıt kullanımı ve dolayısıyla düşük oranlarda atmosfere CO₂ salınımı nedeniyle hafif metallerin kullanımı önemli rol oynamaktadır. Hafif metallerin kullanımı ile ekonomik olarak maliyetin azalması ayrıca önem arz etmektedir [78]. Dolayısıyla çelik gibi yoğunluğu (7,874 g/cm³) yüksek malzemeler yerine daha hafif olan magnezyum (1,738 g/cm³) veya alüminyum (2,70 g/cm³) gibi hafif metallere yönelim artmaktadır. Ancak endüstriyel alanda alüminyumun kolay oksitlenme ve düşük mukavemet göstermesi gibi karakteristik özelliklerinden dolayı Mg esaslı alaşımlara olan ilgi özellikle darbe sönümlenme özelliklerinden dolayı artmaktadır [77].

Boeing, Airbus ve Concorde gibi hava taşıtlarında Mg ve alaşımları kullanılmaktadır. Bu taşıtlarda yaygın olarak motor ve vites kutularında kullanılan Mg alaşımları yüksek oranda ağırlık kazanımı ve düşük yakıt sarfiyatı sağlamaktadır [79]. West Land şirketi tarafından Şekil 2.13'de gösterilmekte olan Sikorsky S-56 askeri hava aracı 115 kg Mg kullanılarak üretilmiştir [80].

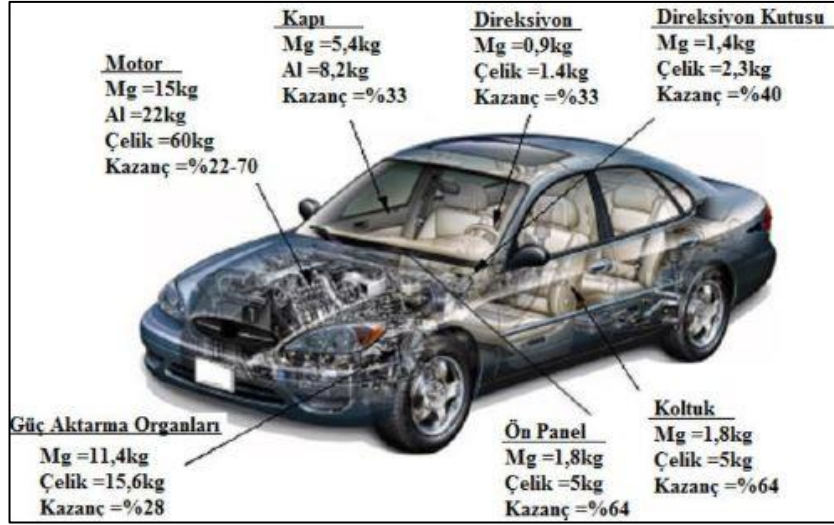


Şekil 2.13. Mg esaslı Sikorsky S-56 askeri hava aracı [80].

2.8.2. Otomotiv Uygulamaları

Motor, şanzıman, hibrit ve termal yönetim teknolojilerinin tümü kayıpları azaltmak ve güç aktarma sisteminin verimliliğini artırmak için tasarlanmaktadır. Böylelikle ağırlık azaltma ile araca binen yük azaltılmaktadır. Azalan yük ile güç sistemin verimliliğinden bağımsız olarak aracı hareket ettirmek için gerekli enerji miktarı da azalır ve kütleye bölünen kuvvetin bir fonksiyonu olan ivmeyi artırmaktadır [81]. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik gibi ağır metallerin meydana getirdiği enerji kaybı ve zararlı gazlara karşı Mg ve alaşımları düşük yoğunluklarından dolayı alternatif bir metal olmaktadır [82]. Hafif olması sebebiyle enerji tasarrufu ve çevreyi diğer metallere göre daha az kirletme gibi ana sebepler nedeniyle kullanımı artmaktadır. Bu gibi önemli etkenlerle birlikte yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin düşürülerek araçların performansını en iyi duruma getirmek, küresel çapta CO₂ salınımını da minimize etmekte önemli rol oynamaktadır [83]. Şekil 2.14'te verilen motor, direksiyon, kapı, ön panel, koltuk ve güç aktarma gibi otomobilin en önemli parçaların bir kısmı AZ91 Mg alaşımından imal edilmiştir. Çelik ve alüminyum ile kullanıldığı parçalarda ağırlığın azalmasını sağlayarak önemli oranda yakıt tasarrufu sağladığı açıkça gösterilmektedir [84].

Motor blokları ve şanzıman gövdeleri için daha yüksek sıcaklıklara dayanacak Mg alaşımları geliştirilmektedir [85]. Mercedes Benz, Honda ve BMW gibi şirketler transmisyon kutusu, silindir bloğu ve karter gibi güç aktarma parçaların üretiminde Mg alaşımlarını tercih etmektedirler. BMW, kompozit bir Mg -Al alaşımı olan R6 motorunu üretmiştir. Mg alaşımının seçilmesinin en temel nedeni gelişmiş motor konseptinde ağırlığın azalmasıdır. BMW'nin hedefi, yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını düşürmeye devam ederken daha yüksek güç çıkışı ve daha yüksek tork kapasitesine sahip bir motor elde etmektir. 1990'dan 2007'ye kadar BMW model arabalarının yakıt tüketimi %30 oranında azalmıştır [86, 87].



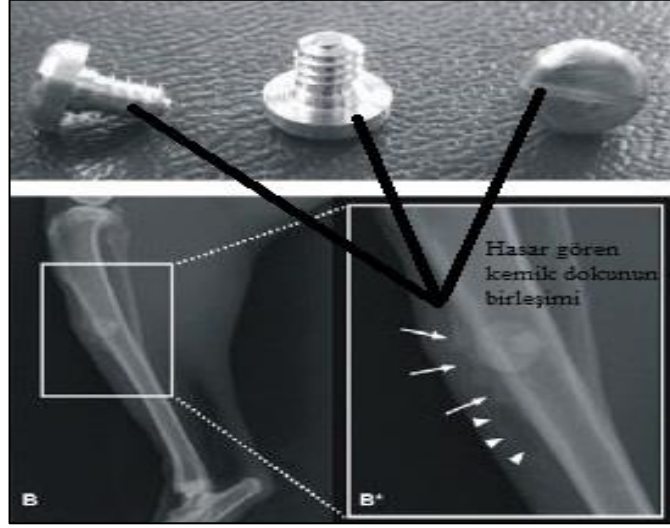
Şekil 2.14. AZ91 Mg alaşımı kullanılarak üretilen otomobil parçalar [11].

2.8.3. Biyomedikal Uygulamalar

Biyomedikal uygulamalarda kullanılacak metalik malzemeler yüksek biyouyumluluk, biyodegradasyon ve düşük toksisite özellikler göstermesi ve ikinci bir cerrahi müdahalenin olmaması açısından büyük önem taşımaktadır [88]. Ayrıca biyomalzemelerin hasar görmüş bir dokunun iyileşmesi sürecinde bir mekanik destek olarak davranması ve kademeli olarak bozunması bakımından iyileşmiş bir doku oluşumu da beklenmektedir [89]. Mg alaşımları endüstriyel uygulamalarla birlikte biyomedikal uygulamalarda da sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 2.1' da Mg esaslı implant malzemesi olarak kullanılan vida örnek olarak gösterilmektedir. Mg ve alaşımları üstün biyouyumluluk özellikleri ve kortikal kemik yapısına benzer elastisite modülüne (40-45 GPa) sahip olması ve ayrıca cerrahi operasyon sonrası degradasyon özelliklerinden dolayı implant malzemesi olarak oldukça dikkat çekmektedir [14, 90]. Ayrıca Mg insan vücudunda en çok bulunan dördüncü element olması ve toksik etki göstermemesi diğer önemli avantajlarıdır. Mükemmel biyouyumlulukları ve biyolojik olarak parçalana-bilirlikleri nedeniyle ayrıca ortopedik implantlarda yaygın kullanılmaktadır [91].

Magnezyum esaslı biyomalzemeler yüksek kırılma tokluğu nedeniyle seramik ve polimer esaslı diğer biyomalzemelere göre yük taşıma uygulamaları için daha elverişli olmaktadır[92]. Ancak bazı fizyolojik ortamlarda korozyon dayanımı

yetersiz olmaktadır. Bu amaçla Zn, Al ve nadir toprak metalleri (RE) ile alaşımlandırılarak korozyon direnci yüksek magnezyum esaslı biyo malzemeler üretilmektedir [93, 94].



Şekil 2.15. . İmplant malzemesi olarak kullanılan Mg esaslı vida [95].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. DÖKÜM YÖNTEMİ

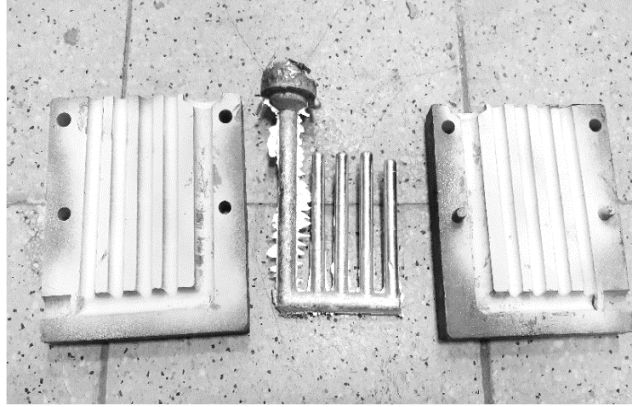
Şekil 3.1’de gösterilen atmosfer kontrollü elektrik direnç fırınında ağırlıkça %99,95 saflıkta Mg metali, AZ63 Mg hurdası ve Mg – ağı. %25 Ca mastır alaşımı kullanılarak döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Atmosfer kontrollü döküm fırını.

Alaşım oranları belirledikten sonra atmosfer kontrollü elektrik rezistans fırınında 800 °C’de 45 dk’lık süreyle ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırın, üst kısımda ergitme ve alt kısımda kalıp ısıtma olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler bir kanal vasıtasıyla birbirine bağlanır ve üst haznede eriyen metal, açık atmosfere maruz kalmadan alt haznedeki kalıbı doldurmaktadır. Ayrıca bu iki bölüm

iki farklı gaz girişine sahiptir. Ergitme sırasında üst hazneye saf argon gazı verilirken, alt kısma dökümden hemen önce $\text{CO}_2 + \%0,8$ hacimce SF_6 gaz karışımı verilmektedir. Döküm hatalarını en aza indirmek amacıyla sıvı alaşım 400°C 'ye ısıtılan kalıba dökülerek döküm işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.2'de ergitilen alaşımın dökümden sonraki kalıptan çıkarılmış görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.2. Dökümden sonra kalıptan çıkarılmış AZ-XCa Mg alaşımı.

