



**EKSTRÜZYON PROSESİNİN Mg- Gd- Zn- Ca
ALAŞIMININ MİKROYAPI, MEKANİK VE
KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Soner ARI

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hüseyin ZENGİN**

**EKSTRÜZYON PROSESİNİN Mg-Gd-Zn-Ca ALAŞIMININ MİKROYAPI,
MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Soner ARI

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

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hüseyin ZENGİN**

**KARABÜK
Haziran 2021**

Soner ARI tarafından hazırlanan “EKSTRÜZYON PROSESİNİN Mg- Gd- Zn- Ca ALAŞIMININ MİKROYAPI, MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Hüseyin ZENGİN

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/06/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)

.....

Üye : Doç.Dr. Hüseyin ZENGİN (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

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.”

Soner ARI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSTRÜZYON PROSESİNİN Mg- Gd- Zn- Ca ALAŞIMININ MİKROYAPI, MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Soner ARI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Hüseyin ZENGİN

Haziran 2021, 60 sayfa

Bu çalışmada, Mg-2Gd-2Zn-0.2Ca-0.1Zr (ağırlıkça %) alaşımının (GZX220) sabit kalıba dökümü yapılmış, ardından 400 °C' de 24 saat boyunca homojenleştirilmiş ve son olarak 250 °C, 300 °C, 350 °C ve 400 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta ekstrüzyon ile şekillendirilmiştir. Elde edilen numunelerin mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri optik (OM) ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) ile yapılmıştır. Mekanik özellikler, oda sıcaklığında çekme ve basma testleri ile incelenmiştir. Korozyon özellikleri, oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma ve elektrokimyasal korozyon testleri ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, döküm alaşımının α -Mg, Mg₃Gd₂Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃ ve Mg₅Gd fazlarından oluştuğunu, homojenizasyon işleminden sonra ise ikincil faz partiküllerinin çoğunun matris fazı boyunca kısmen çözündüğünü göstermiştir. α -Mg

taneleri, dinamik yeniden kristalleşme (DYK) nedeniyle ekstrüzyonla önemli ölçüde inceltmiştir. Düşük ekstrüzyon sıcaklıklarında, daha yüksek bazal tekstür yoğunlukları gözlenmiştir. Ekstrüzyon işlemi, mekanik özelliklerde dikkate değer bir gelişme ile sonuçlanmıştır. Ekstrüze edilmiş alaşımların mukavemeti, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile sürekli bir düşüş göstermiştir. Ekstrüzyon sıcaklığı arttıkça akma mukavemetinde daha simetrik davranış gözlenmiştir. Alaşımın korozyon direnci, homojenizasyon ve artan sıcaklık ekstrüzyon proseslerinin ardından iyileştirme göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Magnezyum alaşımları; gadolonyum; nadir toprak; ekstrüzyon; mikroyapı; mekanik özellikler; korozyon.

Bilim Kodu : 91518

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF EXTRUSION PROCESS ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF Mg-Gd-Zn-Ca ALLOY

Soner ARI

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ZENGİN

June 2021, 60 Pages

In this study, Mg-2Gd-2Zn-0.2Ca-0.1Zr (wt%) alloy (GZX220) was cast into a permanent mold, then homogenized at 400 °C for 24 hours and finally formed by hot extrusion at four different temperatures of 250 °C, 300 °C, 350 °C. The microstructure, mechanical and corrosion properties of the obtained samples were investigated. Microstructure examinations were made with optical (OM) and scanning electron microscopes (SEM). Mechanical properties were investigated by tensile and compression tests at room temperature. Corrosion properties were analyzed by immersion and electrochemical corrosion tests in 3.5% NaCl solution at room temperature. The results showed that the casting alloy consists of α -Mg, Mg₃Gd₂Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃ and Mg₅Gd phases, and after homogenization, most of the secondary phase particles were partially dissolved through the matrix phase. The α -Mg grains were significantly refined by extrusion due to dynamic recrystallization (DRX).

Higher basal texture densities were observed at lower extrusion temperatures. The extrusion process resulted in a remarkable improvement in mechanical properties. The strength of the extruded alloys showed a gradual decrease with increasing extrusion temperature. As the extrusion temperature increased, more symmetrical behavior was observed in yield strength. The corrosion resistance of the alloy improved after homogenization and increasing temperature extrusion processes.

Key Word : Magnesium alloys; gadolonium; rare earth; extrusion; microstructure; mechanical properties; corrosion.

Science Code : 91518

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç.Dr. Hüseyin ZENGİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi yardımlarını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Tezimin tamamlanması için FYL-2020-2207 numaralı projeye destekte bulunan BAP komisyonuna Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	4
2.1.MAGNEZYUM.....	4
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	6
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ	7
2.3.1 Alüminyum.....	7
2.3.2 Kalsiyum.....	8
2.3.3. Mangan	9
2.3.4 Çinko	10
2.3.5 Zirkonyum	11
2.3.6 Gadolonyum	12
2.4 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI	13
2.5 MAGNEZYUM DÖKÜM YÖNTEMLERİ	14
2.5.1 Yüksek Basıncılı Döküm.....	15
2.5.2 Gravite Döküm	16
2.5.3 Düşük Basıncılı Döküm.....	16

	<u>Sayfa</u>
2.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI EKSTRÜZYON İŞLEMLERİ	17
2.6.1 Ekstrüzyon Hızı	18
2.6.2. Ekstrüzyon Sıcaklığı.....	18
2.6.3. Ekstrüzyon Oranı	18
BÖLÜM 3	20
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
3.1 ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ.....	20
3.1.1 Döküm Yöntemi	20
3.1.2 Homojenleştirme.....	21
3.1.3 Ekstrüzyon	21
3.2 ALAŞIMLARIN KARAKTERİZASYONU	22
3.2.1 XRF Analizi.....	22
3.2.2. Mikroyapı Karakterizasyonu	23
3.2.2.1 XRD Analizi	23
3.2.2.2 DSC Analizi	23
3.2.2.3 Metalografik İncelemeler.....	23
3.2.3 Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu.....	24
3.2.4. Korozyon Özelliklerinin Karakterizasyonu.....	25
3.2.4.1. Daldırma Korozyon Testi	25
3.2.4.2 Potansiyodinamik Polarizasyon Testi	25
BÖLÜM 4	27
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	27
4.1 MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONLAR	27
4.1.1 Döküm ve Homojenleştirilmiş Alaşımların Mikroyapısı	27
4.1.2 Ekstrüzyon Sonrası Alaşımların Mikroyapısı.....	31
4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER.....	38
4.3 KOROZYON ÖZELLİKLERİ.....	45
BÖLÜM 5	53
SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Magnezyum HCP kafes yapısı ve kayma düzlemleri.....	6
Şekil 2.2. Mg-Al faz diyagramı	8
Şekil 2.3. Mg-Ca faz diyagramı	9
Şekil 2.4. Mg-Mn faz diyagramı	10
Şekil 2.5. Mg- Zn faz diyagramı	11
Şekil 2.6. Mg-Zr faz diyagramı	12
Şekil 2.7. Mg-Gd faz diyagramı	13
Şekil 2.8. Magnezyum otomobil parçaları a) motor parçaları, b) direksiyon iskeleti, c)koltuk iskeleti, d) jant, e) bisiklet iskeleti ve f) dizüstü bilgisayar iskeleti	14
Şekil 2.9. Yüksek basınçlı döküm yöntemleri. a) sıcak hazneli ve b) soğuk hazneli	15
Şekil 2.10. Düşük basınçlı döküm yöntemi.....	17
Şekil 2.11. Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.1. Ekstrüzyon cihazı ve ekstrüzyon işleminde kullanılan yağlayıcı.....	22
Şekil 3.2. Çekme testi numunesi.	24
Şekil 4.1. Döküm ve homojenleştirilmiş numunelerin XRD sonuçları.....	28
Şekil 4.2. Döküm numunesinin DSC sonucu	28
Şekil 4.3. (a,c) döküm ve (b,d) homojenize numunelerin optik mikrografları ve tane boyutu dağılımları.	29
Şekil 4.4. (a,b) döküm ve (c, d) homojenize numunelerin SEM mikroyapıları	31
Şekil 4.5. (a) 250 °C, (b) 300 °C, (c) 350 °C ve (d) 400 °C'de ekstrüzyona uğramış alaşımların optik mikroyapıları	33
Şekil 4.6. Ekstrüzyon sıcaklığının bir fonksiyonu olarak DYK' ya uğramış tanelerin hacim oranı ve ortalama boyutu	33
Şekil 4.7. (a) 250 °C, (b) 300 °C, (c) 350 °C ve (d) 400 °C'de ekstrüze edilmiş alaşımların SEM mikroyapıları.	35
Şekil 4.8. Ekstrüzyon numunelerinin XRD sonuçları	35
Şekil 4.9. Homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin (0002), (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) pole figüre sonuçları.....	37
Şekil 4.10. Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş alaşımlar için mühendislik (a) çekme ve (b) basma gerinim-gerilim eğrileri.	41

Sayfa

Şekil 4.11. Kırık yüzeylere yakın bölgelerin optik mikroyapıları: (a) döküm, (b) homojenleştirilmiş, (c) 250 °C' de ekstrüze edilmiş, (d) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (e) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (f) 400 °C' de ekstrüze edilmiş	43
Şekil 4.12. Çekme testlerinden sonra kırılmış yüzeylerin SEM mikroyapıları: (a) döküm, (b) homojenleştirilmiş, (c) 250 °C' de ekstrüze edilmiş, (d) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (e) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (f) 400 °C' de ekstrüze edilmiş.....	44
Şekil 4.13. Temizlenen numunelerin makroskopik görüntüleri ile %3,5 NaCl çözeltisine daldırılmış döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş GZX220 alaşımlarının ağırlık kayıpları	47
Şekil 4.14. 48 saat boyunca %3,5 NaCl' ye daldırıldıktan sonra aşınmış yüzeylerin SEM mikroyapıları: (a,b) döküm, (c,d) homojenleştirilmiş, (e,f) 250 °C'de ekstrüze edilmiş, (g,h) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (i,j) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (k,l) 400 °C 'de ekstrüze edilmiş	47
Şekil 4.15. Alaşımların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	49
Şekil 4.16. Alaşımların elektrokimyasal empedans (EIS) spektrumları.....	51
Şekil 4.17. Alaşımların EIS spektrumları için modellenen eşdeğer devre	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Magnezyum içeren mineraller ve bulunma oranları [14]	4
Çizelge 2.2. Magnezyum bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	5
Çizelge 2.3. Magnezyum alaşım elementleri için kullanılan ASTM kodları.....	7
Çizelge 3.1. Üretilen alaşımın XRF sonuçları.....	22
Çizelge 4.1. Şekil 4.4' te belirtilen noktaların EDX sonuçları	31
Çizelge 4.2. Çekme ve basma testi sonuçları.....	42
Çizelge 4.3. Alaşımların polarizasyon eğrilerinden elde edilen parametreler	50
Çizelge 4.4. Alaşımların EIS analiz sonuçları	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Mg : magnezyum
Zn : çinko
Zr : zirkonyum
Gd : gadolonyum
Ca : kalsiyum
 E_{oc} : açık devre potansiyeli
 E_{corr} : korozyon potansiyeli
 i_{corr} : korozyon akım yoğunluğu

KISALTMALAR

- SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDX : Energy Dispersive X-Ray (Enerji Yayılımlı X-Işını)
XRD : X-Ray Diffractometer (X-Işını Difraktometresi)
XRF : X-Ray Fluorescence (X-Işını Floresans)
DSC : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Tarama Kalorimetresi)
CPE : Constant Phase Element (Sabit Faz Elementi)
TYS : Tensile Yield Strength (Çekme Akma Dayanımı)
UTS : Ultimate Tensile Strength (Maksimum Çekme Dayanımı)
CYS : Compressive Tensile Strength (Basma Akma Dayanımı)
UCS : Ultimate Compressive Strength (Maksimum Basma Dayanımı)
DYK : Dinamik Yeniden Kristalleşme
EY : Ekstrüzyon Yönü
DY : Dik Yön
ağ.% : Ağırlıkça Yüzde

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Magnezyum tüm yapısal metaller arasında en hafifdir [1]. Magnezyum $1,74 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ile en çok tercih edilen hafif metallerden olan alüminyuma ($2,7 \text{ g/cm}^3$) göre %35 daha hafiftir [2]. Bununla beraber iyi dökülebilirlik- şekillenebilirlik özellikleri, dünyada en çok bulunan sekizinci element olması ve sahip olduğu özel mukavemeti (mukavemet/ağırlık) sayesinde ön plana çıkmaktadır[1,3]. Bu özellikler sayesinde magnezyum alaşımları mühendislik çalışmaları ve gündelik yaşantımızda kullanılmak için büyük potansiyele sahiptirler.

Magnezyum alaşımları otomotiv, havacılık ve uzay, tüketici ürünleri, konstrüksiyon ve biyomedikal gibi alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Yakıt tüketimini azaltmak ve CO emisyonunu azaltmak gerekçesiyle magnezyum alaşımları düşük ağırlığından dolayı otomotiv sektöründe son yıllarda önemli hale gelmiş, kullanımı artmıştır. Ağırlığın azaltılması doğrudan nakliye ve enerji maliyetlerini, montaj ve kullanım için gerekli insan gücünü ve yapı destekleri için yük gereksinimlerini doğrudan etkiler. İlerleyen yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte ihtiyaçlara uygun magnezyum ve alaşımlarının geliştirilmesi ve çeşitlendirilmesine işaret etmektedir [4–6].

Magnezyum alaşımları alçak basınçlı döküm ve kum kalıba döküm işlemlerinin yanında haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme metotları kullanılmaktadır. İnce taneli ve üstün mekanik özellikler elde etmek için en ideal yöntem termo-mekanik işlemlerden olan haddeleme ve ekstrüzyon yöntemleridir [6,7].

Magnezyum sahip olduğu hegzagonal kristal yapısından dolayı oda sıcaklığında sınırlı sayıda kayma düzlemine sahiptirler bu yüzden düşük sıcaklıklarda zayıf şekillenebilirlik özelliği gösterirler [8]. Bu yüzden magnezyum alaşımları daha fazla kayma düzleminin aktif olduğu yeniden kristallenme sıcaklığına yakın 300–450 ° C sıcaklıklarında ekstrüze edilir.

Daha yüksek sıcaklıklar doğal olarak daha yüksek ekstrüzyon hızlarına ve daha düşük ekstrüzyon basınçlarına yol açacaktır. Bununla birlikte, elde edilebilen maksimum sıcaklık alaşıma bağlıdır, daha yüksek alaşımlı malzemeler daha düşük katılma sıcaklıklarına ve dolayısıyla başlangıçta erime ve sıcak çatlamaya daha yüksek duyarlılığa sahiptir. Ek olarak, daha yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları, çoğunlukla işleme sırasında hızlı tane büyümesinin bir sonucu olarak, ekstrüzyonla daha düşük mukavemetlere yol açar [8,9]. Ekstrüzyon sıcaklığı yeniden kristalleşme mekanizmasını şekillendirerek, son malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesini de sağlar [10].Yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan ekstrüzyon işlemlerinde yeniden kristallime oranı düşeceğinden malzeme soğuk deformasyona uğrayacaktır. Buda dayanımda artışa sebebiyet verebilir. Bu çalışmada yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda farklı ekstrüzyon parametreleri uygulanarak etkileri incelenmiştir.

Magnezyum alaşımlamada kullanılan çinko (Zn) elementi magnezyuma tane inceltici özellik, katı çözelti ve katı çökelti (yaşlandırma) sertleşmeleri sebebiyle mekanik özelliklerini iyileştirdiği ayrıca magnezyum üzerinde koruyucu film tabası olumuna yardımcı olarak korozyon özelliklerini de iyileştirdiği bilinmektedir [11,12]. Magnezyum alaşımlarına kalsiyum (Ca) ilavesinin sürünmeye karşı dirençli hale getirdiği bilinmektedir [12]. Magnezyum alaşımlarında nadir toprak elementlerini (RE) ilavesi ile yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme direncini iyileştirdiği ve nadir toprak elementlerinden olan gadolinyum (Gd) ilavesinin tane boyutu düşürücü etkisin olduğu bilinmektedir [13].

Bu çalışmada literatür taramasından çıkarılan sonuçlar ışığında optimum parametreler belirlenip Mg-Gd-Zn-Ca alaşımı üzerinde çalışılmıştır. Bu alaşımlama ile korozyon direnci iyileştirilmiş, yüksek mukavemetli ve iyi şekillenebilirlik

özelliklerine sahip alaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen alaşım homojenleştirme ısı işlemine tabi tutulup dört farklı sıcaklıkta ekstrüzyon işlemine tabi tutularak etkileri incelenmiştir.

Geliştirilen alaşımların homojenleştirme ve ekstrüzyon işlemlerinden sonra mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri kapsamlıca incelenmiştir. Magnezyum alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilerek kullanım alanının genişletilmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

2.1.MAGNEZYUM

Magnezyum 1808 yılında Sir Humphrey Davy tarafından keşfedilen magnezyum, dünyada en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir. Magnezyumun ilk üretimini ise 1833 yılında elektrolitik redüksiyon ile klorürden, Michael Faraday gerçekleştirmiştir [14]. Magnezyum yer kabuğunun %2,7' sinde ve okyanusların %0,13' ünde bulunmaktadır [15]. Magnezyum içeren mineraller ve magnezyum içerikleri şekil 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Magnezyum içeren mineraller ve bulunma oranları [14].

Mineral Adı	Kimyasal formül	Magnezyum miktar, ağırlık %
Brusit	Mg(OH) ₂	41,7
Manezit	MgCO ₃	28,8
Serpantin	3MgO- 2SiO ₂ - 2H ₂ O	26,3
Dolomit	MgCO ₃ - CaCO ₃	13,2
Kamalit	KCl- MgCl ₂ - 6H ₂ O	8,8
Tuzlu göl suyu	MgCl ₂ - MgSO ₄	0,8
Deniz suyu	MgCl ₂ - MgSO ₄	0,14

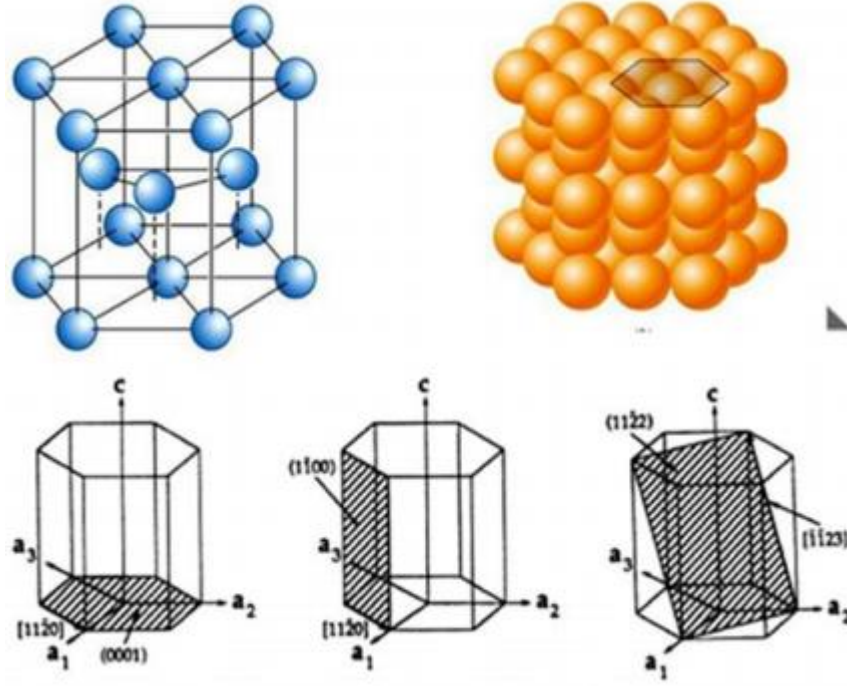
Magnezyum üretimi arasındaki başlıca yöntemler magnezit tuzlu su ve deniz suyundan elde edilen ergimiş magnezyum klorürün (MgCl₂) elektrolizi ve magnezyum oksitinin (MgO) ferrosilisyum ile termal redüksiyonudur[14]. Magnezyum 1,74 g/cm³ yoğunluğu ile en çok tercih edilen hafif metallere olan alüminyuma (2,7 g/cm³) göre %35 , çelikten (7,86 g / cm³) dört kattan daha hafiftir.