3.2. ISIL İŞLEM

Homojen bir mikro yapı elde etmek için Şekil 3.3'te yer alan Protherm ısıtım fırınında ani ısıtmaya bağlı ön gerilmeleri önlemek için $5^\circ\text{C}/\text{dk}$. hızı ile 400°C ısıtım işlem sıcaklığına çıkılmıştır. Numunelere bu sıcaklıkta homojenleştirme ısıtım işlemi yapıldıktan sonra oda sıcaklığında su verme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.3. Protherm ısıtım cihazı.

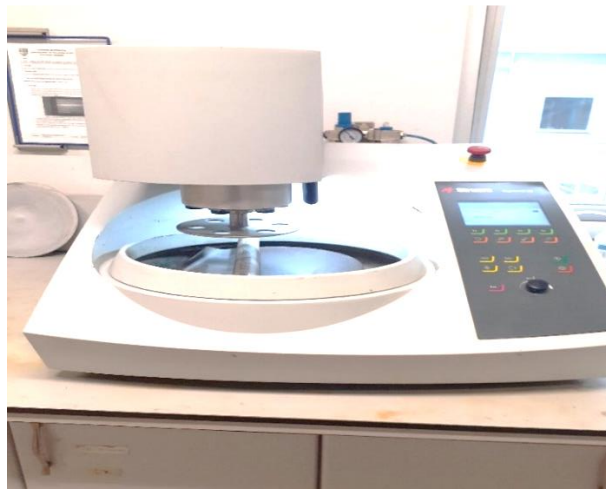
3.3. METALOGRAFİK İNCELEMELER

Homojenleştirme ısıl işlemleri tamamlandıktan sonra mikro yapı, SEM, XRD analizi, sertlik ve aşınma gibi mekanik testler için metalografik yöntemlerle numuneler hazırlanmıştır. Mikro yapı analiz numuneleri için öncelikle Şekil 3.4'te görüldüğü üzere 180°C sıcaklıkta ve 5 dk. süresince sıcak bakalite alma işlemi Struers Cito Press-10 cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Zımparalama ve parlatma için bakalite alınmış numuneler.

Bakalite alma işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.5'te yer alan ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500'lük zımparalarla 2'şer dk. arayla yüzey Struers Tegramin-30 cihazıyla parlatmaya hazır hale getirilmiştir. Numuneler 1µm'lük alümina pasta ile parlatılmıştır. Parlatmadan hemen sonra dağlanmak üzere numuneler alkol ile temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 3.5. Zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatma işlemi bittikten sonra genel mikro yapıları ortaya çıkarmak amacıyla Nital ve Asidik Pikral dağılayıcıları kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de Nital ve Pikral asit kompozisyonları verilmektedir.

Çizelge 3.1. Nital ve asidik pikral’in kimyasal bileşimi [11].

Dağılayıcı	Kimyasal Bileşim
1-0,5% Nital	99-99,5 ml Etanol (%99,8), 1-0,5 ml yoğunlaştırılmış nitrik asit
Asidik Pikral	4,2 g Pikrik asit, 10 ml saf H ₂ O, 10 ml asetik asit ve 70 ml etanol (%99,8)

3.4. XRF ANALİZİ

Alaşımın kimyasal kompozisyonlarının belirlenebilmesi amacıyla Şekil 3.6’da gösterilmekte olan 4 Kw X-Ray Rh Tube Dalga Boyu Dağılımlı Spektroskopi cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Kimyasal kompozisyonların belirlendiği XRF cihazı.

3.5. SEM ANALİZİ

Alaşım numunelerinin mikro yapı incelemelerinde Şekil 3.7’de ULTRA PLUS (FESEM) taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Farklı büyütme ile

Ca elementinin etkisiyle oluşan tane yapılarını gözlemleyebilmek ve yapıda oluşan farklı tür fazların belirlenebilmesi için EDS analizi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Mikro yapı analizlerinin yapıldığı SEM cihazı.

3.6. XRD ANALİZİ

Alaşımelerde oluşan fazların ve kristal yapıların belirlenebilmesi için RIGUKA ULTRA IV XRD cihazı kullanılmıştır. Değişen farklı oranlardaki Ca oranlarına bağlı olarak faz değişimleri test edilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.8’de alaşımlarda oluşan fazların belirlenmesinde kullanılan XRD cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.8. Alaşımların fazlarını belirlemede kullanılan XRD cihazı.

3.7. SERTLİK TESTİ

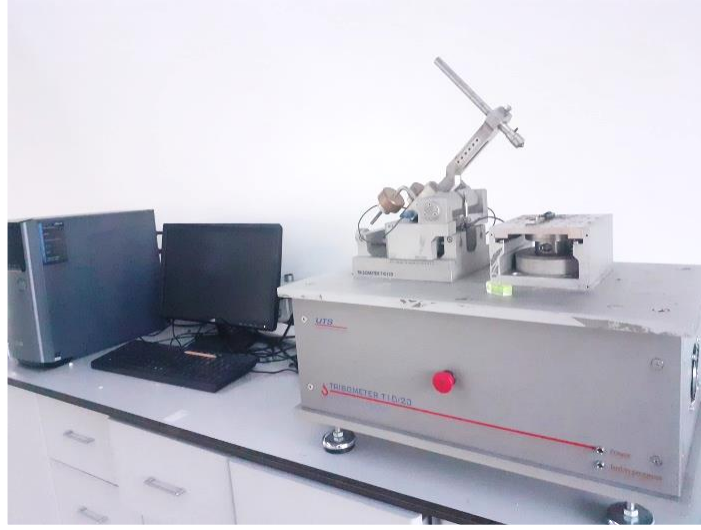
Alaşımardaki Ca element miktarı farklılıklarının alaşımlarda meydana getirdiği sertlik değişimlerinin belirlenebilmesi için Şekil 3.9'da verilen Q/10A+ mikro sertlik (vikers) ölçüm cihazı kullanılmıştır. 10 s sürede ve 5 N yük ile 5 farklı bölgeden alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. Q/10A+ mikro sertlik ölçüm cihazı.

3.8. AŞINMA TESTİ

Alaşımlara eklenen Ca elementinin farklı sıcaklıklarda aşınma direncine etkisini belirlemek amacıyla Şekil 3.10'da verilen UTS Tribomotor T10/20 aşınma cihazı kullanılmıştır. Bu aşınma cihazında 8 mm çapında, 250 m toplam yol alınarak ve oda sıcaklığı, 150 °C ve 200 °C sıcaklıklarda 10N, 20N ve 40N yük altında aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma izinin derinliğine ve genişliğine bağlı olarak altı farklı yerde 6 mm çapında standart bir prob kullanılarak Mitutoyo sj-410 aleti ile aşınma derinlik alanı ölçülmüştür.



Şekil 3.10. UTS Tribomotor T10/20 aşınma cihazı.

Aşınma hızı Archard denklemine göre hesaplanmıştır. Archard aşınma denklemi, alaşımların kayma aşınmasına bağlı olarak pürüzlü yüzeylerin teorisine bağlı basit bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Denkleme göre aşınma hacmi, uygulanan yük ve kayma mesafesi arasındaki doğrusal bir ilişki açısından yorumlanmaktadır. Aşağıdaki eşitlikte Archard denklemi açıklamalı olarak verilmiştir. Birimi mm^3/Nm 'dir [96].

$$W_R = \frac{W_v}{F_N \cdot l} \quad (3.1)$$

W_R = Aşınma Oranı

W_v = Aşınma Hacmi

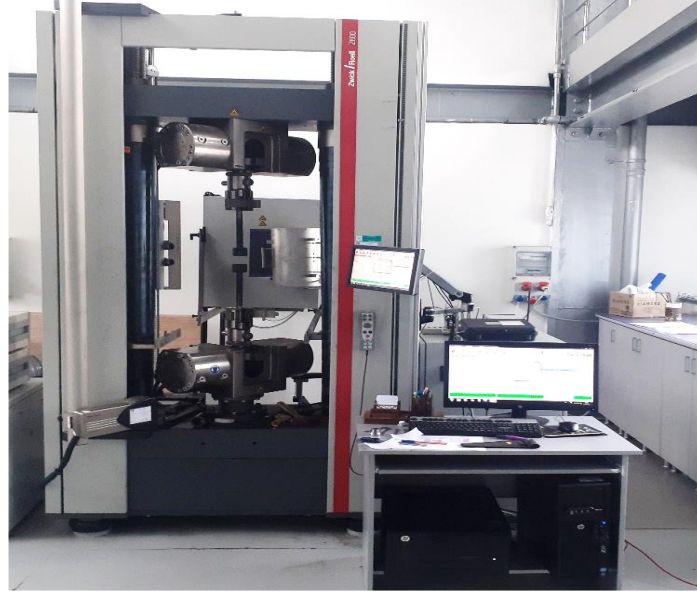
F_N = Uygulanan Yük

l = Toplam Kayma Mesafesi

3.9. ÇEKME TESTİ

Üretilen alaşımlarda farklı oranlardaki Ca elementinin etkisine bağlı olarak akma mukavemeti (MPa), çekme mukavemeti (MPa) ve maksimum uzama (A) miktarlarının belirlenebilmesi için oda, 150 °C ve 200 °C 'lik sıcaklıklarda, 2 mm/dk. hızında çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi TS EN ISO 6892-1 standardı B

metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11'de kullanılan çekme test cihazı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Çekme test cihazı.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. ELEMENTAL ANALİZ

Mg esaslı alaşımların XRF analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmektedir. Elde edilen elementel analiz sonuçlarına göre alaşımlara ASTM standardına göre adlandırmaları yapılmıştır. Ca ve Al oranlarının farklılık gösterdiği alaşımların hem oda hem de yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklere (çekme ve tribolojik) etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Çizelge 4.1. Üretilen alaşımların XRF analiz sonuçları (% ağı.).