İyi bir süneklige, alüminyuma göre daha iyi gürültü ve titreşim sönümleme özelliklerine ve iyi dökülebilirliğe sahiptir [2]. Bunların yanında magnezyum iyi kaynak edilebilirliği, işlenebilirliği ve geri dönüştürülebilir olması avantajları arasındadır. Düşük korozyon direnci ve düşük sürünme dayanımı dezavantajları arasındadır [9]. Magnezyum periyodik tabloda IIA grubu (toprak alkali) elementlerindedir. Sahip olduğu atom ağırlığı 24,3050 g/mol ve atom hacmi 14 cm³/mol'dür [3]. Magnezyumun sahip olduğu bazı fiziksel özellikler çizelge 2.2 de verilmiştir [9].

Çizelge 2.2. Magnezyum bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Atom numarası	12
Yogunluk	1,738 g/cm ³
Ergime noktası	650 °C
Kaynama noktası	1090 °C
Özgül ısı	1,025 kJ.k ⁻¹ .kg ⁻¹ (20 'de)
Elastisite modülü	45GPa
Sertlik	30- 47 HB
Kristal yapısı	Hegzagonal sıkı paket (HSP)
Atom yarıçapı	0,159 nm

Magnezyum sahip olduğu HCP (hegzagonal sıkı paket) yapısı ile oda sıcaklığında kayma düzlemlerinin az olduğu bilinmektedir. Magnezyumun sahip olduğu HCP yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir [1].



Şekil 2.1. Magnezyum HCP kafes yapısı ve kayma düzlemleri.

2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Saf haldeki magnezyum alaşımları düşük dayanım özelliği gösterdiği için saf olarak kullanılması mümkün değildir. Bundan dolayı farklı alaşımların geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Saf magnezyumun özelliklerini iyileştirmek için bilinen yöntemler katı çözelti sertleştirme, dispersiyon sertleştirme, deformasyon sertleştirme, tane küçültme işlemleri ile yapılabilmektedir. Bu mukavemet artırma işlemleri belli alaşım elementlerinin ilavesi ile mümkündür. Alaşım elementlerinin ilavesi ile dökülebilirlik ve korozyon özellikleri gibi önemli özellikleri etkileyebilir. Alaşım elementlerinin ilavesinin dikkatli seçimi ile magnezyum alaşımlarında istenilen özellikler elde etmek mümkündür [9].

Mg alaşımlarının sınıflandırılmasında ASTM sistemi kullanılmaktadır. Alaşımlarının ana elementlerini harfler, bileşimleri yaklaşık rakamlar ifade etmektedir. Örn. AZ31, %3 alüminyum (Al) ve %1 çinko (Zn) içermektedir [16]. Çizelge 2.3' de alaşım elementi olarak kullanılan elementlerin ASTM kodları verilmektedir [16].

Çizelge 2.3. Magnezyum alaşım elementleri için kullanılan ASTM kodları.

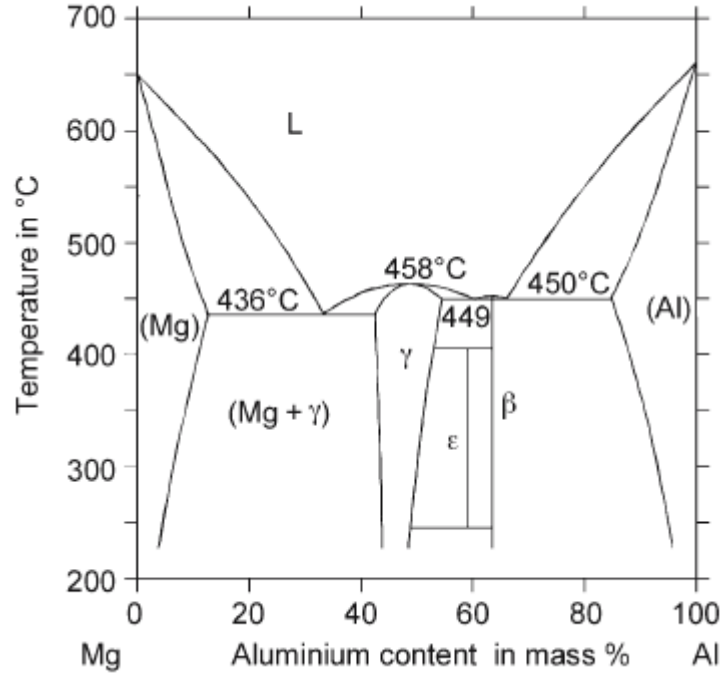
Kısaltma	Alaşım elementi	Kısaltma	Alaşım elementi
A	Alüminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir toprak	S	Silisyum
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	W	İtriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimon
L	Lityum	Z	Çinko
M	Mangan		

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Magnezyum alaşımlarında istenilen özellikleri elde etmek için eklenen alaşım elementlerinin oranları ve türleri büyük etkiye sahiptir. Eklenen bazı alaşım elementlerinin etkileri aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Alüminyum

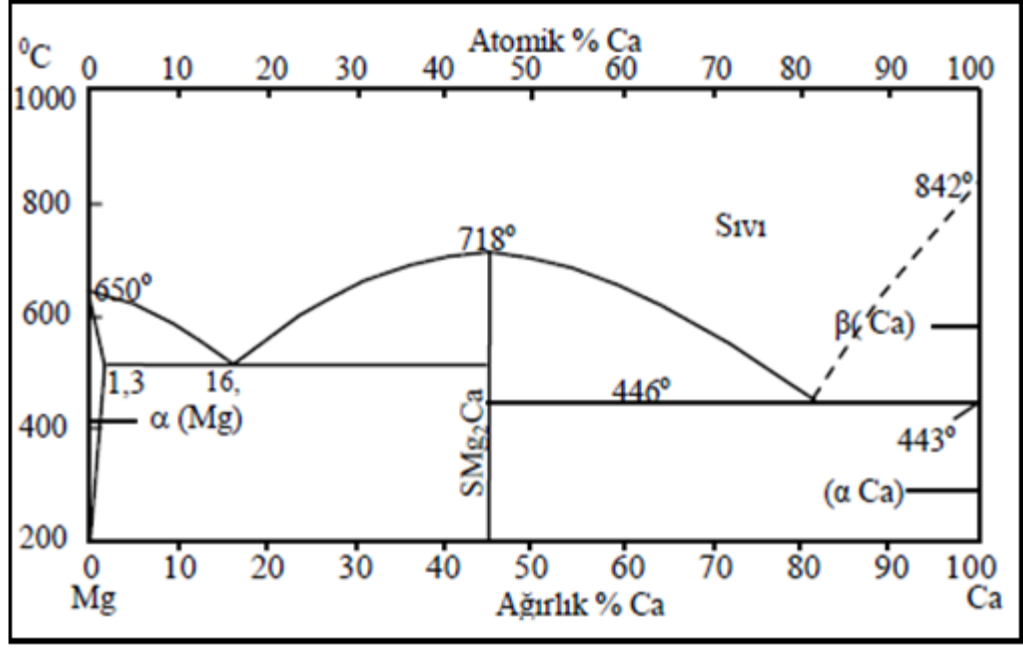
Alüminyum, en yaygın kullanılan alaşım elementidir ve basınçlı döküm alaşımlarının temelini oluşturur. Maksimum çözünürlük %11,5' tir (kütlece %12,7) ve kütle olarak %6' dan fazla alaşım ısıl işlem görebilir. Alüminyum mukavemeti artırır, optimum mukavemet ve süneklik kombinasyonu yaklaşık %6' da gözlenir. Alaşımlar kolayca dökülebilir. Sünme direnci, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının zayıf termal stabilizesi nedeniyle sınırlıdır. Ayrıca $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalığı düşük sıcaklıklarda (<120 °C) oluşarak dayanıklılığı yükseltmektedir [12,17]. Şekil 2.2' de Mg-Al faz diyagramı verilmiştir [12].



Şekil 2.2. Mg-Al faz diyagramı.

2.3.2 Kalsiyum

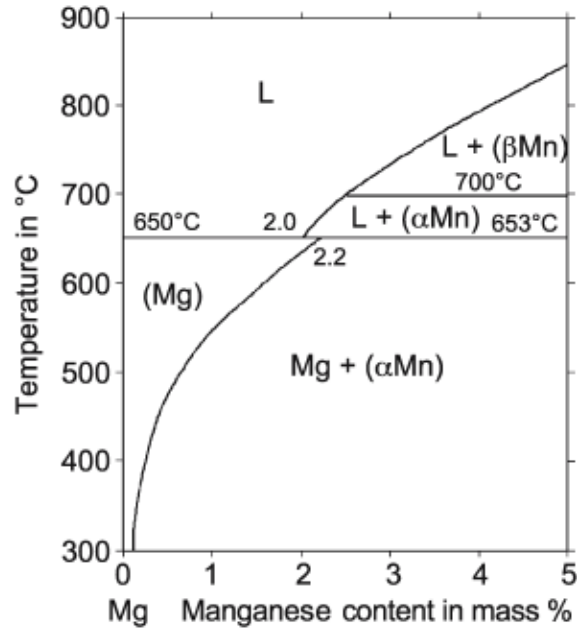
Kalsiyum ile alaşımlama, ucuz sürünmeye dirençli alaşımların geliştirilmesinde daha yaygın hale gelmiştir. Bu durum $Mg_{17}Al_{12}$ fazını $Al_{12}Ca$ fazı ile değiştirerek yapılması hedeflenir. Magnezyumda Ca az miktarda dağıldığı için katı eriyik de sertleşme oluşumunda etkisi azdır. Döküm alaşımlarına döküm öncesi hemen eklendiğinde ergimiş şartlardaki hem de döküm işlemi sonrasındaki ısıtma işlemde oksidasyonu azaltmaktadır. Levhanın yuvarlanma kabiliyetini geliştirir, ancak kütle $> \%0,3$ kaynak edilebilirliğini azaltabilir. Şekil 2.3' te Mg- Ca faz diyagramı verilmiştir [12,17].



Şekil 2.3. Mg-Ca faz diyagramı.

2.3.3. Mangan

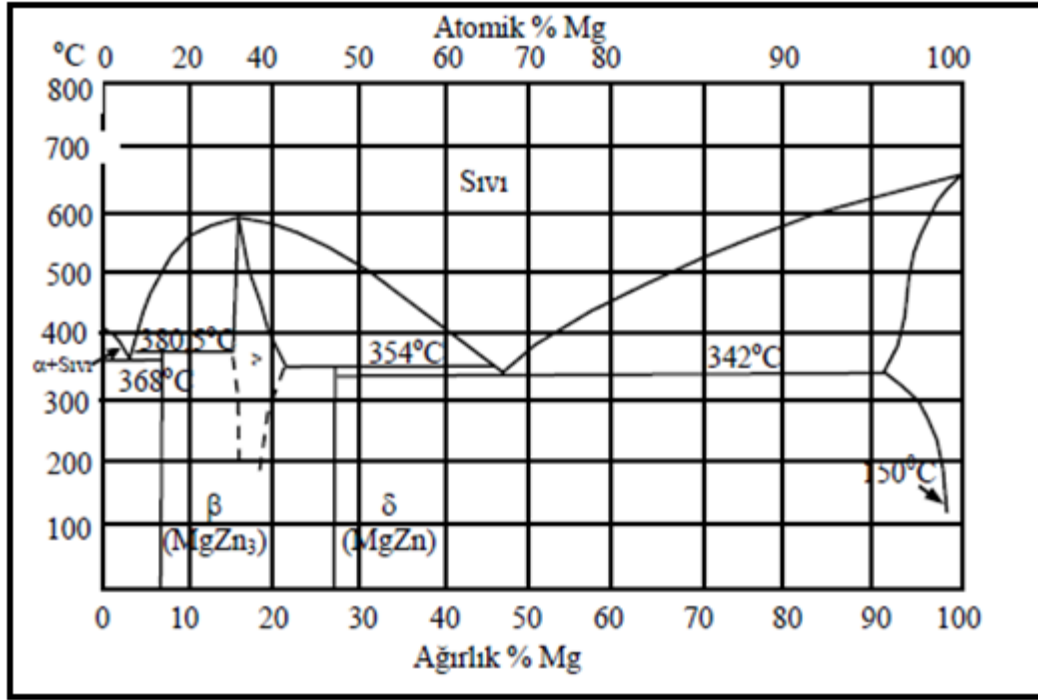
Mangan genellikle tek başına değil, diğer elementlerle, örneğin Al ile birlikte kullanılır. Bu durumda MnAl, MnAl₆ veya MnAl₄ bileşikleri oluşur. Demirin çözünürlüğünü azaltır ve nispeten zararsız bileşikler üretir. MgAl ve MgAlZn alaşımlarının akma dayanımını artırır ve tuzlu su korozyon direncini iyileştirir. Maksimum mangana miktarı kütle olarak %1,5-2'dir [12]. Şekil 2.4' de Mg- Mn faz diyagramı verilmiştir [12].



Şekil 2.4. Mg-Mn faz diyagramı.

2.3.4 Çinko

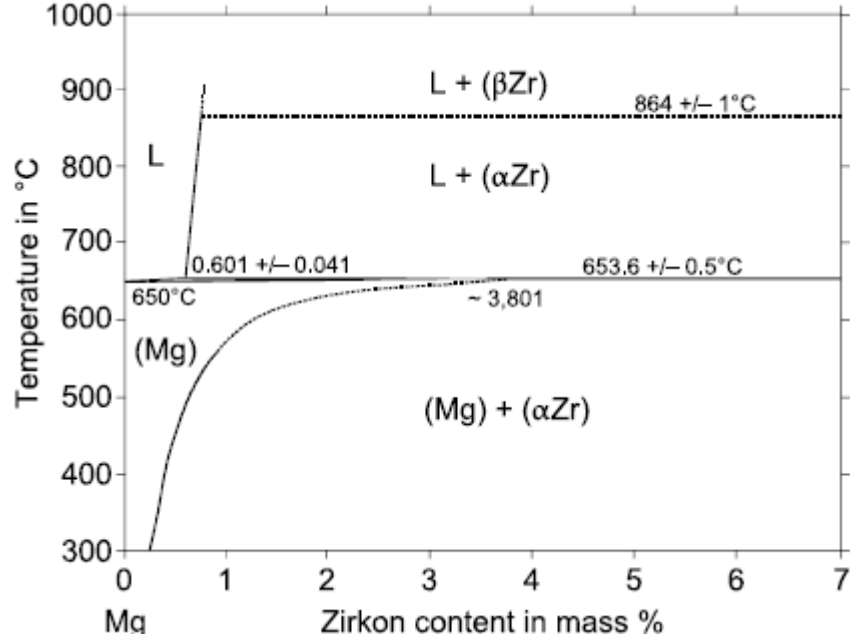
Genellikle oda sıcaklığı mukavemetini arttırmak amacıyla alüminyum ile birlikte kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımında bulunan demir ve nikel empüritelerinin korozif etkilerini azaltmaktadır. Bununla beraber ergimiş metalin akışkanlığını arttırmaktadır. Fakat magnezyum alaşımı ağırlıkça %2' den fazla çinko içerdiğinde, uzama miktarı azalarak kırılma meydana gelmektedir. Sünekliğin azalması ise, çinko elementinin $Mg_{17}Al_{12}$ fazında tercihli olarak birikmesi şeklinde açıklanmaktadır. Çinko, magnezyum alaşımının mukavemetini arttırmak amacıyla zirkonyum, nadir toprak elementleri ve toryum ile birlikte de kullanılmaktadır [15]. Şekil 2.5' te Mg- Zn faz diyagramı verilmiştir [17].



Şekil 2.5. Mg- Zn faz diyagramı.

2.3.5 Zirkonyum

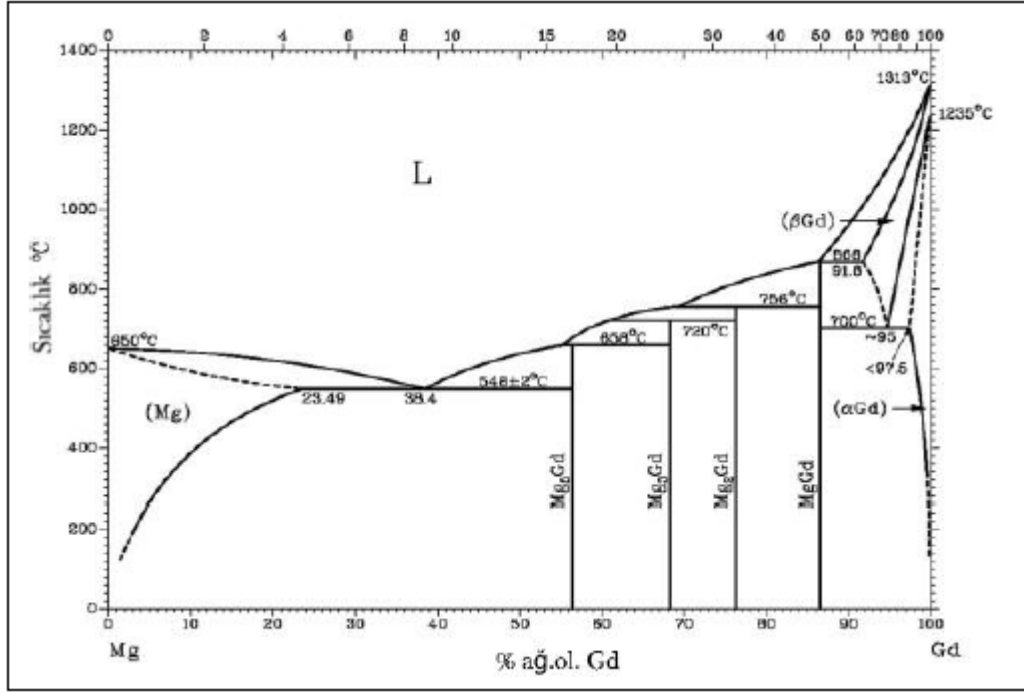
Zirkonyum, magnezyum için çok etkili bir tane inceltici olup, Zn, Ag, Y, Th ve nadir toprak elementleri içeren magnezyum alaşımlarına ve saf magnezyuma ilave edilen zirkonyum, tane küçültücü olarak kullanılmaktadır. Zr ilavesi ekstrüze edilmiş alaşımlarda Ca ve Zr içeren ince ve yoğun MgZn₂ çökeltilerini dağıtmak için faydalıdır. Ayrıca berilyumun tane büyütücü etkisini azaltmaktadır. Örnek olarak, berilyum içeren AZ92 alaşımına ilave edilen %0,2 Zr, alaşımın tane boyutunun 510 µm'den 180 µm'ye düşmesini sağlamaktadır. Bu şekilde alaşımın mekanik özellikleri iyileşmektedir [18]. Şekil 2.6' da Mg- Zr faz diyagramı verilmiştir [12].