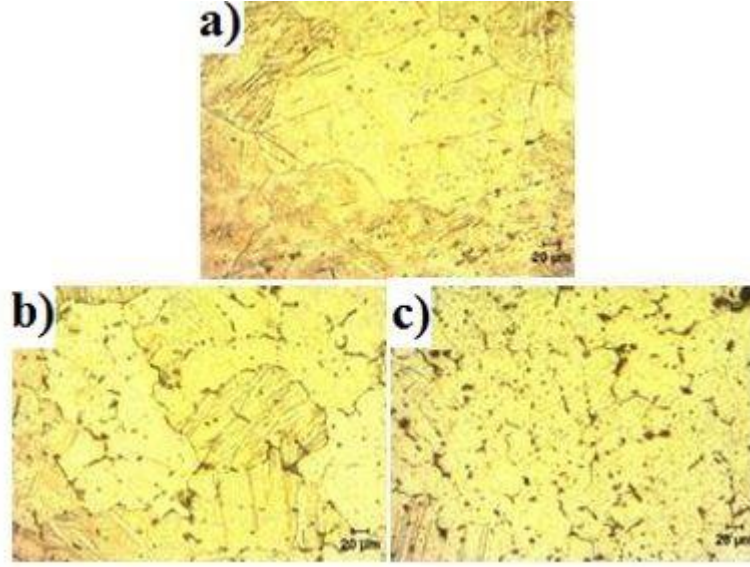
Alaşımlar	Al	Zn	Ca	Mn	Mg	Ca/Al
AZ21	1,86	0,82	-	0,11	Deng.	-
AZX211	2,07	0,92	0,73	0,12	Deng.	0,35
AZX311	3,16	1,35	0,95	0,11	Deng.	0,30

4.2. MİKROYAPILAR VE FAZ ANALİZLERİ

4.2.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

Şekil 4.1’de alaşımların 200X büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.1’a AZ21 Mg alaşımına Ca ve Al elementleri ilave edilmeden önce kaba taneli yapılara sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 4.1’b AZ21 Mg alaşımına eklenen ağı. %1 Ca elementi ile ince taneli bir mikro yapının oluştuğu görülmektedir. Oluşan ince taneli yapılar nedeniyle mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’c ise AZ21 Mg alaşımına %3 Al ve %1 Ca elementinin eklenmesiyle oluşan ince taneli yapıları göstermektedir. Çizelge 4.2’de verilmekte olan AZ Mg alaşımlarına eklenen elementlerin tane boyutları (μm) İmageJ

programında optik hesaplama yöntemi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere Al ve Ca elementlerinin eklenmesiyle daha ince taneli yapılar elde edilmiştir.



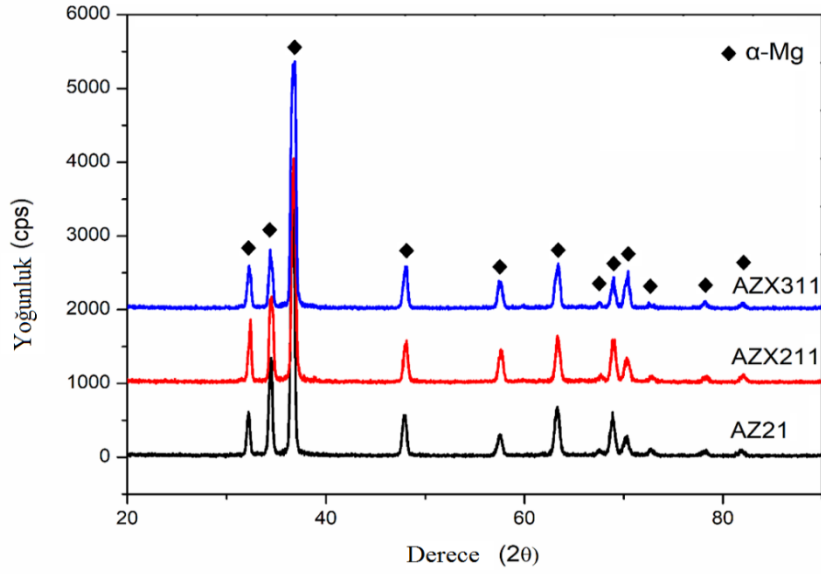
Şekil 4.1. a) AZ21 Mg alaşımı b) AZX211 Mg alaşımı ve c) AZX311 Mg alaşımlarının 200X büyütmeledeki optik mikroskop görüntüleri.

Çizelge 4.2. Mg alaşımların ortalama tane boyutları (μm).

Alaşımlar	Mg alaşımlarının ortalama tane
	boyutu (μm)
AZ21	144,4 \pm 1,2
AZX211	103,2 \pm 1,4
AZX311	99,1 \pm 1,7

4.2.2. XRD Analizi

Mg alaşımlarının XRD analiz sonuçları Şekil 4.2'de verilmektedir. XRD analizi yardımı ile bütün Mg alaşımlarında sadece α -Mg matris fazı tespit edilmiştir. Al, Zn ve Ca'nın alaşımlardaki ağırlık fraksiyonu bu elementlerin Mg matrisindeki çözünürlük limitlerinden çok daha düşüktür [97, 98]. Bu nedenle, çözünmemiş alaşım elementi veya alaşım elementleri ile birlikte oluşan ikincil fazlar miktarının XRD ile tespit edilemediği anlaşılmaktadır.

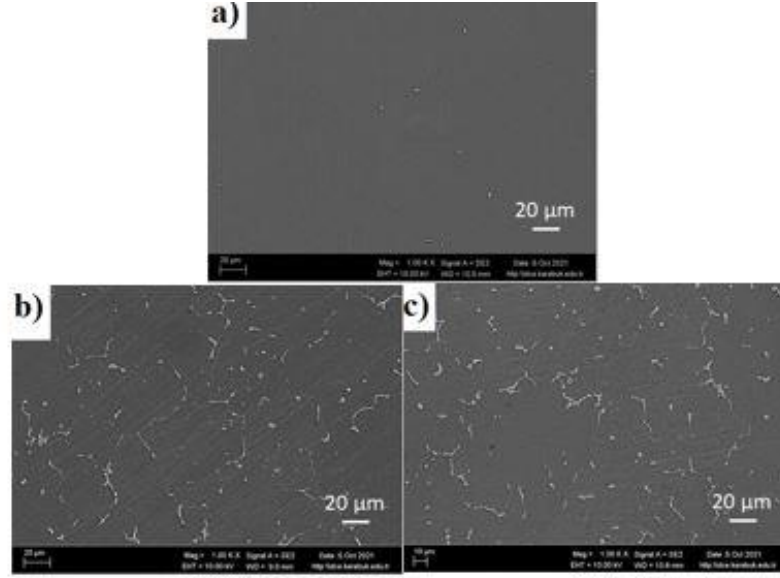


Şekil 4.2. Mg alaşımlarının XRD analiz sonuçları.

4.2.3. SEM-EDS Analizleri

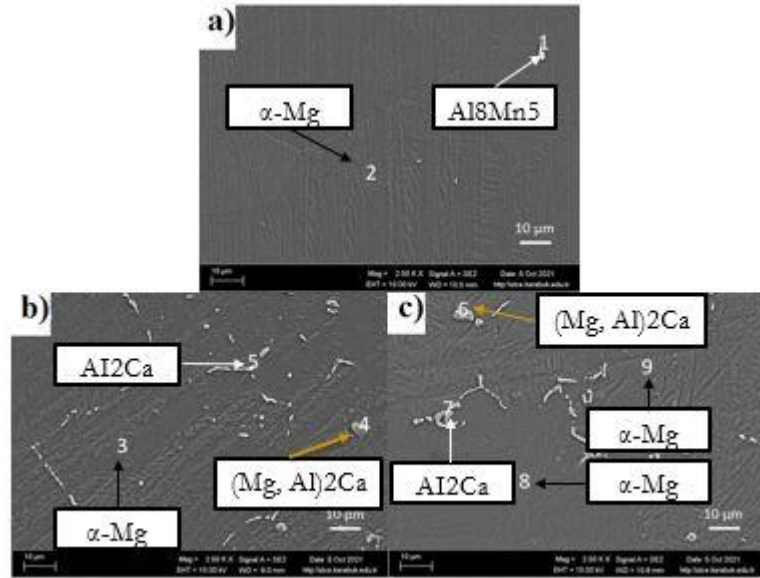
Mg alaşımlarının genel mikro yapısal görünümü Şekil 4.3'te verilmiştir. AZ21 alaşımının Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi mikro yapıda birkaç küçük lokalize çökelti dışında hiçbir ikincil faz gözlemlenmemiştir. AZX211 ve AZX311 alaşımlarının mikro yapısında özellikle tane sınırlarında çökelmiş ikincil fazlar net olarak görülmektedir. AZX311 alaşımındaki ikincil faz yoğunluğu, AZX211 alaşımındaki ikincil faz yoğunluğundan daha yüksektir. Bunun nedeni, toplam alaşım element miktarının AZX311 alaşımında AZX211 alaşımına göre daha yüksek olmasıdır.

Bakhsheshi-Rad ve ark. [99] ikili Mg–Ca ve dördü Mg–Ca–Mn–Zn alaşımlarının mekanik ve biyo korozyon özelliklerini incelemiştir. Alaşımların artan toplam alaşım elementi miktarına bağlı olarak tane sınırlarında çökelen yapıdaki ikincil faz miktarının arttığı ve tane sınırlarının kalınlaştığı belirlenmiştir. Şekil 4.3b ve Şekil 4.3c'de görüldüğü gibi toplam alaşım elementi miktarındaki artış tane sınırları üzerinde çöken ikincil faz miktarının artmasına ve bu fazların kabalaşmasına neden olmuştur.



Şekil 4.3. a) AZ21 b) AZX211 ve c) AZX311 Mg alaşımlarının SEM görüntüleri.

Şekil 4.4'te alaşımların mikro yapısında nokta EDS analizi için işaretlenen bölgeleri göstermektedir. 3 alaşımın toplam 9 farklı bölgesinden nokta EDS analizi yapılmıştır. Nokta EDS analizinden elde edilen veriler Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. a) AZ21, b) AZX211 ve c) AZX311 alaşımlarının EDS analiz noktaları.

Çizelge 4.3. Mg alaşımlarının noktasal EDS analiz sonuçları.

Kompozisyon (ağ. %)						
Noktalar	Mg	Al	Zn	Ca	Mn	Muhtemel fazlar
1	12,01	61,62	0,62	-	25,75	Al ₈ Mn ₅
2	94,83	3,57	1,60	-	-	α-Mg
3	97,79	0,93	1,14	-	0,14	α-Mg
4	38,13	39,59	3,52	18,16	0,60	(Mg,Al) ₂ Ca
5	34,09	45,27	1,39	19,25	-	Al ₂ Ca
6	40,84	41,25	1,27	16,51	0,12	(Mg, Al) ₂ Ca
7	26,81	50,86	1,19	21,00	0,14	Al ₂ Ca
8	97,01	1,75	1,34	-	-	α-Mg
9	97,01	1,50	1,27	0,15	-	α-Mg

Şekil 4.4a'da verilen AZ21 mikro yapıda tane sınırlarında çökelmiş ikincil fazın olmadığı gözlenmiştir. α-Mg'den oluşan tek fazlı bir yapı görülmektedir [100]. Ayrıca Mg₁₇Al₁₂ fazı, bu fazın daha düşük erime sıcaklığına (~437 °C) bağlı olarak 400 °C'de 24 saat uygulanan homojenizasyon ısıl işlemi sırasında α-matris içinde tamamen çözünmüş olabilir. AZ21 alaşımının EDS analizi ile elde edilen SEM mikro yapıda Al₈Mn₅ fazı olduğu tespit edilmiştir. Mn ve Al içeren bu fazın, alaşım üretiminde kullanılan AZ63 hurdasından geldiği tahmin edilmektedir. Al₈Mn₅ fazının erime noktası 900 °C'ye kadar çıkabilmektedir [101]. Bu fazın ağırlıkça %0,1-0,3 Mn içeren Mg alaşımlarında kararlı bir şekilde yer almaktadır [102]. Böylece Al₈Mn₅ fazı, alaşımların bileşimlerinde kullanılan AZ63 hurdasından geldiği ve ergimeye maruz kalmadan AZ21 alaşımının yapısına katıldığı görülmüştür.

Şekil 4.4b ve 4.4c incelendiğinde hem ZXM211 hem de ZXM311 alaşımlarının matrisinin de α-Mg fazından oluştuğu anlaşılmaktadır. Mikro yapılarda ikincil fazlar olarak tane sınırlarında (Mg, Al)₂Ca fazı çökeltileri ve tanelerde lokal olarak Al₂Ca fazı çökeltileri gözlenmiştir. ZXM211 ve ZXM311 alaşımlarında hem (Mg, Al)₂Ca hem de Al₂Ca fazlarının görülmesinin nedeni, alaşımlara 400 °C'de 24 saat döküm sonrası ısıl işleminin uygulanmasıdır. Isıl işlem sırasında Al₂Ca fazının (Mg, Al)₂Ca fazından destekli bir mekanizma ile dönüştürüldüğü belirlenmiştir [103]. Böylece döküm sırasında tüm ikincil fazlar (Mg, Al)₂Ca olarak çökmesine rağmen, ısıl işlemi sırasında bir kısmının Al₂Ca fazına dönüştüğü anlaşılmaktadır. Nitekim Wang

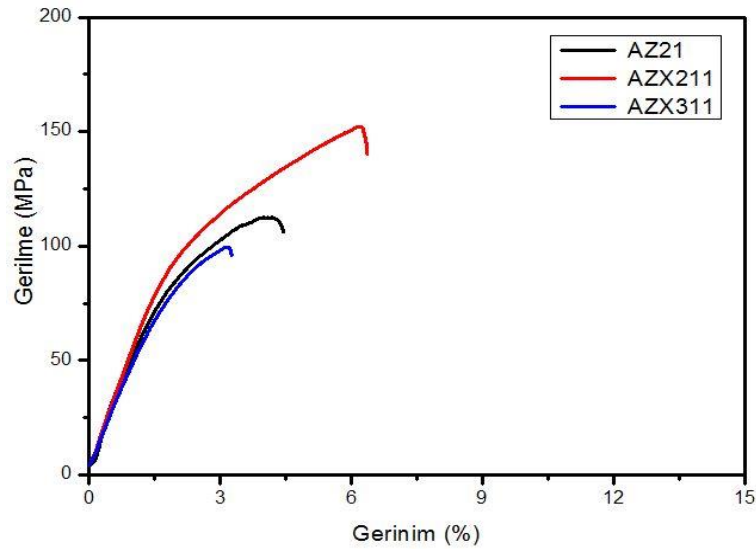
ve ark. [104] AZX622 alaşımında Ca/Al oranının 0,33 olduğu (Mg, Al)₂Ca ve Al₂Ca fazlarının olduğunu tespit etmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da AZX211 ve AZX311 alaşımlarının Ca/Al oranları sırasıyla 0,35 ve 0,30 olarak bulunmuştur.

4.3. ÇEKME TESTİ

Mg alaşımlarının tüm test sıcaklıkları için çekme test sonuçları izelge 4.4-4.5 ve 4.6' da verilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı ($\sigma_{0,2}$), çekme dayanımı (R_m) ve uzama (A) değerleri sırasıyla oda sıcaklığı, 150 °C ve 200°C sırasıyla şekil 4.5, şekil 4.6 ve şekil 4.7'de karşılaştırılarak verilmiştir.

Çizelge 4.4. Mg alaşımlarının 25 °C'deki çekme testi değerleri.

25 °C			
Alaşımlar	Akma Dayanımı (MPa)	ekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AZ21	89 ± 1,25	113 ± 2,7	3,4 ± 0,36
AZX211	95 ± 1,13	152 ± 1,35	3,8 ± 0,62
AZX311	89 ± 1,05	99 ± 1,63	2,8 ± 0,2

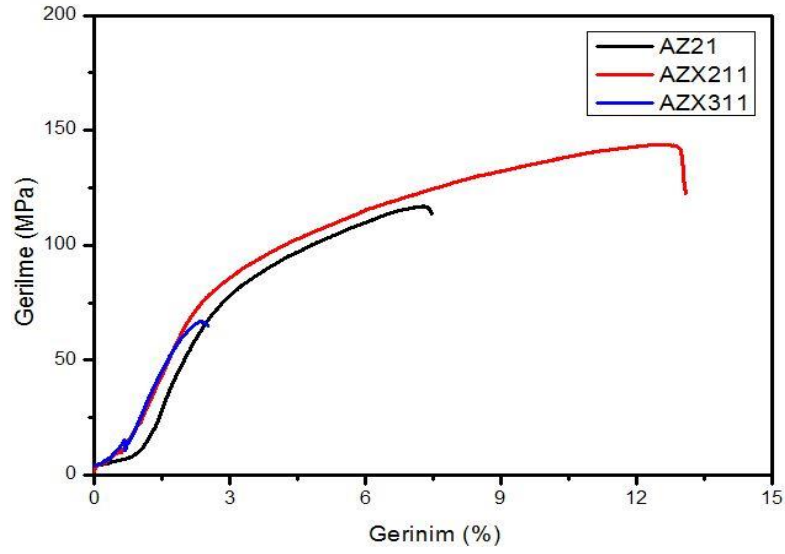


şekil 4.5. Mg alaşımlarının oda sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.

Çizelge 4.5. Mg alaşımlarının 150 °C’deki çekme testi değerleri.

150 °C

Alaşımlar	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AZ21	83 ± 1,03	117 ± 2,1	7,0 ± 0,95
AZX211	83 ± 2,1	144 ± 2,07	9,4 ± 0,7
AZX311	62 ± 1,74	67 ± 1,95	2,6 ± 0,71

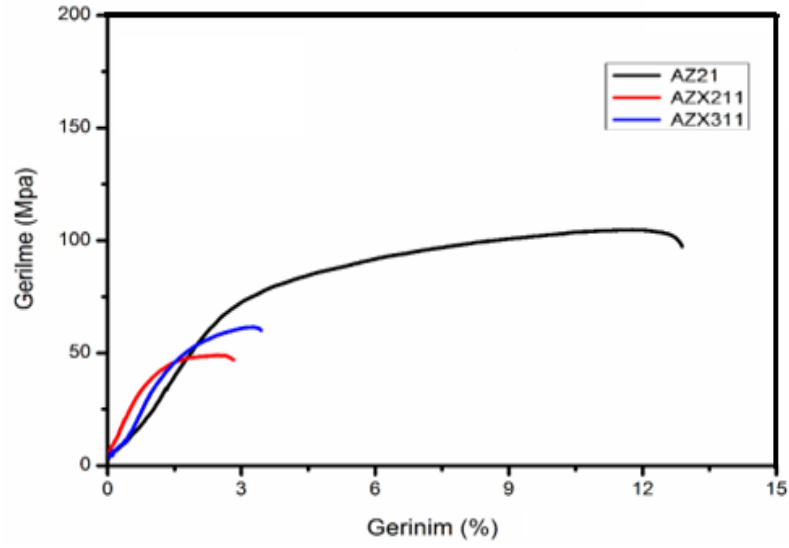


Şekil 4.6. Mg alaşımlarının 150 °C sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.

Çizelge 4.6. Mg alaşımlarının 200 °C’deki çekme testi değerleri.

200 °C

Alaşımlar	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AZ21	70 ± 1,31	105 ± 2,7	12,5 ± 0,3
AZX211	45 ± 1,26	61 ± 1,95	4,0 ± 0,36
AZX311	41 ± 1,33	49 ± 2,07	3,6 ± 0,21



Şekil 4.7. Mg alaşımlarının 200 °C sıcaklığındaki gerilme-gerinim grafiği.

Oda sıcaklığındaki çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde, AZ21 alaşımına Ca ilave edilerek elde edilen AZX211 alaşımının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin AZ21 alaşımına göre arttığı belirlenmiştir. AZX211 ve AZX311 alaşımları karşılaştırıldığında, iki alaşımın Zn ve Ca oranları sabittir ve AZX311 alaşımında Al oranı ağırlıkça %3'tür. Dolayısıyla AZX311 alaşımında akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri AZX211 alaşımına göre daha düşüktür. 150 °C'de yapılan çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında, AZ21 ve AZX211 alaşımlarının akma dayanımlarının aynı olduğu, AZX211 alaşımının çekme dayanımı ve kopma uzama değerlerinin AZ21'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir. AZX311 alaşımının 150 °C'deki çekme testinden elde edilen tüm değerlerin AZ21 ve AZX211 alaşımlarının altında olduğu görülmektedir.