Şekil 2.6. Mg-Zr faz diyagramı.

2.3.6 Gadolonyum

Nadir toprak elementlerinin, alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için önemli alaşım elementleri olduğu kanıtlanmıştır [12]. Nadir toprak elementleri olarak bilinen Gadolonyum, İtiryum ve Neodimyum gibi elementlerin saf Mg'da tekstür zayıflatıcı etkisi belirlenmiş ve daha kolay şekil alması sağlanmıştır [16]. Gd elementinin ağırlık %1,3 oranında ZK60 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi He ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışmaya göre ağırlık %1,3 Gd ilavesi, ZK60 alaşımında matris içindeki Zn'yi harcayarak Mg-Zn-Gd intermetalığı oluşturmuş ve Zn'nin harcanması sonucu alaşımın yaşlandırılabilirliği, akma ve çekme dayanımı düşmüştür. Ancak Gd ilavesi tane boyutunu ciddi derecede düşürdüğü için özellikle yüksek sıcaklık testlerinde bu düşüş dengelenmiş ve % uzama miktarının artması sağlanarak süneklilik de artmıştır [19]. Başka bir çalışmada, düşük seviyelerde (ağırlık %0,2, 0,5 ve 0,8) Gd ilavesinin yüksek oranda haddelenmiş ZK60 alaşımına etkisi incelenmiş ve düşük seviyelerde Gd ilavesi bile Mg-Zn-Gd üçlü fazının oluşumuna neden olarak yeniden kristalleşen tanelerin boyutunu küçültmüştür ve tekstürü azaltmıştır [20]. Şekil 2.7' de Mg- Gd faz diyagramı verilmiştir [16].



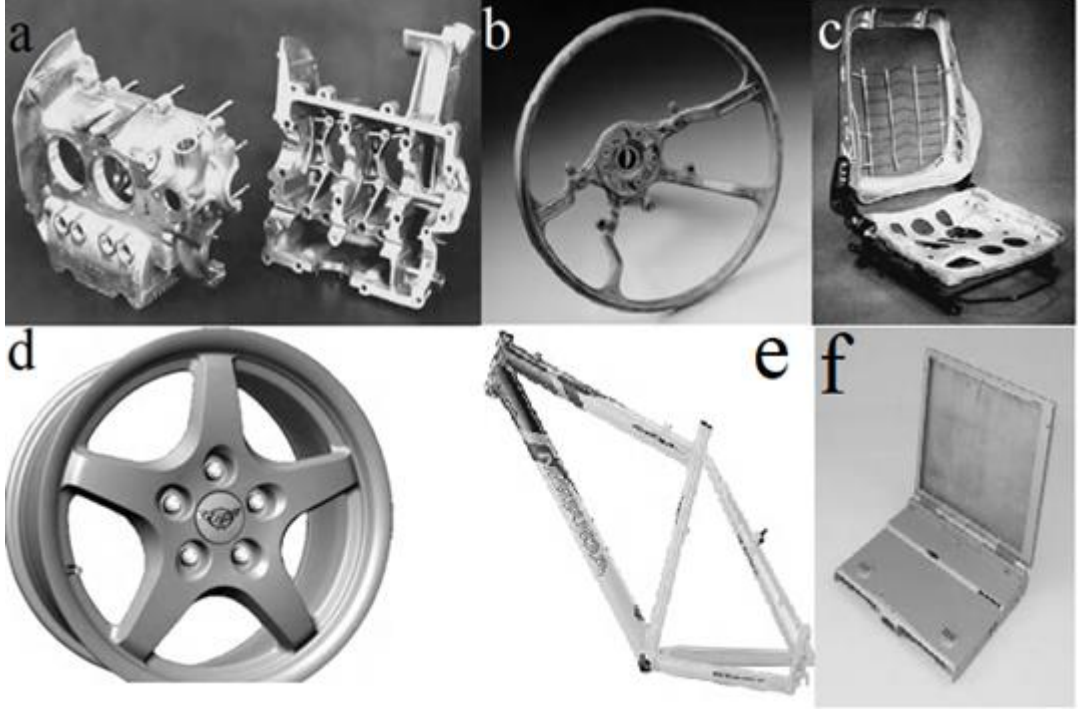
Şekil 2.7. Mg-Gd faz diyagramı.

Magnezyum içerisinde demir (Fe), nikel (Ni), bakır (Cu) ve kobaltın (Co) ağırlık %0,2' den az buldukları durumda bile korozyon direncini çok fazla düşürdüğü bilinmektedir. Bu elementler empürüte elementleri olarak bilinmektedir[9].

2.4 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Günümüz endüstrisinde magnezyum şekil verilebilirliği, iletkenlik ve düşük yoğunluğu ile hafif yapısal metal olması sebebiyle yoğun şekilde kullanılmaktadır. Magnezyum CO emisyon oranının azaltılması ve enerji sarfiyatının azaltılması amacıyla başlıca otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Magnezyum alaşımları, taşınabilir cihazlar, dizüstü bilgisayarlar, kameralar, cep telefonları, mutfak el aletleri gibi elektronik cihazlar, tenis raketleri, bisiklet çerçeveleri, okçuluk yay kolları gibi spor aletleri ve en çok uygulama alanı bulduğu otomotiv ve havacılık sektöründeki motor blokları, jantlar, gösterge panoları, direksiyon aksamları, koltuk çerçevesi, dişli kutuları gibi uygulama alanlarında kullanılmıştır [21]. Bunun yanında Magnezyum ve alaşımlarının (1,75- 1,85 g / cm³) yoğunlukları insan kortikal kemiğine (1.75 g / cm³) çok benzerken, biyomedikal titanyum alaşımı Ti6Al4V'nin yoğunluğu 4.47 g/cm³' tür. Biyoyumluluk için, magnezyum iyonları insan vücudunda büyük miktarda bulunması

belirli oranda metabolik reaksiyonlar için gerekliliği bilinmektedir. Magnezyum alaşımları, ortopedik ve kardiyovasküler implantlar için ümit verici adaylardır ve ikincil bir çıkarma ameliyatına gerek olmadığı için ilgi görmektedir [4,22]. Şekil 2.8’ de magnezyum alaşımlarının bazı kullanım alanları verilmiştir [12].



Şekil 2.8. Magnezyum otomobil parçaları a) motor parçaları, b) direksiyon iskeleti, c) koltuk iskeleti, d) jant, e) bisiklet iskeleti ve f) dizüstü bilgisayar iskeleti.

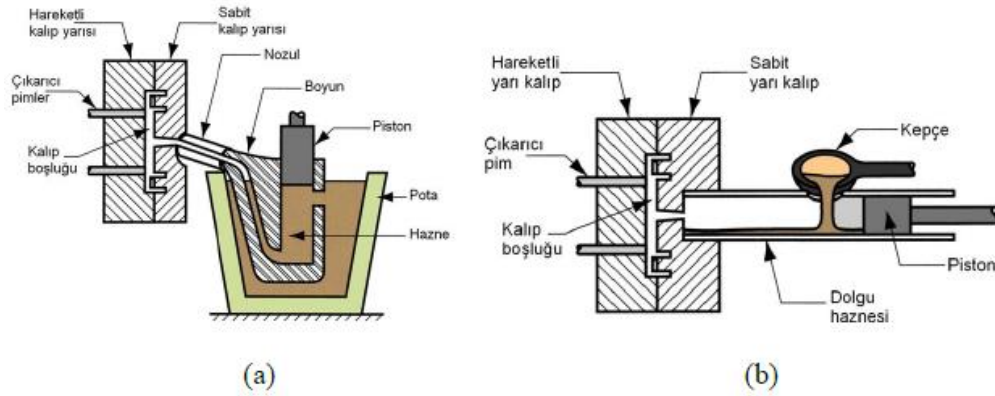
2.5 MAGNEZYUM DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Ergimiş magnezyum alaşımları yüzey oksitlenmesine karşı korumaya alınmadığında, oksitlenme ve yanma eğilimindedir. Alüminyum alaşımlarının ergiyik yüzeyinde oluşturduğu sürekli ve geçirgen olmayan oksit tabakasına benzer bir tabakayı magnezyum alaşımları oluşturmaz ve oksijenin zayıf tabakadan içeri sızmasına yol açarak yanmasına sebep olur. Bu sebeple, magnezyum alaşımlarının dökümü sırasında flaks veya koruyucu gaz (Ar, CO₂ ve SF₆) kullanılarak oksijen geçirgenliği engellenmelidir [9].

2.5.1 Yüksek Basıncılı Döküm

Yüksek basınçlı döküm, hafif metal bileşenlerin tasarımı ve üretiminde çekici bir esneklik sunar. Magnezyum alaşımlarının mükemmel kalıp doldurma özellikleri, büyük, ince duvarlı ve karmaşık dökümlerin bu işlemle ekonomik olarak üretilmesine izin verir ve çok sayıda damgalama ve kaynak parçasından oluşan çelik yapıların yerini alabilmektedir.

Magnezyum dökümler, mukavemetin önemli olmadığı alanlarda ince duvarlı, mukavemet gereksinimlerinin daha yüksek olduğu alanlarda daha kalın duvarlı olarak tasarlanabilir. Magnezyum, alüminyuma (2-2,5 mm) kıyasla daha ince duvarlarla (1-1,5 mm) dökülebilir. Temel olarak iki tür yüksek basınçlı döküm işlemi vardır. Bunlar sıcak hazneli döküm ve soğuk hazneli döküm yöntemleridir [23]. Sıcak hazneli dökümde, ergiyik metal atmosfer kontrollü çelik potanın içinde tutulur ve belli hacimdeki metal valf tarafından itilerek kalıba doldurulur. Soğuk hazneli dökümde ise sıvı metal kepçe yardımı ile hazneye alınır ve hidrolik silindir ile kalıp boşluğuna itilir. Soğuk hazneli döküm düşük maliyet ve daha ince taneli döküm parçaları sunar ve kısa çevrim süresi sayesinde ergimiş magnezyumun kalıplarla temas süresini sınırlayarak kalıp malzemesi ve hava ile reaksiyon olasılığını en aza indirir. Bu sebeple soğuk hazneli yüksek basınçlı döküm birçok ticari magnezyum alaşımlarının dökümünde kullanılmaktadır [9]. Şekil 2.9 ' da yüksek basınçlı döküm yöntemlerinin görseli verilmiştir [9].



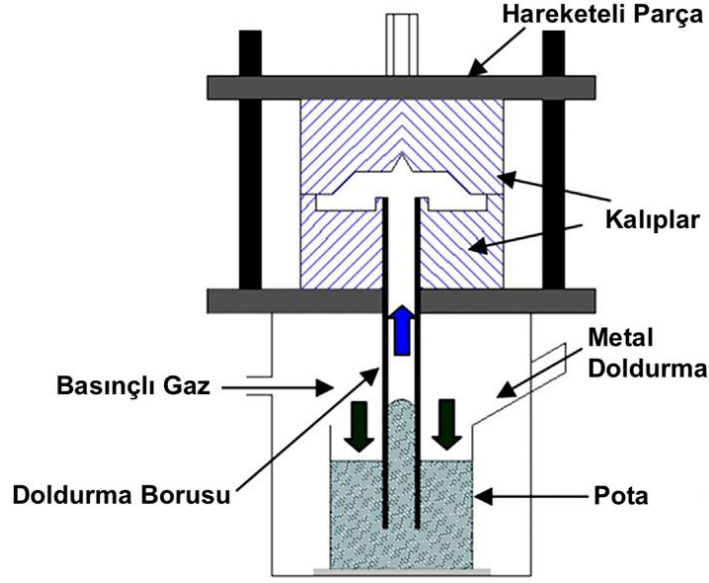
Şekil 2.9. Yüksek basınçlı döküm yöntemleri. a) sıcak hazneli ve b) soğuk hazneli.

2.5.2 Gravite Döküm

Mevcut magnezyum parçalarının üretimine, yüksek üretkenliği ve magnezyum alaşımlarının mükemmel kalıp dökülebilirliği nedeniyle yüksek basınçlı döküm yöntemleri hakim olsa da, çeşitli yapısal uygulamalarda yerçekimi etkisinin kullanıldığı yöntem kullanılmaktadır. Kum kalıba döküm ve kokil kalıba döküm bu kategoriye girmektedir. Kokil kalıba dökümü, kum kalıba dökümden ayıran tek özellik döküm kalıbının metal olmasıdır. Magnezyum alaşımlarının kokil kalıba dökümü daha iyi yüzey kalitesi, daha iyi boyutsal kontrol ve daha iyi mekanik özellik sunduğundan kum kalıba göre daha avantajlıdır. Kalıplar döküm sırasında oksijeni engellemek için koruyucu gaz altında olmalıdır [9,23].

2.5.3 Düşük Basınçlı Döküm

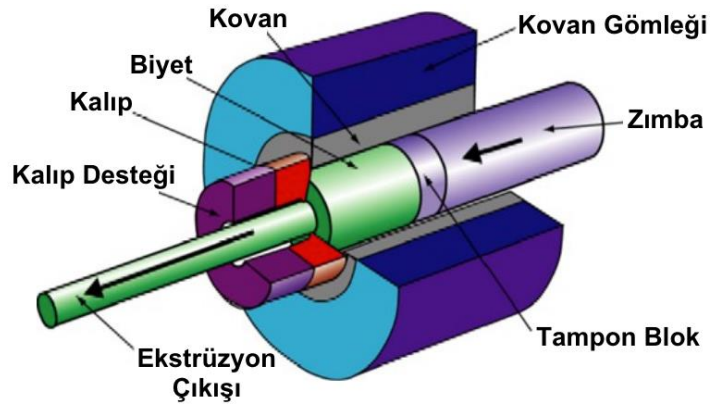
Bir düşük basınçlı döküm makinesi genellikle, potadan kalıbın altına uzanan bir besleme tüpü (yükseltici tüp) ile kalıp tablasının altına yerleştirilmiş basınçlı bir pota içerir. Potanın bulunduğu haznedeki basınç, ergiyik magnezyumu besleyici görevi gören kanaldan yukarı doğru iterek kalıbın içine dolmasını sağlar. Dış basınç, döküm tamamen katılaştıktan sonra serbest bırakılır. Besleme sisteminin uygun tasarımıyla, besleme borusundaki metal hala erimiş haldedir ve potaya geri akar. Bu yöntem ile düşük gözenekli ve yarı otomatik şekilde magnezyum alaşımlarının üretimi mümkün olup ve çok yüksek döküm kalitesi, yüksek verimlilikte elde edilebilir. Yüksek basınç ile elde edilemeyen oyuk dökümler düşük basınçlı döküm yöntemi ile üretilebilir. Düşük basınçlı döküm yönteminde 3 mm' den ince parçaların üretimine uygun değildir [9,23]. Şekil 2.10' da düşük basınçlı döküm yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [9].



Şekil 2.10. Düşük basınçlı döküm yöntemi.

2.6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI EKSTRÜZYON İŞLEMLERİ

Magnezyum alaşımları plastik şekil değişimleri için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar sıcak haddeleme, sıcak ekstrüzyon, dövme gibi işlemlerdir. Ekstrüzyon, basma kuvveti ile bir biyetin kendi kesit alanından daha küçük bir kesit alanına sahip bir kalıp boşluğundan geçirilerek plastik şekil verilmesi işlemidir. Ekstrüzyon teknik ve ekonomik avantajların dışında geniş bir ürün üretme yelpazesi ile en önemli termo mekanik proseslerden biridir. Şekil 2.11’ de ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi verilmektedir [9].



Şekil 2.11. Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi.

Magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon işlemleri sırasında malzemenin mikroyapı, tekstür ve mekanik özelliklerini belirleyen bazı değişkenler vardır. Bunlar ekstrüzyon hızı, ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon oranıdır [9].

2.6.1 Ekstrüzyon Hızı

Magnezyum alaşımları normalde 300–450 °C sıcaklıklarda ekstrüze edilir ve bu sıcaklıklarda bile elde edilebilen ekstrüzyon hızları, alüminyum alaşımları ile elde edilebilenlerin çok altında, yalnızca 0,5–2,5 m/dak. Aralığındadır [8]. Magnezyum alaşımlarında ekstrüzyon hızı üretim verimliliğini doğrudan etkilediği için en önemli parametredir. Üretim maliyeti açısından önemli parametrelerden biridir. Malzemenin ekstrüze edilebilirlik özelliği ekstrüzyon hızı ile ölçülür. Ekstrüzyon hızı alaşımın içeriği, kalıntı gerilme, ilk tekstür ve mikroyapı özellikleri ile ilişkilidir.

2.6.2. Ekstrüzyon Sıcaklığı

Magnezyum alaşımlarının oda sıcaklığında kayma mekanizmalarının aktif olmamasından sebebiyle gösterdiği zayıf şekillenebilirlik özelliğinden dolayı yüksek sıcaklıklarda ekstrüze edilir. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon daha kolay olmakta ve yeniden kristalleşme, toparlanma gibi mekanizmalarda aynı anda gerçekleşebilmektedir. Bu mekanizmalar sayesinde daha düşük ekstrüzyon basınçlarında işlem yapılabilir. Ekstrüzyon sıcaklığı ile yeniden kristalleşmiş tane oranı ve boyutu ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir [24]. Çok yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları, çoğunlukla işleme sırasında hızlı tane büyümesinin bir sonucu olarak, ekstrüzyonla daha düşük mukavemetlere yol açar [8]. Ekstrüzyon sıcaklığı malzemenin mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli etkenlerden biridir.

2.6.3. Ekstrüzyon Oranı

Ekstrüzyon oranı, biyetin kesit alanının, ekstrüzyon ürününün kesit alanına oranlanması ile hesaplanır. Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon sırasında yapılan mekanik işin miktarını gösterir. Ekstrüzyon oranı ile plastik gerinim arasında doğru orantılı ilişki vardır. Ekstrüzyon oranı arttıkça yüksek gerinim, düştükçe de düşük plastik gerinim oluşmaktadır. Ekstrüzyon oranının, son ürünün tane boyutuna etkisinde

önemli etkenlerden birisidir. Ekstrüzyon oranının düşük olması kaba taneli ve zayıf bir yapı oluşmasına sebep olmaktadır ve döküm yapısına benzer özellikler göstermektedir. Ekstrüzyon işleminde ekstrüzyon oranı 10' dan daha küçük olduğunda hedeflenen mekanik ve fiziksel özellikler elde edilemez [9,17].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada magnezyuma belirlenen oranlarda Gd, Zn, Ca ilaveleri yapılarak indüksiyonla ergitme yöntemi ile üretimleri yapılmıştır. Döküm sonrası homojenizasyon ısıl işleme tabi tutulmuş ve dört farklı sıcaklıkta ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen alaşımların döküm, homojenleştirme ve ekstrüzyon sonrası mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon davranışları incelenmiştir.

3.1 ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ

3.1.1 Döküm Yöntemi

Nominal bileşimi Mg-2Gd-2Zn-0.2Ca-0.1Zr (%ağırlıkça) olan ve aynı zamanda bu çalışmada GZX220 olarak gösterilen alaşım, çelik bir sabit kalıba dökülerek imal edilmiştir. Döküm işleminde, ilk olarak saf Mg külçeleri (%99,9 saflık) 750 °C' de indüksiyon fırınında eritilmiştir. Daha sonra Mg-25Gd, Mg-30Zr ve Mg-25Ca master alaşımları ve saf Zn parçaları (%99,8 saflıkta) eriyiğe ilave edilmiştir. Bileşimsel homojenliği sağlamak için 15 dakika boyunca mekanik bir karıştırma uygulanmıştır. Daha sonra eriyiğin sıcaklığı 720 °C' ye düşürülmüş ve hemen 200 °C' de önceden ısıtılmış silindirik çelik bir kalıba dökülmüştür. Nihai döküm ürünün boyutu 42 mm çapında ve 320 mm uzunluğundadır. Eritme ve dökme işlemleri sırasında ergiyik yüzeyine sürekli olarak koruyucu bir gaz karışımı (CO₂+%1SF₆) uygulanmıştır. Böylelikle ergiyikte yanma veya oksitlenmelerin önüne geçilmiştir.

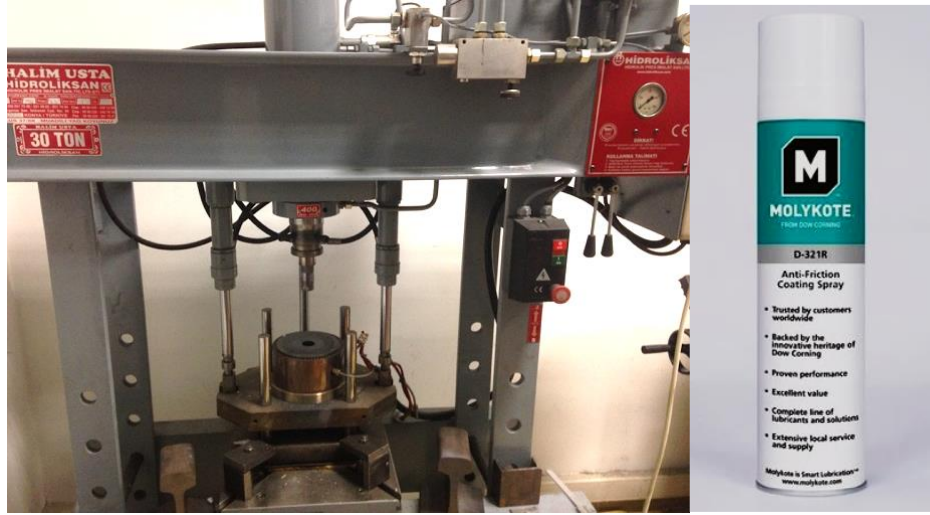
3.1.2 Homojenleştirme

Döküm işleminden sonra termal kararlılığı düşük ikincil fazların matris içerisinde çözünmesini sağlamak ve mikrosegregasyonları engellemek için ekstrüzyon işlemi öncesi alaşım homojenleştirme ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Alüminyum folyoya sarılan ingotlar SiO₂+Grafit kumu içerisine yerleştirilerek 24 saat boyunca 400 °C'de bekletilmiştir. Homojenleşmiş yapıyı korumak amacıyla fırından çıkartılıp hemen soğuk suya daldırılarak soğutulmuştur.

3.1.3 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işlemi hidrolik pres yardımı ile yapılmıştır. Ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıplar kelepçe rezistans ile ısıtılmıştır. Sıcaklık kontrolü pres makinesine bağlı ünite ile gerçekleştirilmiş emin olmak için kızıl ötesi lazer termometre ile de kontrol edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon işleminde ısıya dayanıklı Molykote marka MoS₂ bazlı spreysel kalıp yağlayıcısı kullanılmıştır. Ekstrüzyon işlemi için kullanılacak biletler torna tezgahında 32mm çapında ve 30 mm boyunda hazırlanmıştır.

Kalıp ve numune istenilen sıcaklığa geldikten sonra zımbanın 0.3 mm/s hızla aşağı yönlü baskı hareketi ile 32 mm çaptaki silindir parçaları ekstrüzyon ile 10 mm çapa indirmiştir. Ekstrüzyon işleminde 10:1 ekstrüzyon oranı uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Ekstrüzyon cihazı ve ekstrüzyon işleminde kullanılan yağlayıcı.

3.2 ALAŞIMLARIN KARAKTERİZASYONU

Magnezyum alaşımlarının döküm sonrası, homojenleştirme ısıl işlemi sonrası ve ekstrüzyon işlemleri sonrasında mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Basma- çekme ve korozyon deneyleri bütün numuneler için uygulanmıştır.

3.2.1 XRF Analizi

Üretilen alaşımların döküm sonrası kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için XRF (X- Işınları Floresans) yöntemi ile Rigaku ZSX Primus II marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde floresans adı verilen ve her bir element için farklı dalga boylarına sahip ikincil ışımalarından faydalanılarak elementlerin ağırlık oranları tespit edilmiştir. Elde edilen XRF analiz sonuçları Çizelge 3.1' de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Üretilen alaşımın XRF sonuçları

Alaşım	Kompozisyon (ağırlık %)				
	Zn	Gd	Ca	Zr	Mg
GZX220	2,23	2,21	0,19	0,12	Kalan

3.2.2. Mikroyapı Karakterizasyonu

Üretilen magnezyum alaşımlarının mikroyapı görüntüleri optik mikroskop ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir. Bileşen fazların tayini için XRD (X- Işınları Kırınımı) yöntemi kullanılmıştır.

3.2.2.1 XRD Analizi

Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerde bulunan fazlar Rigaku Ultima IV X-ışını difraktometresi (XRD) ile 2 °/dakika tarama hızında ve 20° ila 80° tarama açısında analiz edilmiştir. Tespit edilen XRD profilleri standart kartlar ile karşılaştırılarak yapıda bulunan fazlar tespit edilmiştir.

Homojenleştirilmiş ve ekstrüzyona uğramış numunelerin makrotekstür ölçümleri de XRD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel kesitlerinden alınmıştır. Numunelerin (0002), (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) düzlemlerinden alınan ham veriler MATLAB ile yeniden hesaplanarak pole figure haritaları oluşturulmuştur.

3.2.2.2 DSC Analizi

Döküm numunesindeki bileşen fazların termal kararlılıkları, 10 °C/dakika tarama hızına sahip HITACHI DSC7000 serisi cihaz kullanılarak diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ile analiz edilmiştir.

3.2.2.3 Metalografik İncelemeler

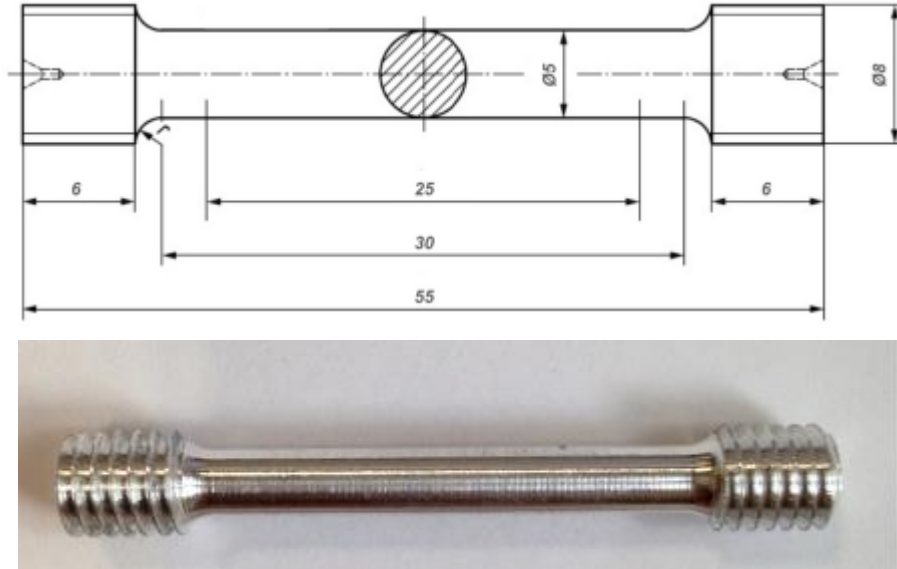
Döküm sonrası, homojenleştirme ısıl işlemi ve ekstrüzyon işleminden sonraki bütün numuneler Nikon marka optik mikroskop ve EDX (enerji dağılımlı spektroskopi) donanımlı Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka SEM cihazı kullanılarak alınmıştır. Bütün numuneler görüntü alma öncesi uygun boyutlarda kesilmiş ve epoksi reçine ile bakalite alınmıştır. Daha sonra Mikrotest marka cihaz ile standart metalografik prosedürler uygulanarak dağlama işlemi için hazır hale getirilmiştir. Dağlama işlemi 6 gr pikrik asit, 5 ml asetik asit, 10 ml saf su ve 100 ml etil alkol karışımı kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu ve hacimsel oran hesaplamaları için ImageJ uygulaması kullanılmıştır.

3.2.3 Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu

Döküm sonrası, homojenleştirilmiş ve ekstrüzyon işlemleri sonrasında tüm numunelerin çekme ve basma deneyleri ile mekanik özellikleri tayin edilmiştir.

Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüzyon sonrası çekme numuneleri ISO 6892-1 standartlarına göre hazırlanmıştır [9]. Döküm ve homojenleştirme işlemleri sonrasındaki ingotlar 4 eşit parçaya bölünerek her çeyrekte bir çekme numunesi çıkarılmıştır. Ekstrüzyon numuneleri ekstrüzyon yönüne paralel şekilde direkt olarak işlenmiştir. Çekme ve basma testleri oda sıcaklığında Zwick/Roell Z600 çekme cihazında $1,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinme hızında gerçekleştirilmiştir. Her numuneden en az 3 adet test yapılmıştır. Çekme testine kullanılan numunelere ait ölçüler Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Basma testleri için 10 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Çekme testi numunesi.

3.2.4. Korozyon Özelliklerinin Karakterizasyonu

Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüzyon sonrası numunelerin korozyon özelliklerinin belirlenmesi daldırma korozyon testi ve elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Bütün numuneler 2500 numaralık zımparaya kadar zımparalanmış ve testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.1. Daldırma Korozyon Testi

Daldırma testi için numuneler 10 mm çapında ve 10 mm boyunda silindirik numuneler metalografik prosedürlere göre hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler ultrasonik cihaz içerisinde saf su ile temizlenmiştir. Numunelerin yüzey alanları hesaplanıp, daldırma öncesi 0,0001 gr hassasiyetli hassas tartıda ilk ağırlıkları ölçülmüştür. Cam kavanozlara eşit olarak konulan %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde file yardımı ile numuneler asılı kalarak daldırılmıştır. Daldırılan numuneler 48. saatte çıkarılarak yüzeydeki korozyon ürünleri 180 gr/L oranında saf su içerisinde hazırlanan kromik asit içerisinde 10 dakika bekletilerek temizlenmiştir. Numuneler daha sonra alkol ile temizlenip ağırlıkları ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Her numuneden en az üçer tane daldırma testi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. 48. saat sonunda bütün numunelerin yüzeylerin görüntüleri SEM ile alınıp, korozyon mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir.

3.2.4.2 Potansiyodinamik Polarizasyon Testi

Potansiyodinamik polarizasyon testi için alınan döküm ve homojenleştirilmiş numuneler ingot haldeki malzemelerin orta kesitinden alınmış, ekstrüzyon işlemini tabi tutulan numuneler için ekstrüzyon yönüne paralel kesitten olacak şekilde numuneleri alınmıştır. Numuneler bakır tele sarılıp epoksi reçine içine gömülmüştür. Test edilecek yüzeyler zımparalanıp temizlendikten sonra 0,25 cm² lik alan açık kalacak şekilde güçlü bir bant ile yapıştırılmış, korozyon testine olumsuz etkiler giderilmiştir. Korozyon deneyi %3,5 NaCl içerisinde bilgisayar kontrollü DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat ile

yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri, 1 mV.s^{-1} tarama hızında, $-0,5 \text{ V}$ (vs. açık devre potansiyeli, E_{oc}) $+0,5 \text{ V}$ (vs. E_{oc}) aralığında tarama ile oluşturulmuştur. Korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testleri, 10^5 Hz ile 0.01 Hz frekans aralığında ve 10 mV sinüzoidal voltaj genliği ile gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 4

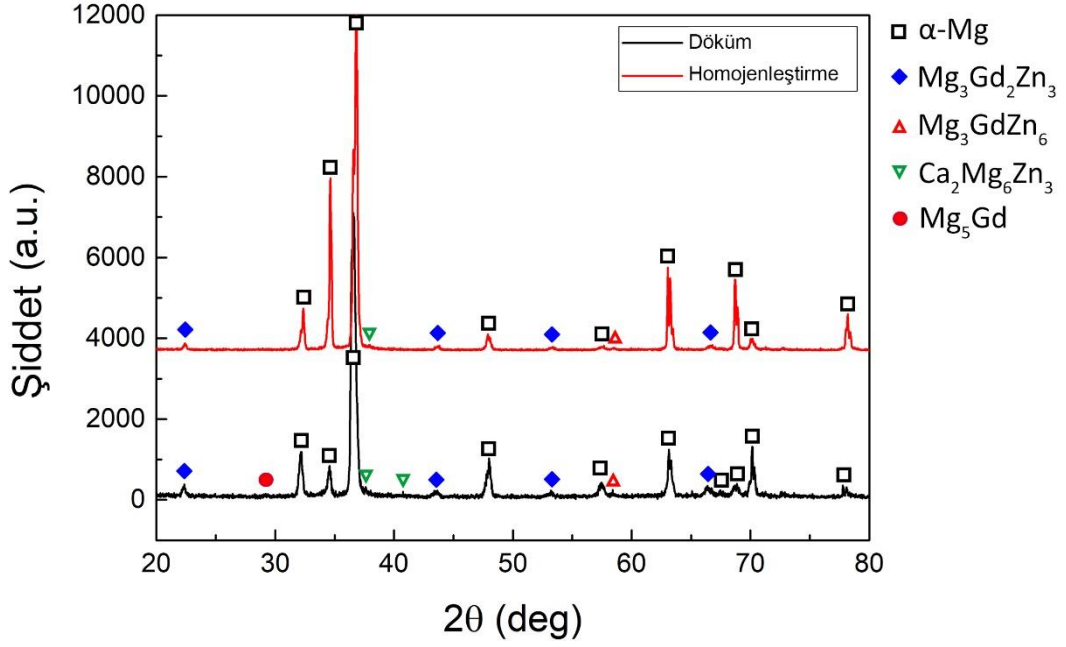
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONLAR

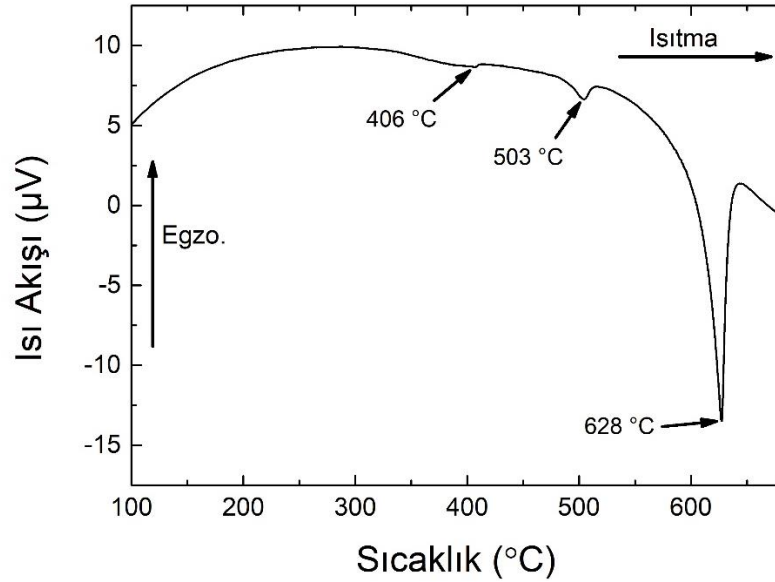
4.1.1 Döküm ve Homojenleştirilmiş Alaşımların Mikroyapısı

Şekil 4.1' de döküm ve homojenleştirilmiş GZX220 alaşımının XRD sonuçları göstermektedir. Döküm halindeki alaşımda α -Mg, $Mg_3Gd_2Zn_3$ (W-fazı olarak da belirtilir), $Ca_2Mg_6Zn_3$ ve Mg_5Gd fazlarına ait pikler görülmüştür. Mg-Zn-Gd sistemlerinde Zn ve Gd'nin bileşimine bağlı olarak W-fazı ($Mg_3Gd_2Zn_3$, kübik yapı), I-fazı (Mg_3Zn_6Gd , ikosahedral kuasikristal yapı) ve X-fazı olmak üzere üç tip üçlü faz oluşabilmektedir (LPSO yapısı ile $Mg_{12}ZnGd$) [25–27]. Zn' nin Gd' ye atomik oranı 1,5' ten az olduğunda, sadece kübik yapıli W-fazının oluştuğu, bunun üzerinde I-fazlı üçlü bileşimin de düşük fraksiyonlarda oluştuğu bildirilmiştir [28]. Bu çalışmada Zn/Gd'nin atom oranı 2,4 civarındadır. Bu nedenle, önemli miktarda I-faz oluşumu beklenmemelidir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi XRD sonuçlarında I fazına ait düşük yoğunluklu bir pik gözlemlenmiştir. Homojenizasyon işleminden sonra, $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazı için pikler önemli bir azalma gösterirken W-fazı için pikler neredeyse bozulmadan kalmıştır. Bu durum $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazının termal kararlılığının W fazından daha düşük olduğunu göstermiştir. Döküm alaşımındaki fazların geçiş sıcaklıkları DSC ölçümü ile analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.2' de sunulmuştur. Döküm halindeki alaşımın 406 °C, 503 °C ve 628 °C' de üç farklı endotermik pik sergilediği görülebilir. 400 °C' de homojenizasyon sırasında $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazının önemli miktarda çözünme gösterdiği göz önüne alındığında, 406 °C' deki geçiş piki $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazına karşılık gelmektedir.