200 °C'de yapılan çekme testinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, en yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin AZ21 alaşımında elde edildiği, bu değerlerin ise AZX211 ve AZX311'de azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Wang et al. [104] benzer bir çalışmada Ca ve Al+Zn içerikleriyle, Mg-Al-Zn-Ca alaşımının mekanik özelliklerinin hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıkta Al ve Zn ayrı içerikleri ile açık bir şekilde değiştiğini gözlemlemiştir. Çizelge 4.4- 4.5 ve 4.6'da gösterildiği gibi, Al içeriği tüm test sıcaklıklarında AZX311 ile AZX211 alaşımı için ağırlıkça %3'ten ağırlıkça %2'ye

düştüğünde akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri artmıştır. Sonuç olarak tüm test sıcaklık değerlerinde elde edilen sonuçlar dikkate alındığında AZX211 alaşımında optimum çekme özelliklerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Fu ve ark. [105] AZ serisi magnezyum alaşımına ağ. %1,5 Ca ilavesinin ikincil fazları değiştirdiği için çekme özelliklerini iyileştirmenin iyi bir yolu olduğunu belirtmiştir.

4.4. SERTLİK TESTİ

Mg alaşımlarının sertlik testi sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Tüm alaşımlar için sertlik değerlerinde keskin bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen alaşımlarda a-Mg matrisinde çözünen Al ve Zn miktarları AZ21 alaşımı için ağırlıkça yaklaşık %3 iken, AZX211 ve AZX311 alaşımları için bu miktar ağırlıkça sırasıyla yaklaşık %4 ve %5’e çıkmıştır. Ayrıca homojenizasyon ısıl işleminin etkisine bağlı olarak AZX211 ve AZX311 alaşımlarında ikincil fazların sürekli dentritik yapıları kırılmıştır. Dolayısıyla Ca ilavesi ile AZX211 ve AZX311 alaşımlarında önemli bir artış olması gerekse de bu gözlenmemiştir.

Jun ve ark. [106] AZ91 ve AZ91+%0,5 Ca alaşımlarına 413°C’de 16 saat ısıl işlem uygulamış ve alaşımların döküm durumuna göre önemli sertlik düşüşleri gösterdiğini gözlemlemiştir. Ayrıca AZ91 alaşımında sertlik azalmasının AZ91+ ağırlıkça %0,5 Ca’ya göre daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Alaşımların ortalama tane boyutları da Çizelge 4.2’de verildiği üzere Ca ve Al’in tane inceltme etkisine [107] bağlı olarak AZ21>AZX211>AZX311 olarak listelenmektedir.

Çizelge 4.7. Mg alaşımlarının sertlik değerleri.

Alaşımlar	Sertlik Değerleri (Vickers HV)
AZ21	51,6±1,3
AZX211	53,8 ±2,1
AZX311	52,8±1,9

4.5. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER

Mg alaşımlarına 3 farklı yükte (10N, 20N ve 40N) ve 3 farklı sıcaklıkta (25 °C, 150 °C, 200 °C) uygulanan aşınma testleri sonucu aşınma hızları olarak Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Oda sıcaklığı aşınma hızları.

Alaşımlar	Oda Sıcaklığında Aşınma Hızları ($\times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$)		
	10N	20N	40N
AZ21	12.5±1.0	15.5±1.1	33.5±1.6
AZX211	11.3±0.5	19.1±1.6	22.8±0.7
AZX311	15.1±0.4	17.9±2.0	23.0±1.1

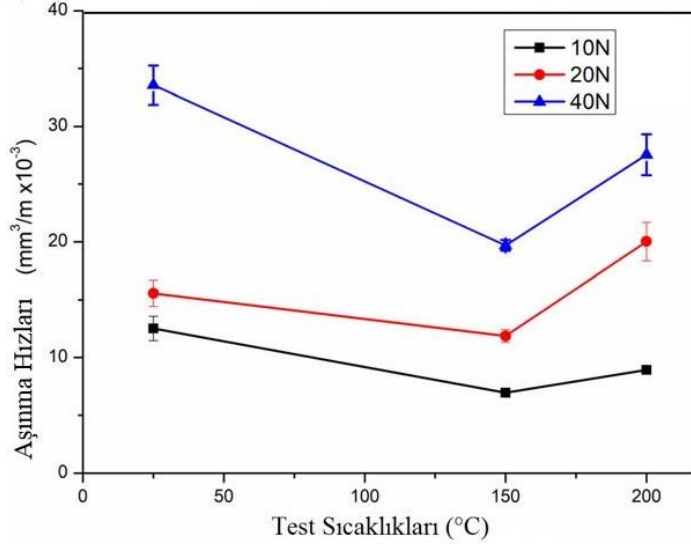
Çizelge 4.9. 150 °C sıcaklığındaki aşınma hızları.

Alaşımlar	150 °C Sıcaklığında Aşınma Hızları ($\times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$)		
	10N	20N	40N
AZ21	6.9±0.1	11.8±0.5	19.6±0.4
AZX211	11.9±0.3	15.5±0.5	21.2±0.7
AZX311	4.8±0.0	13.7±0.7	21.0±1.5

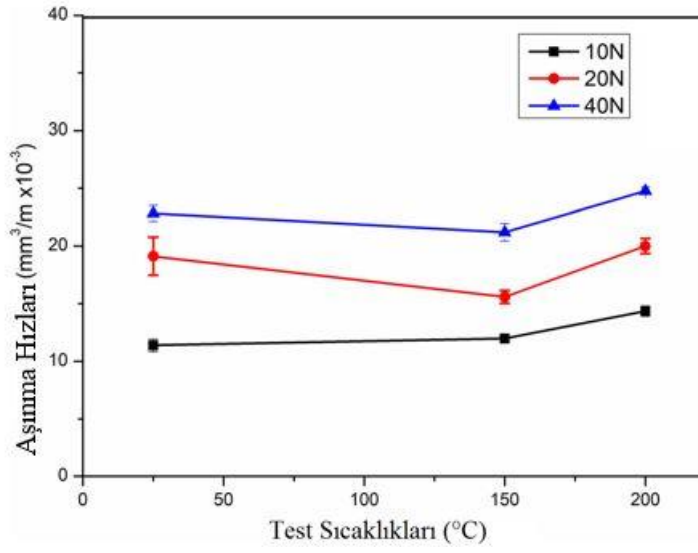
Çizelge 4.10. 200 °C sıcaklığındaki aşınma hızları.

Alaşımlar	200 °C Sıcaklığında Aşınma Hızları ($\times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$)		
	10N	20N	40N
AZ21	8.9±0.2	20.0±1.6	27.5±1.7
AZX211	14.3±0.4	19.9±0.6	24.7±0.3
AZX311	5.9±0.1	11.6±0.4	24.0±0.7

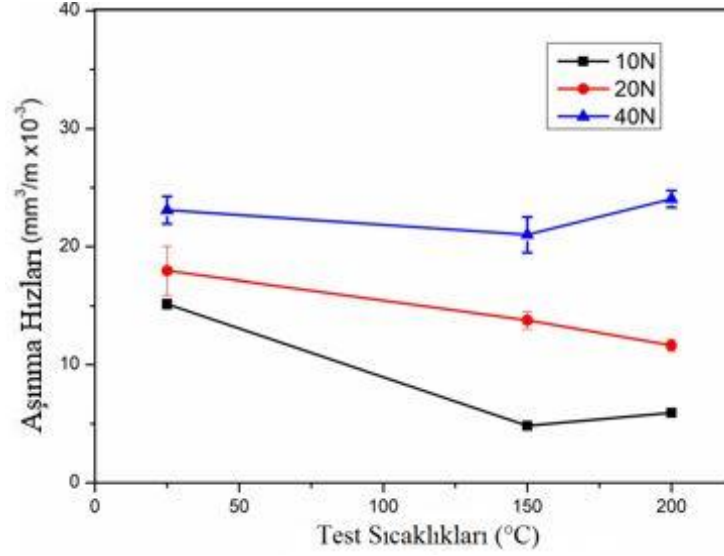
Mg alaşımlarının aşınma hızları karşılaştırılarak Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. AZ21 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.



Şekil 4.9. AZX211 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.



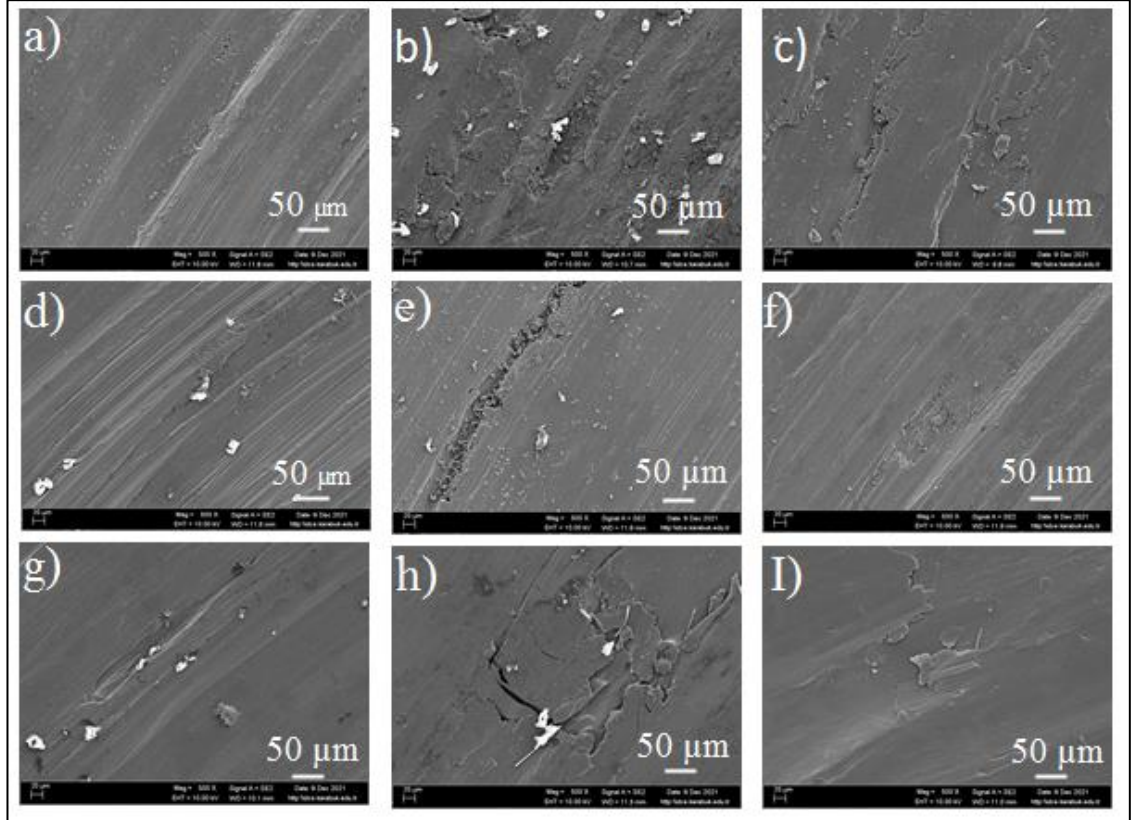
Şekil 4.10. AZX311 Mg alaşımının farklı sıcaklıklar ve yükler altındaki aşınma hızları.

Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak aşınma oranları karşılaştırıldığında, oda sıcaklığından 150 °C'ye geçişte tüm alaşımlar ve uygulanan aşınma yükü değerleri (AZX211-10N ve AZX311-20N hariç) için aşınma hızları azalmış ve 150 °C'den 200 °C'ye geçişte tekrar artmıştır. Zafari ve ark. [108]. AZ91 için 20N uygulanan aşınma yükü altında 150 °C'de yapılan aşınma testinde yüzey sıcaklığının 180 °C'ye ulaşabileceğini ve 200 °C'de yapılan aşınma testinde yüzey sıcaklığının 280 °C'ye çıkabileceğini hesaplamıştır. Ayrıca, 40N uygulanan aşınma yükü altında, 150 °C'deki aşınma testi için yüzey sıcaklıklarının 280 °C'ye, 200 °C'deki aşınma testi için ise 375 °C'ye yükseldiğini belirtmişlerdir. Mg alaşımlarında $T=0.46 T_m$ ile $T=0.57 T_m$ arasında dinamik yeniden kristalleşme meydana gelmektedir [109]. Bu çalışmalardan bir çıkarım olarak, 25 °C'den 150 °C'ye ve 150 °C'den 200 °C'ye aşınma hızları arasında meydana gelen önce azalan ve sonra artan eğilim yeniden kristalleşmeden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

4.5.1. Aşınma Sonrası Yüzey SEM Analizi

AZ21 Mg alaşımının tüm aşınmış yüzey görüntülerinden Şekil 4.11'de (a, d, g) SEM görüntüleri verilmiştir. Alaşımdaki aşınma mekanizmasının abrasif olduğu anlaşılmaktadır. Plastik deformasyon ve çizikler kayma yönüne paralel olarak oluşmuştur [97]. Ayrıca AZX311'in aşınmış yüzeylerinden 150 °C'de Şekil 4.8 f'de

abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmektedir. AZX211 Şekil 4.8 (b, e, h)'de alaşımının aşınmış yüzey görüntülerinde yüzeyinden parça koptuğu için aşınma mekanizmasının adezyon olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek aşınma sıcaklıklarında yüzeyde oksit tabakasının oluşması nedeniyle yüzey temasının azalacağı ve dolayısıyla adezyon aşınmanın meydana geleceği düşünülmektedir.



Şekil 4.11. 40N uygulanan yükün aşınmış yüzey SEM görüntüleri, a) AZ21-25 °C, b) AZX211- 25 °C, c) AZX311- 25 °C, d) AZ21-150 °C, e) AZX211-150 °C, f) AZX311-150 °C, g) AZ21-200 °C, h) AZX211-200 °C, i) AZX311-200 °C.

Mg alaşımları hekzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapıya sahip olduğundan, 225 °C'nin altında sınırlı sayıda kayma düzlemine sahipken, 225 °C'nin üzerinde çok daha aktif kayma düzlemlerine dönüşmektedir [84]. Bu nedenle 150°C ve 200°C'deki aşınma testlerinde, yüzey sıcaklığı 225 °C'yi aştığı için aşınma hızları genellikle oda sıcaklığından daha düşüktür. AZX211 ve AZX311 alaşımlarının yapısındaki çökeltiler, daha yüksek aşınma sıcaklıklarında daha yüksek difüzyona ve çözünürlüğe maruz kalmaktadır. Çözünme, dislokasyon bariyerlerini ve akış stresini azaltarak aşınma yüzeyi tabakalarının plastik deformasyonunu artırabilir. Böylece

aşınma mekanizması abrasif aşınmadan adezyon aşınmaya dönüşeceği öngörülmektedir.

Yukarıdaki grafikler dikkate alındığında, aşınma oranı sıcaklık değişiminden en az etkilenen AZX211 alaşımının olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.11'deki aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde AZX211 alaşımındaki baskın aşınma mekanizmasının adezyon (yapışma) olduğu anlaşılmaktadır. AZX211 alaşımındaki çökeltilerin aşınma yüzey sıcaklığına bağlı olarak daha homojen bir şekilde çözünmesi ve ayrıca AZ21 alaşımına göre çok daha ince tane boyutunda olduğu için bu kararlı aşınma performansına neden olduğu anlaşılmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı magnezyum alaşımı (AZ21, AZX211, AZX311) kokil döküm yöntemiyle üretilmiştir. Alaşımlarda Ca ilavesinin etkisi ve değişen Al oranına bağlı olarak elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

1. Homojenizasyon ısı işleminin (400 °C 24 s) AZ21 alaşımının mikro yapısına etkisinden dolayı tane sınırlarında herhangi bir ikincil fazın çökmediği, ancak Al ve Zn elementlerinin α -Mg matrisinde çözüldüğü görülmüştür. Artan Ca ve Al içeriği ile daha ince taneli bir mikro yapı elde edildiği sonucuna varılmıştır.
2. AZX211 ve AZX311 alaşımlarında Ca ilavesi ve Al içeriğinin artmasıyla tane sınırları ve tane içlerinde (Mg, Al)₂Ca ve Al₂Ca fazlarının çöklediği gözlenmiştir. AZX311 alaşımında çökelen ikincil fazların AZX211 alaşımından daha yoğun olduğu anlaşılmıştır.
3. Tüm test sıcaklık değerleri için (25 °C – 152 MPa, 150 °C – 144 MPa ve 200 °C – 61 MPa) AZX211 alaşımında optimum çekme özelliklerinin elde edildiği gözlenmiştir.
4. AZX211 alaşımının AZ21 ve AZX311 alaşımlarıyla karşılaştırıldığında yüksek yük (40 N) aşınma oranları dikkate alındığında tüm sıcaklık (25 °C – 22,826 x 10⁻³ mm³/m, 150 °C – 21,201 x 10⁻³ mm³/m ve 200 °C – 24,768 x 10⁻³ mm³/m) koşullarında daha kararlı bir aşınma davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir.
5. Otomobil gövde parçalarında ve fren disklerinde yaygın olarak AZ91 Mg alaşımı kullanılmaktadır. Ancak AZ91 Mg alaşımı yüksek oranda (%9 Al) alüminyum içerdiğinden dolayı oldukça sert bir mikroyapıya sahip olmaktadır. Ayrıca tane sınırlarında çökelen Mg₁₇Al₁₂ fazı oldukça gevrek ve düşük ergime sıcaklığına (437 °C) sahiptir. Bu gibi dezavantajlarından dolayı

AZ91 Mg alaşımlarının kullanımı otomobil parçalarında sınırlanmaktadır. Bundan dolayı AZ91 Mg alaşımına alternatif olarak daha düşük oranda alüminyum (%2 Al) ve ilave Ca ile üretilen AZX211 (X: Ca) alaşımı mükemmel mekanik özellikler göstermektedir. AZX211 alaşımında daha ince taneli mikroyapının oluşumu nedeniyle mükemmel sürünme dayanımı sağlamaktadır. Bu noktada özellikle ilave Ca ile tane sınırlarında çökelen Al_2Ca ve $(Mg, Al)_2Ca$ fazları yüksek mekanik özelliklere sahip olduğundan dolayı stabil bir aşınma davranışı göstermektedir. Bundan dolayı özellikle otomobil fren disklerindeki aşınmalar esas alındığında 150 °C sıcaklıklara kadar optimum aşınma direnci sağlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kainer, K. and F. Von Buch., “The current state of technology and potential for further development of magnesium applications”, *Magnesium–alloys and technology*, 1-20 (2003).
2. Aghion, E. and G. Golub., “Production technologies of magnesium”, *in Magnesium Technology*, 29-62 (2006).
3. Kumar, D., R.K. Phanden, and L. Thakur., “A review on environment friendly and lightweight Magnesium-Based metal matrix composites and alloys”, *Materials Today: Proceedings*, 38: 359-364 (2021).
4. Friedrich, H. E. and Mordike, B. L., “Metallurgy, Design Data, Automotive Applications”, *Magnesium Technology*, Stuttgart, 26-62 (2006).
5. Loukil, N., “Alloying elements of magnesium alloys: a literature review”, *Magnesium Alloys Structure and Properties*, Londra 58-78 (2021).
6. Prakash, P., M.A. Wells, and B.W. Williams., “Hot deformation of cast AZ31 and AZ80 magnesium alloys–Influence of Al content on microstructure and texture development”, *Journal of Alloys and Compounds*, 876-897 (2022).
7. Joshi, S., R.C. Singh, and R. Chaudhary., “Effect of rotational speed in friction stir processing on the microstructural and mechanical characteristics of cast AS21A magnesium alloy”, *Materials Research Express*, 6 (5): 43-21 (2019).
8. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J. F. and Qian, M., “Light alloys”, *Metallurgy of the light metals*. Oxford, 125-173 (2017).
9. Kumar, D. S., Sasanka, C. T., Ravindra., K., Suman. and K. N. S., “Magnesium and its alloys in automotive applications–a review”, *Am. J. Mater. Sci. Technol*, 4 (1): 12-30 (2015).
10. Kaese, V., Greve, L., Jüttner, S., Goede, M., Schumann, S., Friedrich, H. and Ritter, W., “Approaches to Use Magnesium as Structural Material in Car Body”, *6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications*, Weinheim, 949-954 (2003).
11. İncesu A., “Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerine yaşlandırma parametrelerinin etkisi” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük 6-7 (2015)
12. Singh., Kulwant., Gurbhinder, Singh. and Harmeet Singh., “Review on friction stir welding of magnesium alloys”, *Journal of magnesium and alloys* 6 (4): 399-416 (2018).