Ayrıca, W-fazının 503 °C' de bir geçiş gösterdiği ve alaşımın erime noktasının 628 °C olduğu Şekil 4.2' den çıkarılabilmektedir. Bileşen fazların benzer termal özellikleri önceki çalışmalarda bildirilmiştir [29–31].

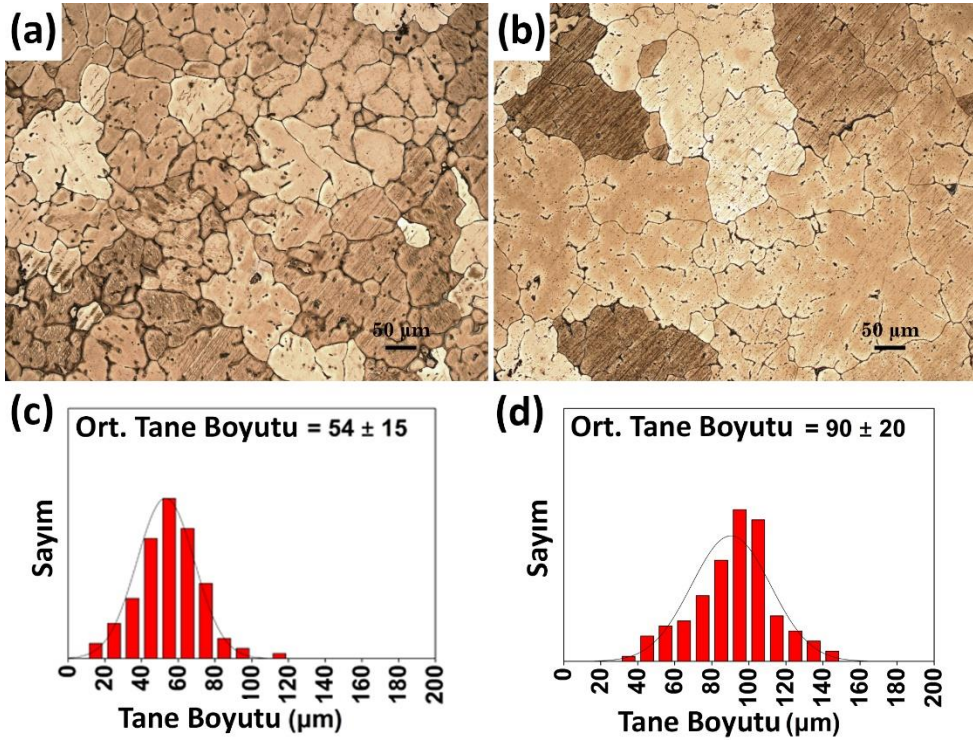


Şekil 4.1. Döküm ve homojenleştirilmiş numunelerin XRD sonuçları.



Şekil 4.2. Döküm numunesinin DSC sonucu.

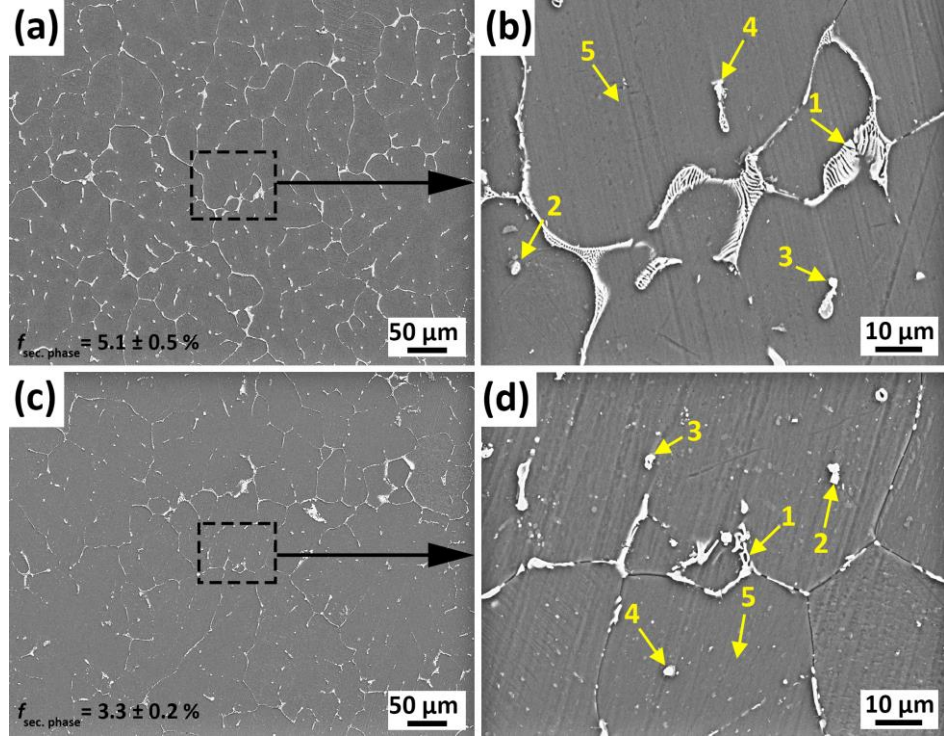
Döküm ve homojenleştirilmiş GZX220 alaşımının optik mikroyapıları Şekil 4.3(a-b)' de gösterilmektedir. Dökme alaşımın mikroyapısı, çoğunlukla tane sınırları boyunca dağılmış olan α -Mg taneciklerinden ve ikinci faz parçacıklarından oluşmuştur. İkinci faz parçacıkları, mikroyapı boyunca yarı sürekli bir ağ sergilemiştir. 400 °C' de homojenleştirme işleminden sonra, ikincil faz partikülleri, matris fazı boyunca kısmen çözülmüştür. Optik mikroyapılara göre döküm ve homojenleştirilmiş alaşımların tane boyutu dağılım histogramları da Şekil 4.3 (c-d)' de sunulmaktadır. Ortalama tane boyutu 54 μm ' den 90 μm ' ye bir artış göstermiştir.



Şekil 4.3. (a,c) döküm ve (b,d) homojenize numunelerin optik mikrografları ve tane boyutu dağılımları.

Şekil 4.4' te döküm ve homojenleştirilmiş GZX220 alaşımının SEM mikroyapıları göstermektedir. Şekil 4.4 'te gösterilen noktaların EDX analizleri de Çizelge 4.1' de verilmiştir. Döküm halindeki alaşımdaki ikincil faz partikülleri, küresel, şerit benzeri ve lamel benzeri gibi çeşitli morfolojiler sergilemiştir. Döküm alaşımında 1 ile gösterilen ötektik lamel benzeri ikincil fazın EDX analizleri, bu fazların Mg, Zn ve Gd açısından zengin olduğunu ve atomik oranlarının $\text{Mg}_3\text{Gd}_2\text{Zn}_3$ ' ye yakın olduğunu ortaya koymuştur. 2 ile işaretlenmiş küresel ikinci faz, benzer miktarlarda Mg, Zn ve

Gd içermektedir. Böylece, bu küresel faz da muhtemelen $Mg_3Gd_2Zn_3$ fazını temsil etmektedir. 3 sayısı ile gösterilen kısa çubuksu faz ise esas olarak Mg, Zn ve Ca elementlerinden oluşmuştur. Bu atomik oranların $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazındaki oranlara çok yakın olduğu gözlemlenmiş, bu da $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazlarının esas olarak düşük fraksiyonlu ayrık ve kısa çubuk benzeri parçacıklar olarak mevcut olduğunu göstermiştir. 4 numara ile işaretlenmiş şerit benzeri faz, daha düşük miktarlarda Zn ve Gd ile birlikte yüksek konsantrasyonda Mg içermektedir. Bu fazın ne $Mg_3Gd_2Zn_3$ fazı ile, ne de Mg_3Zn_6Gd fazı ile uyumlu olmadığı görülmüştür. Bu fazdaki yüksek Mg miktarının, elektron demetinin Mg matrisinden geçmesine izin veren partikülün düşük kalınlığından kaynaklandığı düşünülmüştür. Homojenizasyon işleminden sonra ikinci fazların miktarı $1,8 \mu m$ 'lik bir azalma göstermiştir. İkinci evrelerin morfolojileri de değişim göstermiştir. Örneğin, döküm halindeki alaşımdaki lamel benzeri ötektik yapı, iskelet benzeri morfolojiye dönüştürülmüş ve kalın şerit benzeri parçacıklar, kısmi çözünme nedeniyle ya ince çubuklar ya da ayrık minik parçacıklar haline gelmiştir. Homojenleştirilmiş alaşımın EDX analizleri sırasında, XRD ve DSC sonuçlarını doğrulayan $Ca_2Mg_6Zn_3$ fazına dair hiçbir kanıt bulunamamıştır. Homojenleştirilmiş alaşımda 1, 3 ve 4 ile işaretlenen noktalar, döküm alaşımında bulunan $Mg_3Gd_2Zn_3$ fazları ile benzer konsantrasyonlarda Mg, Zn ve Gd göstermiştir. Önceki çalışmalar ayrıca Mg–Zn–Gd fazlarının oluşumunu ve homojenizasyon sırasında yüksek termal kararlılıklarını bildirmiştir [32–34]. Farklı olarak, 2 ile işaretlenmiş keskin köşeleri olan küçük parçacık yalnızca Mg ve Gd açısından zengindir ve bu da Mg-Gd ikili faz oluşumunu göstermiştir. Mg' nin Gd'ye atomik oranının Mg_5Gd fazıninkine yakın olduğu görülmüştür. Mg-Zn-Gd bazlı alaşımlarda benzer Mg_5Gd fazı oluşumları başka çalışmalarda da rapor edilmiştir [35,36].



Şekil 4.4. (a,b) döküm ve (c, d) homojenize numunelerin SEM mikroyapıları.

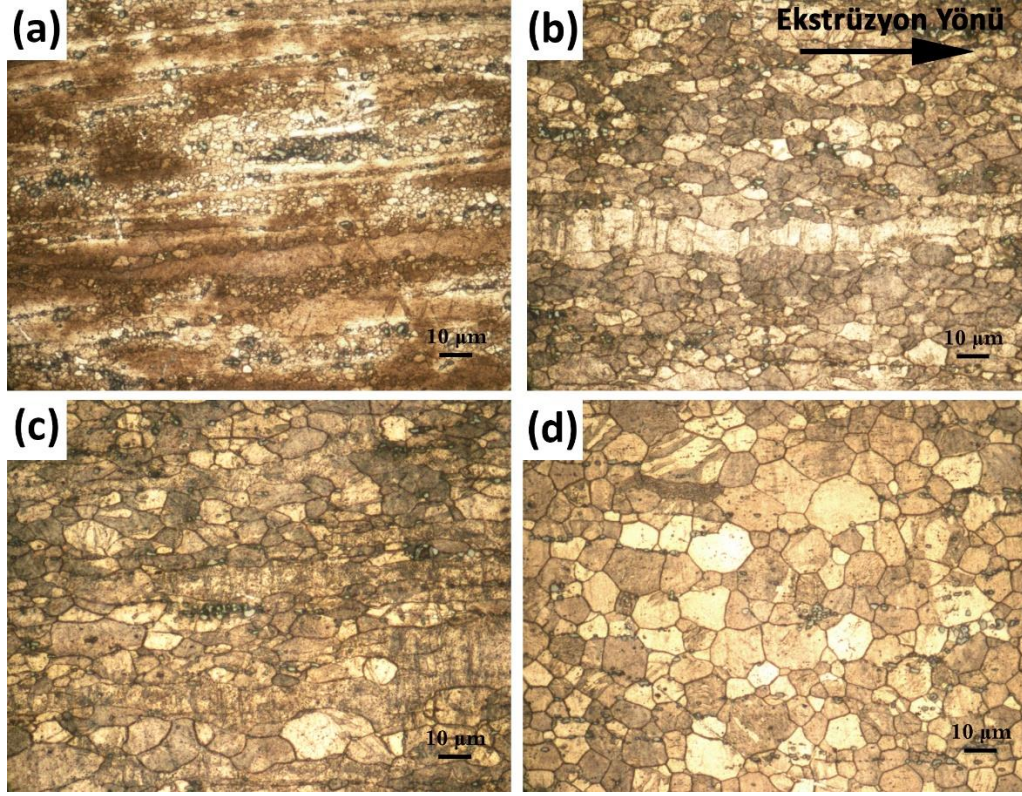
Çizelge 4.1. Şekil 4.4' te belirtilen noktaların EDX sonuçları.

Numune	Spektrum	Elementler									
		Mg		Zn		Gd		Ca		Zr	
		ağ%	at%	ağ%	at%	ağ%	at%	ağ%	at%	ağ%	at%
Döküm	1	15,5	36,6	55,6	48,7	24,6	8,9	4,2	5,7	0,1	<0,1
	2	22,6	46,5	50,0	38,3	20,4	6,5	7,0	8,7	-	-
	3	30,6	51,8	50,1	31,6	4,2	1,1	15,1	15,5	-	-
	4	42,8	69,5	39,7	24,1	14,3	3,6	2,9	2,6	0,3	0,1
	5	96,2	98,6	2,4	0,9	0,8	0,1	0,5	0,3	0,1	<0,1
Homojenleştirilmiş	1	20,1	44,5	56,6	46,6	22,3	7,7	0,8	1,1	0,2	0,1
	2	32,7	69,7	6,3	5	53,2	17,5	4,6	6,1	3,2	1,7
	3	14,2	35,6	57,7	53,4	27,8	10,6	0,3	0,5	-	-
	4	11,3	29,2	62,3	59,9	26,1	10,4	0,3	0,5	-	-
	5	94,9	98,2	3,1	1,2	1,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,1

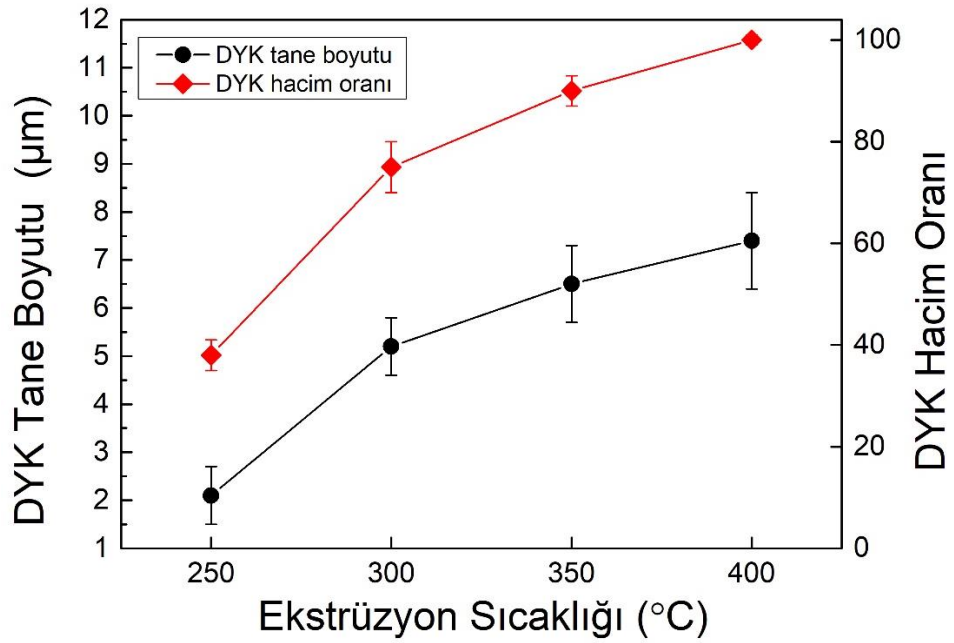
4.1.2 Ekstrüzyon Sonrası Alaşımların Mikroyapısı

Çeşitli sıcaklıklarda ekstrüze edilen GZX220 alaşımının ekstrüzyon yönüne paralel yüzeylerin tane sınırlarını gösteren optik mikroyapıları Şekil 4.5' te verilmiştir. Şekil 4.3' te gösterildiği gibi döküm ve homojenleştirilmiş numunelerin mikroyapıları ile karşılaştırıldığında, ekstrüzyon işlemi, tüm ekstrüzyon sıcaklıklarında dinamik

yeniden kristalleştirme (DYK) mekanizması sayesinde önemli ölçüde bir tane inceltme ve ekstrüzyon yönü boyunca parçalanıp dağıtılmış ikinci faz parçacıklarının varlığı ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, düşük ekstrüzyon sıcaklıklarında ekstrüze edilen alaşımın tane yapısı, ince DYK' ya uğramış tanelerden ve kaba DYK olmayan tanelerden oluşan iki modlu bir tane yapısı olarak görülmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığının artması ile bu iki modlu yapı giderek tamamen DYK' lı tane yapısına dönüşmüş ve tek modlu bir mikroyapı sergilemiştir. DYK' ya uğramış tanelerin hesaplanan hacim fraksiyonları ve bu tanelerin ortalama boyutları Şekil 4.6' da gösterilmektedir. Açık ki, artan ekstrüzyon sıcaklığı, DYK' ya uğramış tane boyutunda bir artışa yol açmış, aynı zamanda DYK oranını da iyileştirmiştir. 250 °C' de ekstrüze edilen alaşım, çok ince eş eksenli DYK' lı tanelerden (~2,1 µm) ve ekstrüzyon yönü boyunca uzatılmış DYK' lı olmayan tanelerden oluşan iki modlu bir tane dağılımı sergilemiştir. 250 °C' de ekstrüze edilen alaşımında DYK uygulanmış tanelerin hacim oranı da ~%38 olarak hesaplanmıştır. Ekstrüzyon sıcaklığı 400 °C' ye ulaştığında, DYK tane boyutu ve bunların hacim oranı sırasıyla ~7,4 µm ve %100' e yükselmiştir. Ekstrüzyon sıcaklığının DYK mekanizması üzerindeki etkisi önceki birkaç çalışmanın konusu olmuştur,. Shahzad ve Wagner [37], düşük ekstrüzyon sıcaklıklarında ince DYK tanelerin ikiz arayüzlerde yeni tanelerin çekirdeklenmesinden kaynaklandığını, yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarının ise orijinal tane sınırlarında yeni tanelerin çekirdeklenmesine yol açabileceğini bildirmiştir. DYK, termal olarak aktive edilmiş bir metalurjik fenomen olduğundan, artan ekstrüzyon sıcaklığı bu çalışmada DYK oluşumunu desteklemiştir. Öte yandan, aşırı deformasyon sıcaklığı, tane sınırlarında hızlandırılmış atomik difüzyon nedeniyle istenmeyen tane irileşmesine neden olabilmektedir [38]. Bu nedenle, 400°C' de ekstrüze edilmiş alaşımdaki DYK tane boyutu ve tanelerin hacim oranı, 250 °C' de ekstrüze edilmiş alaşımdakine kıyasla gözlenenlerden çok daha büyük olduğu görülmüştür.