13. Witte, F. “Reprint of: The history of biodegradable magnesium implants: A review”, *Acta biomaterialia*, 23: 28-40 (2015).
14. Seal, C., K, Vince. and M. Hodgson., “ Biodegradable surgical implants based on magnesium alloys–A review of current research”, *in IOP conference series*, Bristol 43-47 (2009).
15. Zhang, E., Yin, D., Xu, L., Yang, L. and Yang, K., “Microstructure, mechanical and corrosion properties and biocompatibility of Mg–Zn–Mn alloys for biomedical application”, *Materials Science and Engineering*, 9 (3): 987-993 (2009).
16. Tong, P., Sheng, Y., Hou, R., Iqbal, M., Chen, L. and Li, J., “Recent progress on coatings of biomedical magnesium alloy”, *Smart Materials in Medicine* 3: 104-116 (2021).
17. Yang, J., Wang, J. L., Wu, Y. M., Wang, L. M. and Zhang, H. J., “Extended application of edge-to-edge matching model to HCP/HCP (α -Mg/MgZn₂) system in magnesium alloys”, *Materials Science and Engineering*, 460 (A): 296-300 (2007).
18. Staroselsky, A. and L. Anand., “A constitutive model for hcp materials deforming by slip and twinning: application to magnesium alloy AZ31B”, *International journal of Plasticity*, 19(10): 1843-1864 (2003).
19. Reed-Hill, R.E. and Robertson, W.D. “Deformation of magnesium single crystals by nonbasal slip,” *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 9: 496–502 (1957).
20. Vigeholm, B. “Energy Storage Applications of Magnesium”, *in Conference on Magnesium Technology*, Londra, 97-102 (1986).
21. Kim, H. S., Arthur, T. S., Allred, G. D., Zajicek, J., Newman, J. G., Rodnyansky, A. E. and Muldoon, J., “Structure and compatibility of a magnesium electrolyte with a sulphur cathode”. *Nature Communications*, 2 (1): 1-6 (2011).
22. Özer G., “Termal Yöntemlerle Magnezyum Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 30-40 (2013).
23. Yiğit S., “Kalsine Dolomitin Silikotermik Redüksiyonu İle Magnezyum Metal Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 25-30 (2004).
24. Prentice, L. H., Nagle, M. W., Barton, T. R., Tassios, S., Kuan, B. T., Witt, P. J. and Constanti-Carey, K. K. “Carbothermal Production of Magnesium: CSIRO’s Magsonic™ Process”, *In Magnesium Technology* 31-35 (2012).

25. Wang, Y., You, J., Peng, J. and Di, Y., “Production of magnesium by vacuum aluminothermic reduction with magnesium aluminate spinel as a by-product”, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 68 (6): 1728-1736 (2016).
26. Liu, Z.J.A.E., “National carbon emissions from the industry process: Production of glass, soda ash, ammonia, calcium carbide and alumina”. *Applied Energy*, 166: 239-244 (2016).
27. Brooks, G., Trang, S., Witt, P., Khan, M. N. H. and Nagle, M “The carbothermic route to magnesium”, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 58 (5): 51-55 (2006).
28. Kulekci, M.K., Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (9): 851-865 (2008).
29. Cáceres, C. and D.J.J.o.L.M. Rovera., “Solid solution strengthening in concentrated Mg–Al alloys”, *Journal of Light Metals*, 1 (3): 151-156 (2001).
30. YILDIRIM, H., “AZ31 magnezyum alaşımının sũrtũnme karıştırma nokta kaynak yũntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, *Dergipark*, 23 (2): 402-413 (2018).
31. Seğgin G.O.,“İkiz merdaneli sũrekli dũkũm yũntemi ile ũretilmiř AZ31 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik ũniversitesi Fen Bilimleri Enstitũsũ*, İstanbul 6-8 (2012).
32. Czerwinski, F., “Magnesium injection molding”, *Magnesium*, New York, 135-145 (2008).
33. Song, J., She, J., Chen, D. and Pan, F., “Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 8 (1): 1-41 (2020).
34. Zhang, L., Deng, K. K., Nie, K. B., Xu, F. J., Su, K., and Liang, W., “Microstructures and mechanical properties of Mg–Al–Ca alloys affected by Ca/Al ratio”, *Materials Science and Engineering: A*, 636: 279-288 (2015).
35. Zheng, W. C., Li, S. S., Tang, B. and Zeng., D. B. “Microstructure and properties of Mg–Al binary alloys”. *China foundry*, 3 (4): 270-274 (2006).
36. Kadali, K., Dubey, D., Sarvesha, R., Kancharla, H., Jain, J., Mondal, K. and Singh, S. S., “Dissolution kinetics of Mg17Al12 eutectic phase and its effect on corrosion behavior of as-cast AZ80 magnesium alloy”, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 71 (7): 2209-2218 (2019).
37. im, S.,“AZ91 magnezyum alaşımının korozyon ȳzelliklerinin Tİ mikro alaşımlama ile geliştirilmesi”, Yũksek Lisans Tezi, *Bilecik Őeyh Edebalı ũniversitesi Fen Bilimleri Enstitũsũ*, Bilecik 7-19 (2018).

38. Kabirian, F. and R. Mahmudi, “Effects of Zr additions on the microstructure and impression creep behavior of AZ91 magnesium alloy”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41 (13): 3488-3498 (2010).
39. Zhang, L., Cao, Z. Y., Liu, Y. B., Su, G. H., and Cheng, L. R., “Effect of Al content on the microstructures and mechanical properties of Mg–Al alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 508 (1-2): 129-133 (2009).
40. Zhao, C., Chen, X., Wang, J., Tu, T., Dai, Y., Shin, K. S. and Pan, F., “Strain hardening behavior in Mg–Al alloys at room temperature”, *Advanced Engineering Materials*, 21 (3): 1801062. (2019).
41. Cai, S., Lei, T., Li, N. and Feng, F., “Effects of Zn on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg–Zn alloys”, *Materials Science and Engineering, C*, 32 (8): 2570-2577 (2012).
42. Jingyuan, Y., Jianzhong, W., Qiang, L., Jian, S., Jianming, C. and Xudong, S., “Effect of Zn on microstructures and properties of Mg-Zn alloys prepared by powder metallurgy method”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 45 (11): 2757-2762 (2016).
43. Zeng, R. C., Qi, W. C., Cui, H. Z., Zhang, F., Li, S. Q. and Han, E. H., “In vitro corrosion of as-extruded Mg–Ca alloys—the influence of Ca concentration”, *Corrosion Science*, 96: 23-31 (2015).
44. Incesu, A. and A. Gungor, “Mechanical properties and biodegradability of Mg–Zn–Ca alloys: homogenization heat treatment and hot rolling”, *Journal of Materials Science, Materials in Medicine*, 31 (12): 1-12 (2020).
45. Qudong, W., Wenzhou, C., Xiaoqin, Z., Yizhen, L., Wenjiang, D., Yanping, Z. and Mabuchi, M., “Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91magnesium alloy”, *Journal of materials science*, 36 (12): 3035-3040 (2001).
46. Gao, X. S. M. Z., Zhu, S. M., Muddle, B. C. and Nie, J. F., “Precipitation-hardened Mg–Ca–Zn alloys with superior creep resistance”, *Scripta materialia*, 53 (12): 1321-1326 (2005).
47. Blawert, C., N. Hort, and K.J.T.I.I.M. Kainer., “Automotive applications of magnesium and its alloys”, *Center for Magnesium Technology, Institute for Materials Research*, 57 (4): 397-408 (2004).
48. Jun, J.-H. and J.-H. Moon., “Effect of Ca addition on the damping capacity of Mg-Al-Zn casting alloys”, *Metals and Materials International*, 21 (4): 780-783 (2015).
49. Chong, F., Mingzhao, L., Yang, H., Haiyan, W., Xiaoyan, L. and Liuqun, F., “Effect of Ca on corrosion resistance behavior of as-cast AZ91 magnesium alloys”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 44 (1): 41-47 (2015).

50. Zhang, C., Wu, L., Huang, G., Huang, Y., Jiang, B., Atrens, A. and Pan, F., “Effect of microalloyed Ca on the microstructure and corrosion behavior of extruded Mg alloy AZ31”, *Journal of Alloys and Compounds*, 823: 153844 (2020).
51. Jiang, Z. T., Jiang, B., Zhang, J. Y., Dai, J. H., Yang, Q. S., Qin, Y. A. N. G. and Pan, F. S. “Effect of Al₂Ca intermetallic compound addition on grain refinement of AZ31 magnesium alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26 (5): 1284-1293 (2016).
52. Chaudry, U.M., K. Hamad. and Y.G. Ko., “Effect of calcium on the superplastic behavior of AZ31 magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 815: 140874 (2021).
53. Villegas-Armenta, L. A., Wanjara, P., Gholipour, J., Nakatsugawa, I., Chino, Y. and Pekguleryuz, M., “Linear Friction Welding of an AZ91 Magnesium Alloy and the Effect of Ca Additions on the Weld Characteristics”, *Materials*, 14 (11): 313054 (2021).
54. Luo, Alan A., “Magnesium casting technology for structural applications”, *Journal of Magnesium and Alloys*, 1 (1): 2-22 (2013).
55. Musfirah, A. H. and Jaharah, A. G. “Magnesium and aluminum alloys in automotive industry”, *Journal of Applied Sciences Research*, 8 (9): 4865-4875 (2012).
56. Huang, J., Ren, Y., Jiang, Y., Zhang, B. and Yang, K., “In vivo study of degradable magnesium and magnesium alloy as bone implant”, *Frontiers of Materials Science in China*, 1 (4): 405-409 (2007).
57. Jarfors, A. and Seifeddine, S., “Metal casting”, *Metallurgy and Metallic Materials*, Londra, 309-410 (2014).
58. Guharaja, S., Noorul Haq, A. and Karuppanan, K. M., “Optimization of green sand casting process parameters by using Taguchi’s method”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30 (11): 1040-1048 (2006).
59. Pokorny, M., Monroe, C., Beckermann, C., Bichler, L. and Ravindran, C., “Prediction of hot tear formation in a magnesium alloy permanent mold casting”, *International Journal of Metalcasting*, 2 (4): 41-53 (2008).
60. Hu, H., “Squeeze casting of magnesium alloys and their composites”, *Journal of materials science*, 33 (6): 1579-1589 (1998).
61. Elsayed, F. R., Hort, N., Salgado Ordorica, M. A. and Kainer, K. U., “Magnesium permanent mold castings optimization”, *In Materials Science Forum* 690: 65-68 (2011).