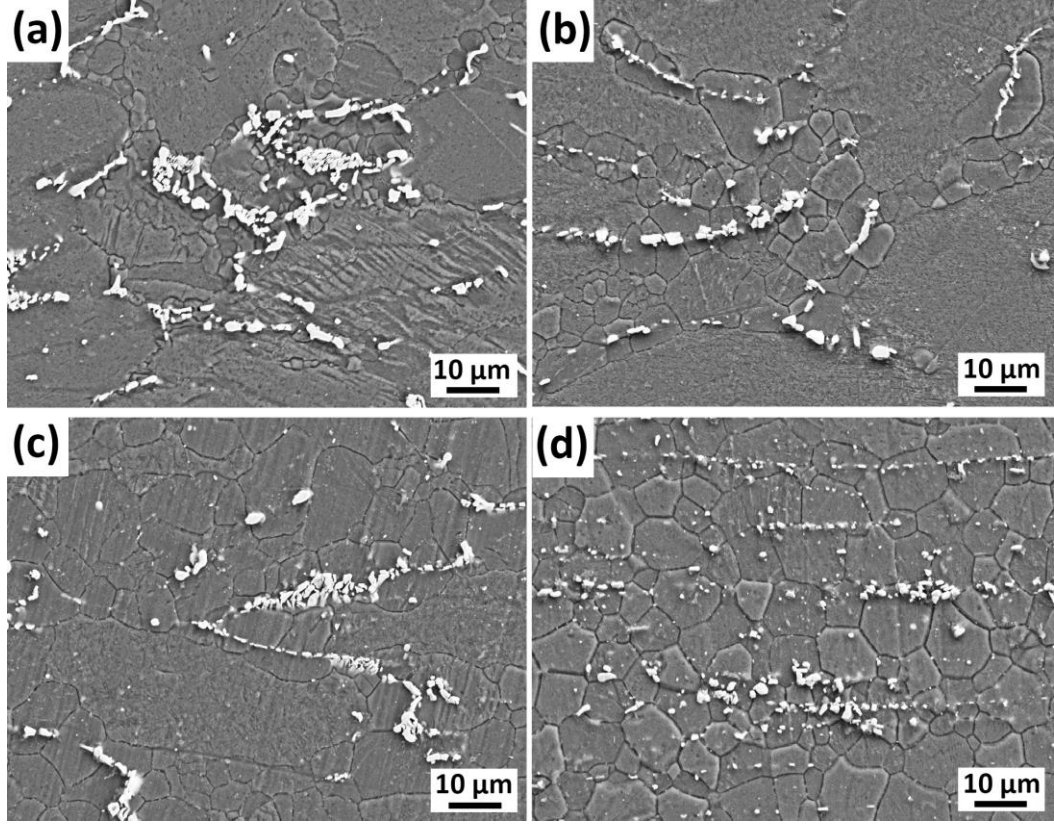


Şekil 4.5. (a) 250 °C, (b) 300 °C, (c) 350 °C ve (d) 400 °C'de ekstrüzyona uğramış alaşımların optik mikroyapıları.

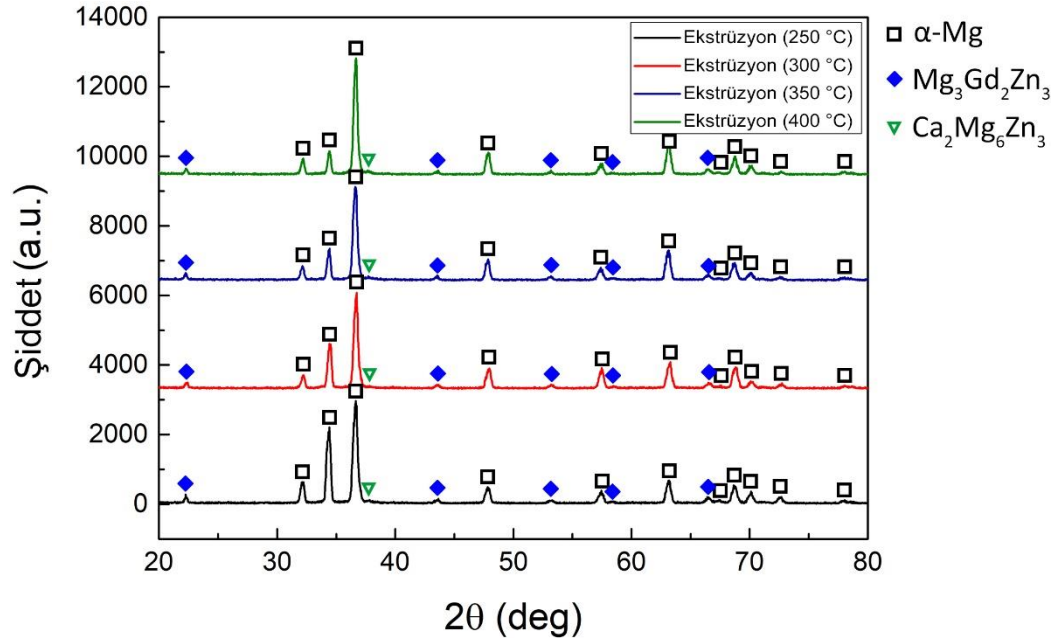


Şekil 4.6. Ekstrüzyon sıcaklığının bir fonksiyonu olarak DYK' ya uğramış tanelerin hacim oranı ve ortalama boyutu.

Şekil 4.7' de çeşitli sıcaklıklarda ekstrüze edilmiş GZX220 alaşımının SEM mikroyapıları sunulmuştur. Kırık ikincil faz parçacıklarının dağılımı şekillerde açıkça görülebilmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığı arttıkça, ikincil faz partikülleri daha ince görünmektedir ve ekstrüzyon yönü boyunca daha düzenli bir şekilde yönlendirilmiş konumdadır. Bu muhtemelen, ek ısı üretimi ile ilk ekstrüzyon sıcaklığında daha fazla artışın meydana geleceği yüksek sıcaklıklı ekstrüzyonlar sırasında ikinci faz parçacıklarının kısmen çözünmesinden kaynaklanmaktadır [39,40]. Ayrıca, özellikle 250 °C ve 300 °C' de ekstrüze edilen alaşımlarda, DYK' lı tanelerin çoğunluğu tercihen ikinci faz partikülleri etrafında oluşmuştur ve ekstrüzyon sıcaklığı daha da arttıkça DYK mikroyapı boyunca daha homojen hale gelmiştir. İkincil faz partikülleri, partikül boyutuna bağlı olarak partikül uyarımlı çekirdeklenme (PSN) olarak da bilinen mekanizma sayesinde DYK' yı ya teşvik eder ya da DYK sırasında tane büyümesini Zener pinning etkisi ile önleyerek DYK oluşumunu da geciktirebilir [41]. PSN etkisi, partikül çapı 1 µm' den büyük olduğunda ve Zener pinning etkisi mikroyapıda 1 µm' den küçük partiküller bulunduğunda meydana gelir. Şekil 4.7' deki parçalanmış ve hizalanmış ikinci faz parçacıklarının çoğu 1 µm' den daha büyüktür ve bu nedenle PSN ekstrüze edilmiş alaşımlardaki ana mekanizma olup, bu partiküller sayesinde DYK oluşumu hızlanmıştır. Bununla birlikte, yukarıda belirtildiği gibi, PSN' nin verimi, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile düşüyor gibi görünmektedir. Bu, PSN ile deformasyon sıcaklığı ve gerinim hızının kombinasyonunu temsil eden Zener-Hollomon parametresi (Z) arasındaki ilişki ile açıklanabilir [42]. PSN mekanizmasının oluşma olasılığı, sabit gerinim oranları için daha yüksek ekstrüzyon sıcaklıkları ile azalan Z parametresi ile azalma gösterir. Bu nedenle, PSN' nin verimi, ekstrüzyon sıcaklığı arttıkça bir düşüş göstermiştir. Şekil 4.8' de ekstrüze edilmiş alaşımların XRD sonuçları gösterilmektedir. Mg₃Gd₂Zn₃ fazının tepe noktaları, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile yoğunluklarında hafif bir azalma göstermiştir.

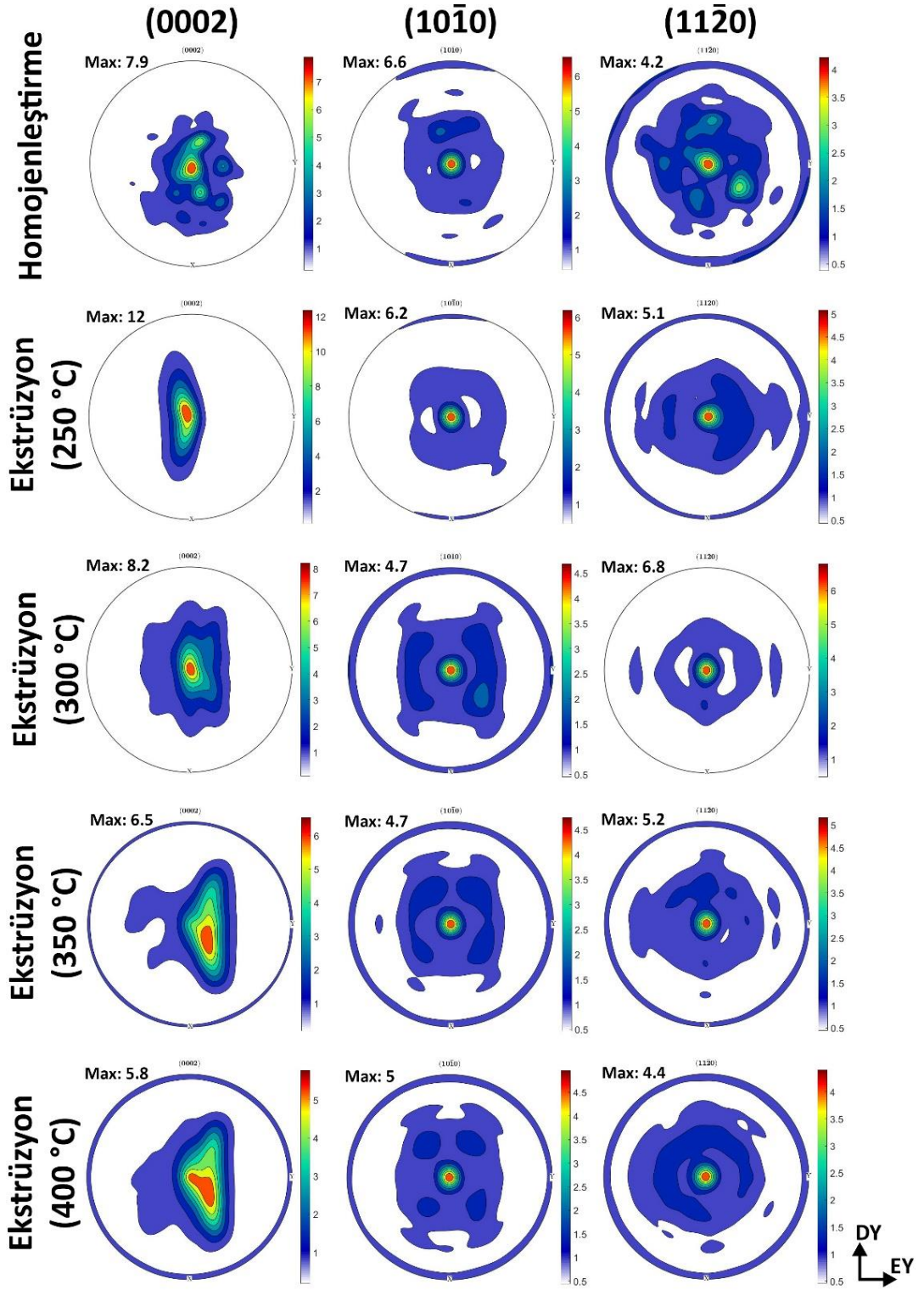


Şekil 4.7. (a) 250 °C, (b) 300 °C, (c) 350 °C ve (d) 400 °C'de ekstrüze edilmiş alaşımların SEM mikroyapıları.



Şekil 4.8. Ekstrüzyon numunelerinin XRD sonuçları.

Şekil 4.9' da homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş GZX220 alaşımlarının (0002), (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) pole figure sonuçları gösterilmektedir. Homojenleştirilmiş alaşım sırasıyla (0002), (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) düzlemleri için 7,9, 6,6 ve 4,2 maksimum yoğunlukları sergilemiştir. Homojenleştirilmiş alaşımın pole figure sonuçları, birim hücrelerin rastgele yönlendirildiğini ve tercih edilen kristalografik yönelme göstermediğini göstermektedir. Bununla birlikte, ekstrüze edilen numuneler, çoğu tanenin <10 $\bar{1}$ 0> yönüne sahip (0002) bazal düzlemlerinin ekstrüzyon yönü boyunca yönlendirildiği bazal tekstür sergilemiştir. 250 °C, 300 °C, 350 °C ve 400 °C' de ekstrüze edilen alaşımlar için bazal tekstür yoğunlukları sırasıyla 12, 8,2, 6,5 ve 5,8 olarak ölçülmüştür. Artan ekstrüzyon sıcaklığı ile azalan bazal kutup yoğunlukları öncelikle DYK derecesi ile ilgilidir. Deforme olmuş ana DYK' ya uğramamış tanelerin, DYK tanelerinden çok daha yüksek bazal tekstür yoğunlukları sergilediği önceki çalışmalarda bildirilmiştir [43–45]. Bu nedenle, daha yüksek hacimli DYK' lı tane fraksiyonlarına sahip alaşımlar, beklendiği gibi tekstür zayıflaması ve rastgeleleşmesi göstermiştir. Ayrıca, 250 °C' de ekstrüze edilen alaşım için güçlü (10 $\bar{1}$ 0) kutup yoğunluğu, ekstrüzyon sıcaklığı 300 °C' ye yükseldikçe azalma sergilemiştir. Sıcaklıktaki daha fazla artış önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. (11 $\bar{2}$ 0) kutup yoğunlukları, tüm numuneler için kayda değer bir değişiklik göstermemiştir.



Şekil 4.9. Homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin (0002), (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) pole figüre sonuçları.

4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER

Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş alaşımlar için oda sıcaklığında kırılmaya kadar yapılan testlere karşılık gelen mühendislik çekme ve basma gerinim-gerilim eğrileri Şekil 4.10' da gösterilmektedir. Elde edilen akma ve nihai dayanımlar, kopmalarda gerinim ve akma asimetrisi değerleri Şekil 4.10' daki eğrilerden elde edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.2' de sunulmuştur. Şekil 4.10(a)' da, döküm alaşımının, 105 MPa' lık bir çekme akma dayanımı (TYS), 200 MPa' lık maksimum çekme dayanımı (UTS) ve %8,3' lük uzama değerleri ile orta düzeyde mekanik özellikler sergilediği görülebilmektedir. Homojenizasyon işleminden sonra tüm çekme özellikleri yaklaşık %20 oranında bozulmuştur. Bu, homojenizasyon işlemiyle mikroyapısal değişikliklerin, döküm durumunun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, homojenleştirme işlemi, bazı iskelet benzeri ikincil faz parçacık kümelerini geride bırakarak, ikinci fazların kısmen çözünmesiyle sonuçlanmıştır. Bu nedenle partiküllerin homojen olmayan dağılımının bu partiküllerin etrafında erken çatlak oluşumuna ve buna bağlı olarak dayanım ve süneklilikte azalmaya yol açmış açabileceği düşünülmüştür.

Ekstrüzyon işlemi, mekanik özelliklerde dikkate değer bir gelişme ile sonuçlanmıştır. 250 °C'de ekstrüze edilen alaşım, 321 MPa TYS değeri ve 326 MPa UTS değeri ile incelenen alaşımlar arasındaki en iyi mukavemeti gösterirken, kopmadaki gerinim değeri düşük (%8,3) olarak kabul edilebilir. Ekstrüze edilmiş alaşımların mukavemeti, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile sürekli bir düşüş göstermiştir. Öte yandan, kırılma anındaki % gerinim değerleri, 350 °C' lik ekstrüzyon sıcaklığına kadar iyileştirilmiştir ancak bunun üzerine bir miktar düşüş göstermiştir. Ekstrüzyon işlemi ile geliştirilmiş mekanik özellikler birkaç mekanizma ile açıklanabilir. Şekil 4.4 ve 4.5' te gösterildiği gibi, ekstrüzyon işleminden sonra ikincil faz parçacıkları kırılarak homojen bir şekilde dağılmış ve DYK taneleri yüksek oranda incelme göstermiştir. Ayrıca, ekstrüzyon sıcaklığının DYK tane boyutu ve DYK oranı üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Bu nedenle, ekstrüzyon sıcaklığı ile mekanik özelliklerde meydana gelen değişikliğin, esas olarak ekstrüze edilmiş numunelerdeki DYK mekanizmalarına atfedebileceği sonucuna varılabilir. Hall-Petch teorisine [46] göre, tane boyutunun küçülmesi akma mukavemetinin iyileşmesine yol açmıştır, çünkü artan tane sınırları plastik