62. Chen, T. J., Ma, Y., Li, B., Li, Y. D., and Hao, Y., “Behavior of thixoformed AZ91D magnesium alloy: A comparison with permanent mould cast alloy”, *Materials Science and Engineering: A* 445: 477-485 (2007).
63. Luo, A. and Pekguleryuz, M. O., “Cast magnesium alloys for elevated temperature applications” *Journal of materials science*, 29 (20): 5259-5271 (1994).
64. Kara, I. H. and Incesu, A., “Microstructural, Mechanical, and Tribological Properties of Mg-3Al-1Sn-1Nd-Mn Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30 (3): 1674-1682 (2021).
65. Tyagi, A., Walia, R. S., Murtaza, Q., Pandey, S. M., Tyagi, P. K. and Bajaj, B. “A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications”, *International journal of refractory metals and hard materials*, 78 107-122 (2019).
66. Dwivedi, D. K., “Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview ”, *Materials & Design* 31 (5): 2517-2531 (2010).
67. Dwivedi, D. K., “Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview ”, *Materials & Design* 31 (5): 2517-2531 (2010).
68. Zambrano, O. A., Aguilar, Y., Valdés, J., Rodríguez, S. A. and Coronado, J. J., “Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanisms in FeMnAlC alloy and other austenitic steels”, *Wear*, 348: 61-68 (2016).
69. Mitchell, J., Crow, N. and Nieto, A., “Effect of surface roughness on pitting corrosion of AZ31 Mg alloy”, *Metals*, 10 (5): 651 (2020).
70. Sieberg, P.M., D. Kurtulan, and S. Hanke., “Wear Mechanism Classification Using Artificial Intelligence”, *Materials*, 15 (7): 2358 (2022).
71. Sun, X., Nouri, M., Wang, Y. and Li, D. Y., “Corrosive wear resistance of Mg–Al–Zn alloys with alloyed yttrium”, *Wear*, 302 (1-2): 1624-1632 (2013).
72. He, F., Y. Fang, and S. Jin., “The study of corrosion–wear mechanism of Ni–W–P alloy”, *Wear*, 311 (1-2): 14-20 (2014).
73. LI, Xiu-lan, Y. A. N. G. Lei, and Xi-peng HE., “Effect of surface diffusion alloying on erosion wear property of ZM5 magnesium alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23 (2): 323-328 (2013).
74. Noon, A.A. and M.-H. Kim., “Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow”, *Wear*, 364: 103-111 (2016).
75. Desale, G.R., B.K. Gandhi. and S. Jain., “Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials”, *Wear*, 261 (7-8): 914-921 (2006).
76. Landkof, B., “Applications in aerospace and electronic industries”, *Magnesium alloys and their applications*, 168-172 (2000).

77. Czerwinski, F., “Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications”, *Corrosion Science*, 86: 1-16 (2014).
78. Kumar, D. S., Sasanka, C. T., Ravindra, K. and Suman, K. N. S., “Magnesium and its alloys in automotive applications—a review”, *Am. J. Mater. Sci. Technol*, 4 (1): 12-30 (2015).
79. Gupta, M. and Ling, S. N. M., “Magnesium alloys and magnesium composites”, *Magnesium*, New Jersey, 10-25 (2011).
80. Ostrovsky, I. and Henn, Y., “Present state and future of magnesium application in aerospace industry”, *In International Conference ASTEC*, Moscow, 19-22 (2007).
81. Hussein, R. O. and Northwood, D. O., “Improving the performance of magnesium alloys for automotive applications”, *WIT Transactions on the Built Environment*, 137: 531-544 (2014).
82. Isenstadt, A., German, J., Bubna, P., Wiseman, M., Venkatakrishnan, U., Abbasov, L. and Kolwich, G., “Lightweighting technology development and trends in US passenger vehicles”, *International Council on Clean Transportation*, 25 (25): 1-10 (2016).
83. Caceres, C. H., “Economical and environmental factors in light alloys automotive applications”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38 (7): 1649-1662 (2007).
84. Monteiro, W. A., “New features on magnesium alloys”, *Alloys*, Rijeka, 45-61 (2012).
85. Joost, W. J. and Krajewski, P. E. “Towards magnesium alloys for high-volume automotive applications”, *Scripta Materialia*, 128: 107-112 (2017).
86. Lutsey, N. P., “Review of technical literature and trends related to automobile mass-reduction technology”, *Institute of Transportation Studies*, 10 (10): 1-15 (2010).
87. Nguyen, H., “Manufacturing processes and engineering materials used in automotive engine blocks”, *Materials Science and Engineering Section B*, 250: 15-25 (2005).
88. Xu, Z., Smith, C., Chen, S. and Sankar, J., “Development and microstructural characterizations of Mg–Zn–Ca alloys for biomedical applications”, *Materials Science and Engineering: B*, 176 (20): 1660-1665 (2011).
89. Živić, F., Grujović, N., Manivasagam, G., Richard, C. and Landoulsi, J., “The potential of magnesium alloys as bioabsorbable/biodegradable implants for biomedical applications”, *Tribology in Industry*, 36 (1): 67 (2014).

90. Pekguleryuz, M. and Kainer, K. U., “Alloying behavior of magnesium and alloy design”, *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*, Filedelfiya, 152-196. (2013).
91. Gu, X. N., Li, S. S., Li, X. M. and Fan, Y. B., “Magnesium based degradable biomaterials: a review”, *Frontiers of Materials Science*, 8 (3): 200-218 (2014).
92. Li, N., and Zheng, Y., “Novel magnesium alloys developed for biomedical application: a review”, *Journal of Materials Science & Technology*, 29 (6): 489-502 (2013).
93. Radha, R. and Sreekanth, D., “Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications—a review”, *Journal of magnesium and alloys*, 5 (3): 286-312 (2017).
94. Liu, D., Yang, D., Li, X. and Hu, S., “Mechanical properties, corrosion resistance and biocompatibilities of degradable Mg-RE alloys: A review”, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1): 1538-1549 (2019).
95. Wu, G., Ibrahim, J. M. and Chu, P. K., “Surface design of biodegradable magnesium alloys—A review”, *Surface and Coatings Technology*, 233: 2-12 (2013).
96. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., Colijn, H. and Turan, M. E., “Investigation of wear and corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated B4C reinforced Al–Si matrix semi-ceramic hybrid composites”, *Journal of Composite Materials*, 53 (25): 3549-3565 (2019).
97. Koç, E., Incesu, A. and Saud, A. N., “Comparative Study on Dry and Bio-Corrosive Wear Behavior of Mg-xAl-3Zn Alloys (x= 0.5-1-2-3 wt.%)”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31 (1): 613-621 (2022).
98. Incesu, A. and Gungor, A., “Biocorrosion and mechanical properties of ZXM100 and ZXM120 magnesium alloys”, *International Journal of Metalcasting*, 13 (4): 905-914 (2019).
99. Bakhsheshi-Rad, H. R., Idris, M. H., Abdul-Kadir, M. R., Ourdjini, A., Medraj, M., Daroonparvar, M. and Hamzah, E., “Mechanical and bio-corrosion properties of quaternary Mg–Ca–Mn–Zn alloys compared with binary Mg–Ca alloys”, *Materials & Design*, 53: 283-292 (2014).
100. Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y. and Candan, E., “Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (5): 1958-1963 (2011).
101. Lai, L., Zhang, K., Ma, M. L. and Shi, G. L., “Effect of Heat Treatment on Microstructures and Properties of AZ40M Alloy”, *In Materials Science Forum*, 849: 173-180 (2016).

102. Pawar, S., Zhou, X., Hashimoto, T., Thompson, G. E., Scamans, G. and Fan, Z., “Investigation of the microstructure and the influence of iron on the formation of Al₈Mn₅ particles in twin roll cast AZ31 magnesium alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 628: 195-198 (2015).
103. Bartex, S. L., dos Santos, C. A., de Barcellos, V. K. and Schaeffer, L., “Effect of solid fraction on microstructures and mechanical properties of a Mg-Al-La-Ca alloy processed by rheocasting”, *Journal of Alloys and Compounds*, 776: 297-305 (2019).
104. Wang, F., Hu, T., Zhang, Y., Xiao, W. and Ma, C., “Effects of Al and Zn contents on the microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn-Ca magnesium alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 704: 57-65 (2017).
105. Fu, L., Le, Q., Tang, Y., Sun, J., Jia, Y. and Song, Z., “Effect of Ca and RE additions on microstructures and tensile properties of AZ31 alloys”, *Materials Research Express*, 5 (5): 056521 (2018).
106. Guo, W., Li, N., Zhou, J., Liu, L., Tian, L., Chen, L. and Ding, N., “Flow Curve and microstructure analysis of a ZK60 magnesium alloy during hot compression tests”, *Metallography, Microstructure and Analysis*, 10 (1): 46-54 (2021).
107. Jun, J. H., “Effect of solution treatment on mechanical properties of cast AZ91-(Ca) alloys”, *Archives of Metallurgy and Materials*, 64 (2019).
108. Zafari, A., Ghasemi, H. M. and Mahmudi, R., “Tribological behavior of AZ91D magnesium alloy at elevated temperatures”, *Wear*, 292: 33-40 (2012).
109. Galiyev, A., Kaibyshev, R. and Sakai, T., “Continuous dynamic recrystallization in magnesium alloy”, *In Materials Science Forum*, 419: 509-514 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

İdris GÖKALP, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. İMKB Kayapınar Lisesi'nden 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde %100 İngilizce olarak eğitimine devam etti. Büyük çaba ve gayretleri sonucunda 2019 yılında onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başlayarak bilim insanı olma yolunda ilk adımını atmış oldu. 2022 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Üretim Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.