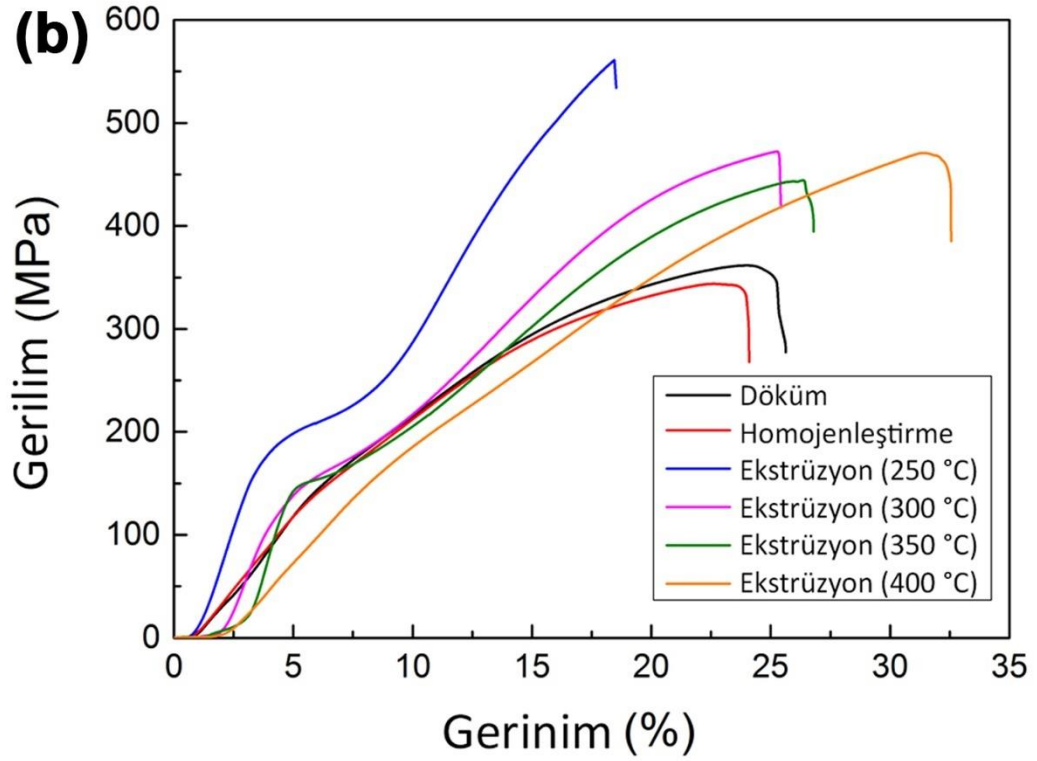
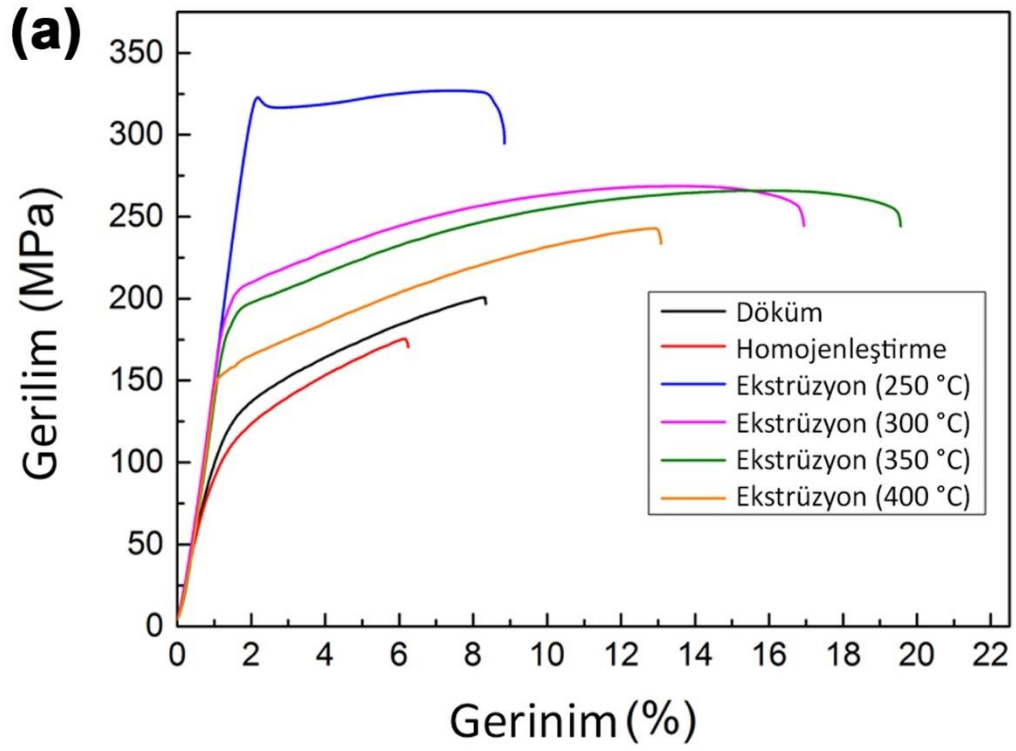
deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engellemektedir. 250 °C' de ekstrüze edilen alaşım, ortalama boyutu 2,1 µm olan DYK' lı taneler içermektedir. Ancak, bu alaşımın üstün mukavemet değerleri sadece bu küçük DYK tane boyutuna atfedilemez, çünkü bu tanelerin hacim oranı sadece %38' dir. Bu durum, DYK' ya uğramamış tanelerin, DYK' ya uğramış tanelerden daha verimli bir şekilde mukavemet iyileştirmesini etkileyeceğini göstermiştir. DYK uygulanmamış taneler, ekstrüzyon işlemi sırasında deformasyona uğramış ve ekstrüzyon yönü boyunca uzamıştır. Böylece, bu tanelerde güçlü bir çalışma sertleşmesi (pekleşme) meydana gelmiş ve bu da daha yüksek sayıda dislokasyon oluşumuna yol açmıştır [24,47]. Ayrıca, plastik deformasyon sırasında oluşabilen $\{10\bar{1}1\}$ - $\{10\bar{1}2\}$ çift ikizlenmesinin çatlak başlama bölgeleri oluşturabileceği ve alaşımın mekanik özelliklerini azaltabileceği önceki çalışmalarda gösterilmiştir [48]. DYK' ya uğramamış tanelerde, DYK' lı tanelere kıyasla daha fazla miktarda çift ikizlenme gözlemlendiği ayrıca bildirilmiştir [39,49]. Şekil 4.11' de gösterildiği üzere, DYK' ya uğramamış tane içindeki bu tür uzama ikizlenmelerinin oluşumu 250 °C ve 300 °C' de ekstrüze edilen alaşımların mikroyapılarında görülebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda ekstrüze edilen alaşımların daha düşük sünekliliği, kaba DYK' ya uğramamış taneler içinde ikiz oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.12' de döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin SEM mikroyapıları gösterilmektedir. Döküm ve homojenleştirilmiş numunelerin kırılma yüzeyleri çoğunlukla bölünmeler, yırtılma kenarları ve birkaç büyük ve sığ çukurlardan (dimple) oluşmaktadır. Şekil 4.4' te gözlemlenen ikincil faz parçacıkları, çekme testi sırasında açıkça kırılmış ve düşük sünekliliğe yol açmıştır. Öte yandan, ekstrüze edilmiş alaşımların kırılma yüzeyleri, çoğunlukla merkezinde çatlaklı Mg-Zn-Gd ikinci faz parçacıklarının bulunduğu küçük çukurlardan oluşmaktadır. Çukurların çaplarının artan ekstrüzyon sıcaklıkları ile büyüdüğü görülmüştür. 250 °C'de ekstrüze edilen alaşımın ayrıca, DYK' ya uğramamış iri tanelerin kırılmasını temsil eden büyük bölünme düzlemleri içerdiğini de belirtmek gerekir.

Magnezyum alaşımlarının çekme ve basma davranışları, özellikle dövme alaşımlar için çoğunlukla birbirinden farklıdır ve bu da onları düşük simetrik malzemeler haline getirir. Akma asimetrisi olarak da adlandırılan, basma akma dayanımının (CYS)

çekme akma dayanımına (TYS) oranı genellikle asimetric davranışın derecesini tanımlamak için kullanılır. Magnezyum alaşımlarındaki akma asimetrisi, esas olarak ekstrüzyon sırasında meydana gelen güçlü lif dokusuna (ekstrüzyon yönüne dik c eksenine) ve deformasyon ikizlenmesinin asimetric doğasına bağlanmıştır [50,51]. $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmesi, c eksenine dik olan ancak gerilim altında olmayan sıkıştırma altında kolayca etkinleştirilir ve bu nedenle düşük CYS değerlerine yol açar. Bu çalışmada, 250 °C, 300 °C ve 350 °C' de ekstrüze edilen alaşımların basma eğrileri, $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmenin baskın olduğu deformasyonlarda tipik bir özellik olan plato şekilli eğri davranışı sergilemiştir [52]. Numunelerin çekme ve basma eğrilerinden hesaplanan akma asimetri değerleri Çizelge 4.2' de verilmiştir. Döküm halindeki alaşım 1,21' lik bir akma asimetri değeri sergilemiştir, bu da CYS' nin TYS' den daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. Bu, $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmesinin döküm alaşımlarındaki farklı davranışına bağlanabilir. Park ve diğ. [53] dökme magnezyum alaşımlarının akma asimetrisi davranışını araştırmış ve gerilim altında $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmesi için daha yüksek bir Schmid faktörü değerinin daha düşük bir TYS değeri ürettiğini ve bunun bir çekme-basmaakma asimetrisine yol açtığını göstermiştir. Bu muhtemelen $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmesinin baskılanmasından ve ikinci faz partikülleri ile ikizler arasındaki etkileşimin değişmesinden kaynaklanmaktadır [51].

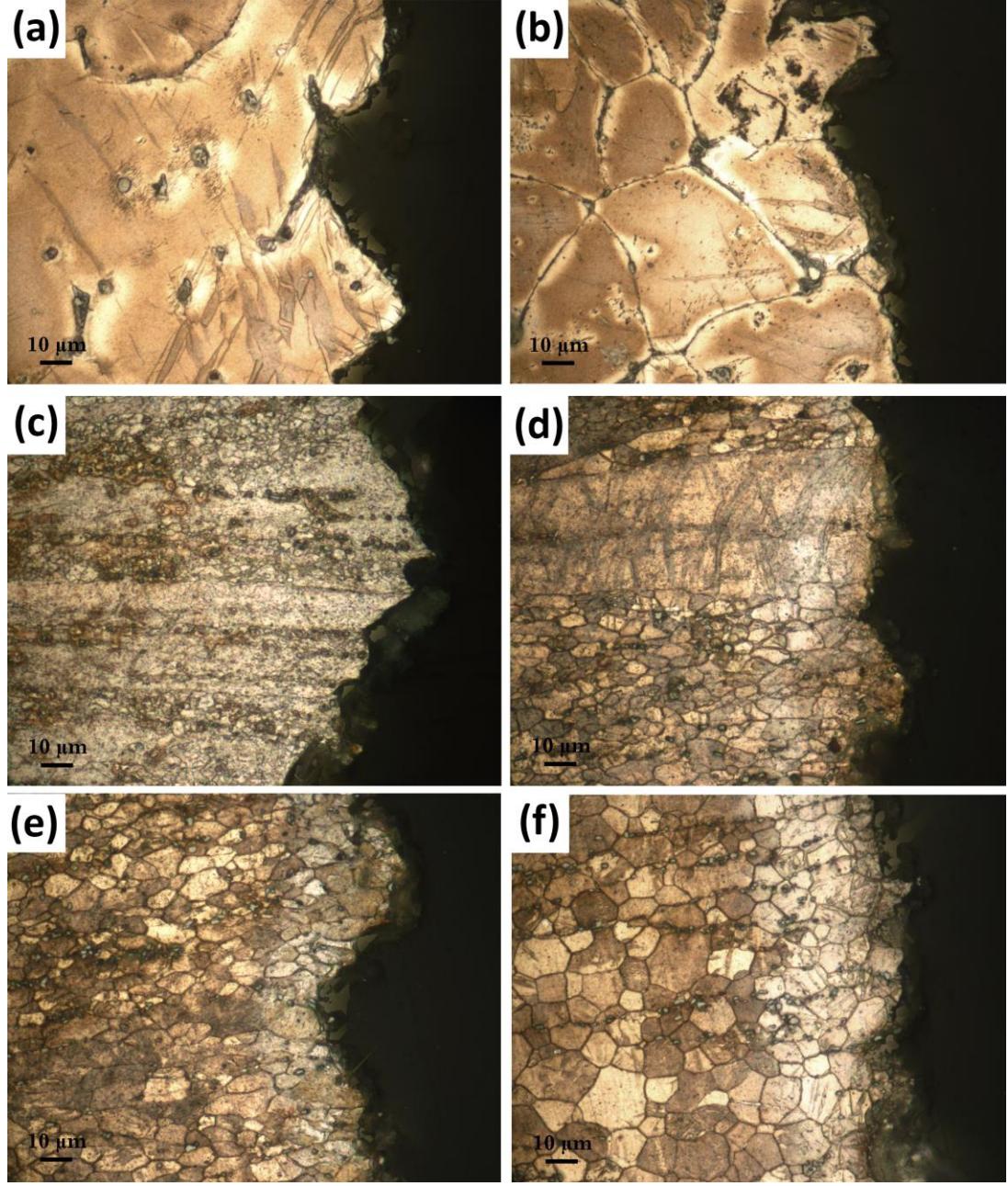
250 °C' de ekstrüzyon, akma asimetrisinin değerinde 1' in altında önemli bir düşüşle sonuçlanmış, bu da güçlü bir asimetric davranışa işaret etmiştir. Bunun öncelikle, deformasyon $\{10\bar{1}1\}$ - $\{10\bar{1}2\}$ çift ikizlenmesi oluşturan güçlü bazal tekstür ve büyük miktarda DYK' ya uğramamış tanelerin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir [50,54]. Ekstrüzyon sıcaklığı arttıkça, Şekil 4.9' da gösterildiği gibi bazal tekstür yoğunluğu azalmış ve bu tür doku zayıflaması akma asimetrisinin azalmasına neden olmuştur [54] . Ekstrüzyon sıcaklığı 400 °C' ye ulaştığında, çekme gerilimi altında $\{10\bar{1}2\}$ ikizlenmesinin aktivasyonu meydana gelmiş ve bu da tersine akma asimetrisi veya yüksek simetri ile sonuçlanmıştır.



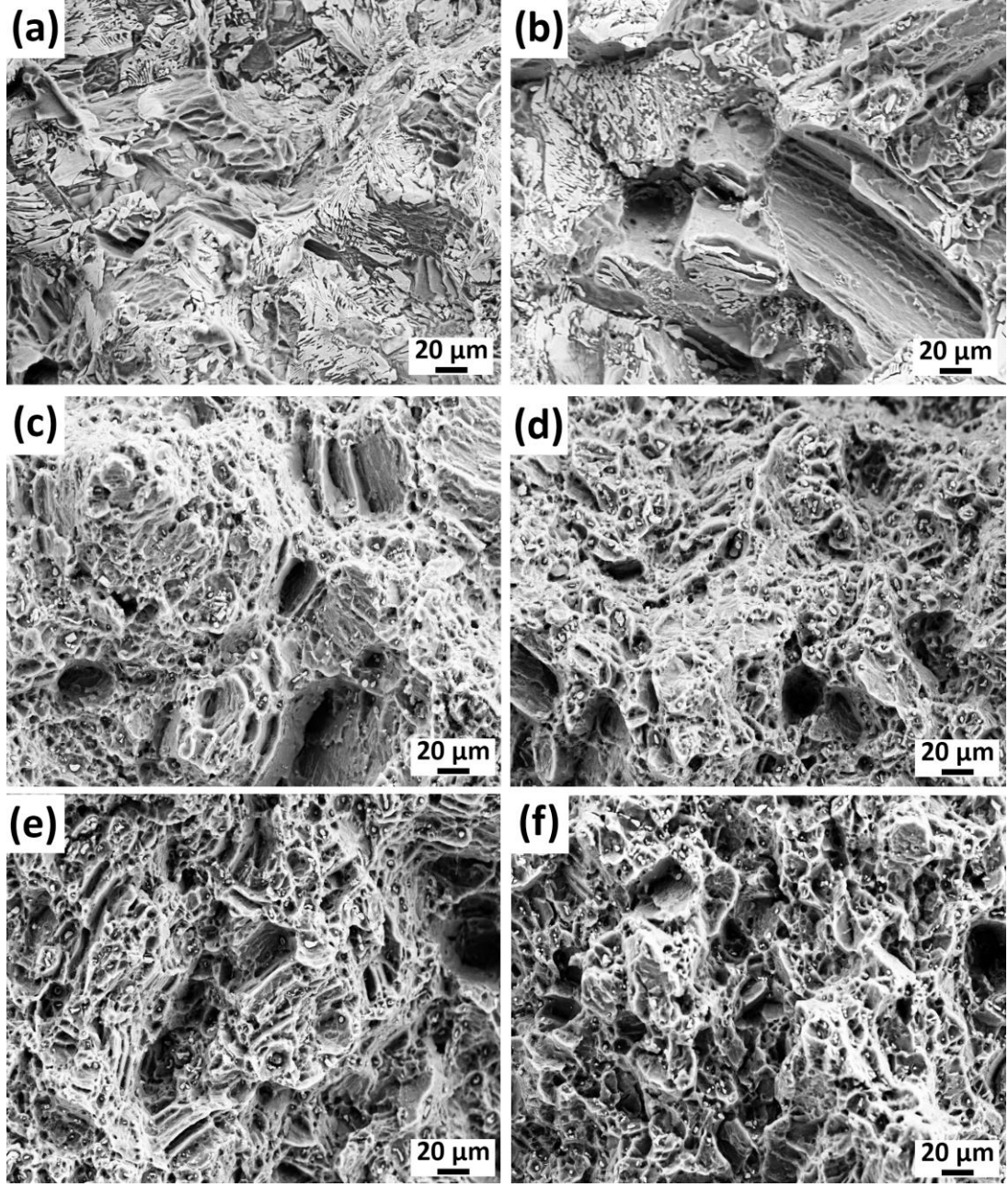
Şekil 4.10. Döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş alaşımlar için mühendislik (a) çekme ve (b) basma gerinim-gerilim eğrileri.

Çizelge 4.2. Çekme ve basma testi sonuçları.

Numune	Çekme Testi			Basma Testi			Akma Asimetrisi (CYS/YS)
	0.2% TYS (MPa)	UTS (MPa)	Gerinim (%)	0.2% CYS (MPa)	UCS (MPa)	Gerinim (%)	
Döküm	114	200	8,3	138	361	25,6	1,21
Homojenleştirilmiş	95	176	6,2	103	344	24,1	1,08
Ekstrüzyon (250 °C)	321	326	8,8	170	561	18,4	0,53
Ekstrüzyon (300 °C)	197	269	16,9	121	472	25,3	0,61
Ekstrüzyon (350 °C)	176	266	19,5	135	442	26,7	0,77
Ekstrüzyon (400 °C)	155	242	13,1	163	471	32,6	1,05



Şekil 4.11. Kırık yüzeylere yakın bölgelerin optik mikroyapıları: (a) döküm, (b) homojenleştirilmiş, (c) 250 °C' de ekstrüze edilmiş, (d) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (e) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (f) 400 °C' de ekstrüze edilmiş.



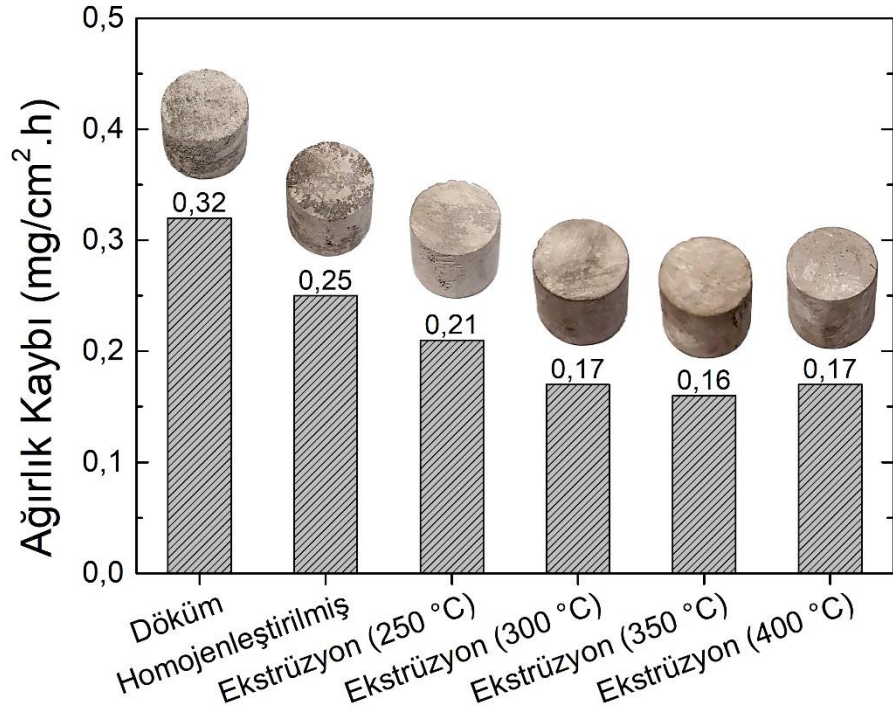
Şekil 4.12. Çekme testlerinden sonra kırılmış yüzeylerin SEM mikroyapıları: (a) döküm, (b) homojenleştirilmiş, (c) 250 °C' de ekstrüze edilmiş, (d) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (e) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (f) 400 °C' de ekstrüze edilmiş.

4.3 KOROZYON ÖZELLİKLERİ

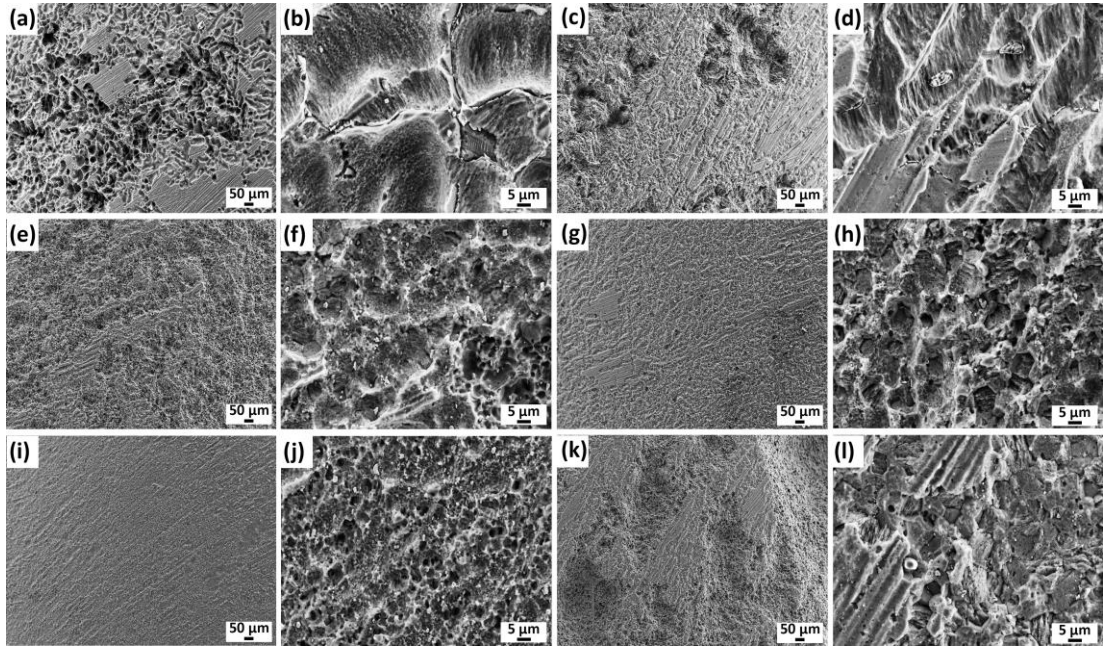
Şekil 4.13'te 48 saat boyunca %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma testlerinden sonra dökülmüş, homojenize edilmiş ve ekstrüze edilmiş numuneler için birim alan ve zaman başına ağırlık kaybı gösterilmektedir. Korozyon ürünlerinin uzaklaştırılmasından sonra alınan her numunenin makroskopik görüntüleri de Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Döküm alaşımı, $0,32 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ korozyon hızı ile çalışılan numuneler arasında en düşük korozyon performansını sergilemiştir. Homojenizasyon işleminden sonra korozyon hızı $0,25 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ değerine kadar düşmüştür. Magnezyum alaşımlarının korozyonunda ikinci faz partiküllerinin varlığı ve tane boyutu önemli rol oynamaktadır [55,56]. α -Mg matrisine katodik olan ikinci faz parçacıklarının miktarındaki azalmanın ve tane boyutunun artmasının magnezyum alaşımlarının korozyon direncini iyileştirdiği bildirilmiştir [56,57]. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, homojenleştirme işlemi, tane boyutunda bir artışa yol açarken, aynı zamanda ikinci faz parçacıklarının dikkate değer bir çözünmesine neden olmuştur. Böylece, ikinci faz parçacıklarının miktarındaki azalmanın korozyon direnci üzerindeki olumlu etkisinin, artan tane boyutunun olumsuz etkisinden daha ağır bastığı sonucuna varılabilir. Ekstrüzyon işleminden sonra alaşımın korozyon direnci daha da geliştirilmiştir. Ekstrüzyon sıcaklığı $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ' den $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye yükseldikçe, korozyon hızı da yaklaşık %20 oranında azalmış ve sıcaklık daha da arttıkça dikkate değer değişiklikler görülmemiştir. Ekstrüzyon işlemi ile korozyon direncinin geliştirilmesi durumu önceki çalışmalarda bildirilmiştir [56,58,59]. Ekstrüze edilmiş alaşımlarda artan miktarda yüksek açılı tane sınırları ile daha yapışkan bir pasif tabakanın korozyon gelişiminin ana nedeni olduğu genel olarak kabul edilmiştir.

Korozyon ürünlerinin uzaklaştırılmasıyla 48 saat boyunca %3,5 NaCl' ye daldırıldıktan sonra elde edilen numunelerin korozyon yüzeylerinin SEM mikroyapıları Şekil 4.14' te sunulmaktadır. Döküm halindeki alaşımın şiddetli lokal korozyon sergilediği görülebilir. Homojenizasyon işleminden sonra korozyon lokalizasyon derecesi azalmıştır. Ekstrüzyonlu numunelerin yüzeyleri boyunca ise daha homojen korozyon yayılımı oluşturan çukurcuklar görülmüştür. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de ekstrüze edilen alaşım, aynı zamanda bir miktar lokal korozyona sahip büyük ve derin çukurlar sergilemiştir. Ekstrüzyon sıcaklığı $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye yükseldikçe, korozyon çok daha

homojen bir şekilde meydana gelmiş ve yüzeyler boyunca küçük çukurları olan korozyonlu yüzeyler oluşmuştur. Ayrıca, çukurların boyutları giderek küçülmüş ve sığlaşmıştır. Önceki çalışmalar, korozyonun genellikle Mg-Zn-RE üçlü parçacıklarına bitişik olarak başladığını ve bunu takiben α -Mg matris fazının çözündüğünü ortaya koymuştur [56,60,61]. Bunun nedeni, ikinci faz parçacıkları ve α -Mg arasındaki güçlü mikrogalvanik etkileşimdir. Yin ve diğ. [64] W-fazı ($Mg_3Zn_3Gd_2$), I-fazı (Mg_3Zn_6Gd) ve X-fazı ($Mg_{12}ZnGd$) ile α -Mg matrisi arasındaki volta potansiyel farklarını incelemiş ve potansiyel fark değerlerini sırasıyla 120 mV, 25 mV ve 60 mV olarak bildirmiştir. Bahsedilen bu çalışmada, mikroyapılarda çok sayıda W-fazı mevcuttur ve bu nedenle, özellikle döküm alaşımındaki korozyon yayılımı, W-fazının güçlü mikrogalvanik etkisine bağlanmıştır. Bu aynı zamanda, katodik W-fazının çözünmesine izin veren homojenleştirme işlemiyle korozyon iyileştirmesinin nedenidir. Ekstrüzyon işlemi, çok ince taneli ve kırılmış ve daha homojen dağılmış ikincil faz parçacıkları içeren bir mikroyapıya yol açtığından, korozyon sırasında oluşan oksit film, ince katodik parçacıkların zararlı etkisini ortadan kaldırarak daha kararlı halde kalmıştır. Ayrıca 400 °C' de ekstrüze edilen alaşımın genel korozyon oranını önemli derecede etkilemeyen yüzeysel bir korozyon ilerlemesi gösterdiğini de belirtmekte fayda vardır. Bunun nedeni muhtemelen Şekil 4.7' de gösterildiği gibi yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarında ikincil faz parçacıklarının dağılımının değişmesi ve bazı lokal korozyon başlangıcı ve ilerlemesine neden olmasıdır.



Şekil 4.13. Temizlenen numunelerin makroskopik görüntüleri ile %3,5 NaCl çözeltisine daldırılmış döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş GZX220 alaşımlarının ağırlık kayıpları.



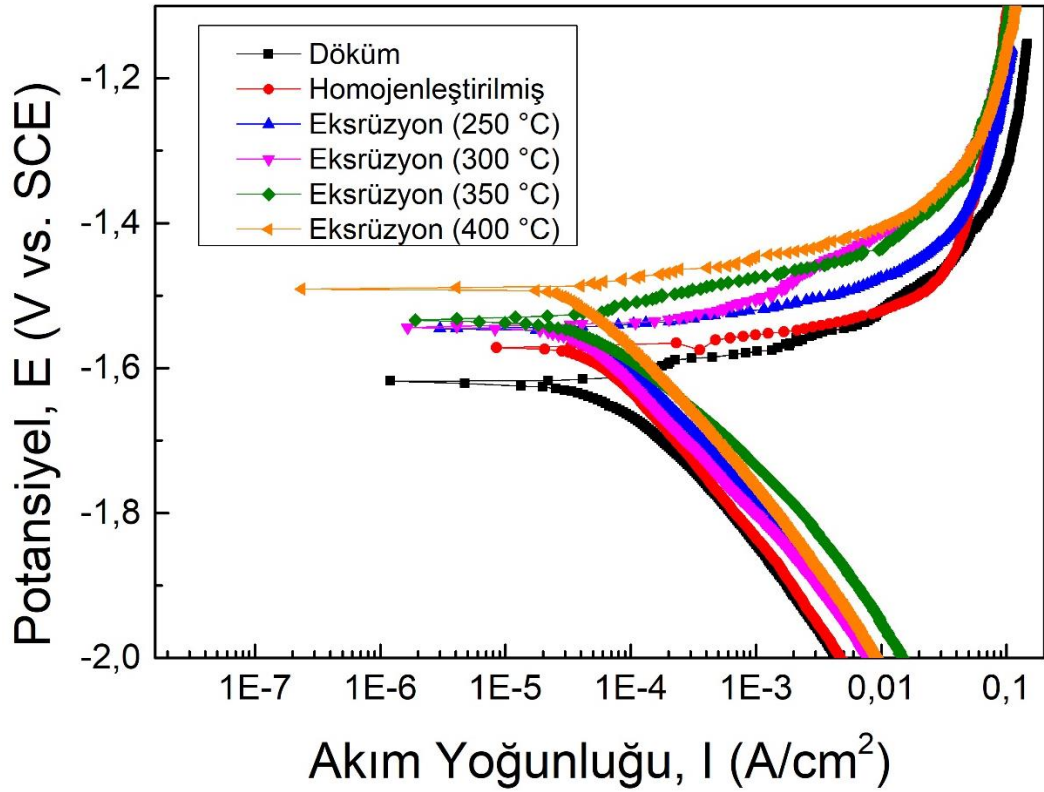
Şekil 4.14. 48 saat boyunca %3,5 NaCl' ye daldırıldıktan sonra aşınmış yüzeylerin SEM mikroyapıları: (a,b) döküm, (c,d) homojenleştirilmiş, (e,f) 250 °C'de ekstrüze edilmiş, (g,h) 300 °C' de ekstrüze edilmiş, (i,j) 350 °C' de ekstrüze edilmiş ve (k,l) 400 °C 'de ekstrüze edilmiş.

Şekil 4.15, %3,5 NaCl çözeltisi içinde dökülmüş, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrilerini göstermektedir. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), anodik (β_a) ve katodik (β_c) Tafel eğimleri ve polarizasyon direnci (R_p) değerleri Çizelge 4.3' te sunulmuştur. Polarizasyon direnci aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır [62]:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) i_{corr}} \quad (4.1)$$

Polarizasyon eğrisinin katodik dalının hidrojen gelişimini temsil ettiği, anodik dalın ise Mg matrisinin çözünmesini karakterize ettiği kabul edilmektedir [62,63]. İncelenen örneklerin anodik ve katodik dalları, Şekil 4.15' te görüldüğü gibi benzer görünmüştür. Bu, her iki prosesin korozyon reaksiyonları üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu anlamına gelmiştir. Alaşımların katodik dalları da benzer ilerleme ile kapsamlı bir doğrusal davranış sergilemiştir. Bu, katodik reaksiyonların homojenleştirme veya ekstrüzyon koşulları ile önemli bir değişiklik göstermediğini ve alaşımların hidrojen oluşum reaksiyonlarının kararlı olduğunu göstermiştir [64]. Öte yandan, alaşımların anodik davranışları incelendiğinde numunelerin davranışlarında önemli değişiklikler olduğu ve sabit bir potansiyel değerinde döküm alaşımının en yüksek anodik çözünme aktivitesini gösterdiği görülmüştür. Artan ekstrüzyon sıcaklığı, anodik reaksiyon kinetiğini düşürerek, daha düşük korozyon akımı yoğunlukları ile sonuçlanmıştır. Çizelge 4.3' te verildiği gibi hem i_{corr} hem de E_{corr} değerleri, homojenizasyon ve bunu takiben artan sıcaklık ekstrüzyon işlemleri ile kademeli bir düşüş göstermiştir. Daha düşük i_{corr} ve daha pozitif E_{corr} değerleri, metalin daha düşük korozyon hızını ve daha yüksek soyluluğunu temsil eder [29,30,64]. Bu nedenle, artan ekstrüzyon sıcaklıkları sonucunda döküm ve homojenleştirilmiş GZX220 alaşımlarındaki W-fazı sebebiyle görülen güçlü mikro galvanik etki düzenlenmiş ve alaşımın korozyon performansı sürekli olarak iyileşme sergilemiştir. Yapılan bir çalışmada [64], W-fazının ekstrüzyon işleminden önce ve sonra bir Mg-Zn-Gd-Zr alaşımının korozyonu üzerindeki etkisi incelenmiş ve W-fazının α -Mg matrisi ile büyük bir katodik potansiyel farkı olduğunu ve buna bağlı olarak güçlü bir mikro galvanik korozyona yol açtığını bildirmiştir. Döküm alaşımındaki ana korozyon, bu parçacıkların etrafında başlamış ve tanelerin iç kısımlarına yayılarak önemli ağırlık kaybına neden olmuştur. Ekstrüzyon işleminden

sonra, kaba W-fazı partikülleri, ince partiküller halinde parçalanmış ve korozyon yayılmasının etkisi azalmıştır. Ayrıca, yukarıda ana hatlarıyla belirtildiği gibi, ekstrüzyon işlemi, daha kararlı koruyucu oksit tabakasının oluşumuna da katkıda bulunabilen ince bir DYK' lı tane yapısı oluşturmuştur. Böylece homojenizasyon işleminden sonraki korozyon performansı ekstrüzyon işlemi ile daha da iyileştirilmiştir. Tafel sonuçları, Şekil 4.13 'te gösterilen daldırma korozyon testi sonuçlarıyla neredeyse aynı doğrultuda sonuç vermiştir.

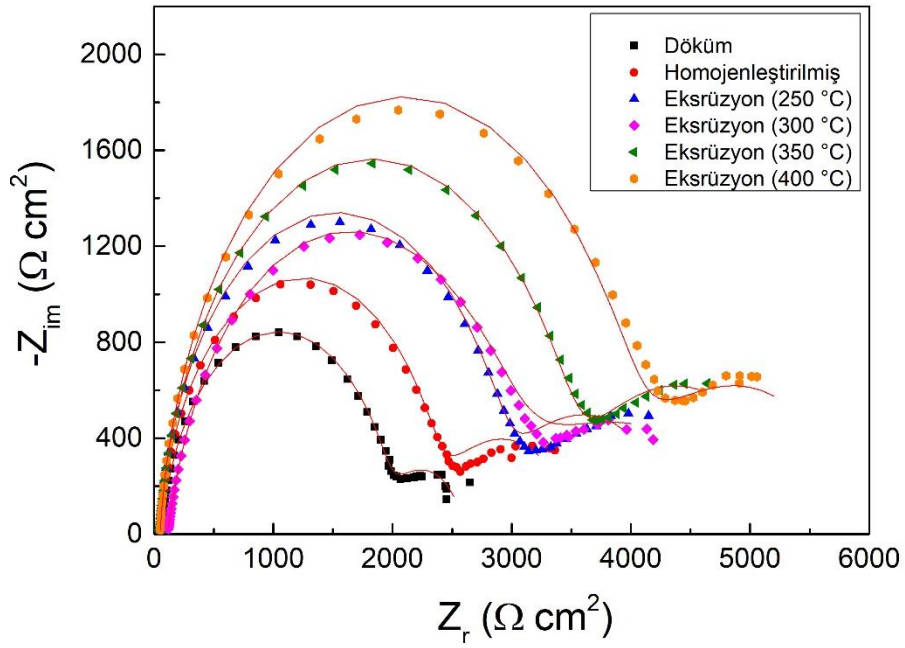


Şekil 4.15. Alaşımların potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Çizelge 4.3. Alaşımların polarizasyon eğrilerinden elde edilen parametreler.

Numune	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{corr} (V)	β_a (mV)	β_c (mV)	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)
Döküm	68,2	-1,61	35,3	136	178,7
Homojenleştirilmiş	58,2	-1,57	28,2	194,6	184
Ekstrüzyon (250 °C)	57,8	-1,55	35,2	192,6	223,9
Ekstrüzyon (300 °C)	49,3	-1,54	43,5	198,8	314,8
Ekstrüzyon (350 °C)	37,8	-1,53	31,7	188,4	312,1
Ekstrüzyon (400 °C)	37,4	-1,49	41,1	134	365,6

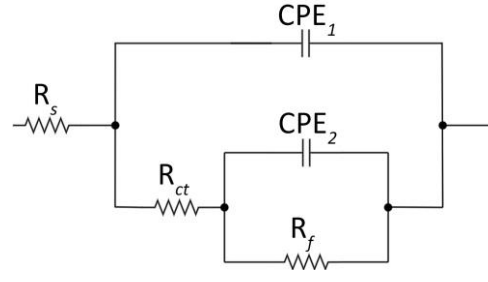
%3,5' lik NaCl çözeltisi içinde döküm, homojenleştirilmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin elektrokimyasal empedans spektrumları Şekil 4.16' da gösterilmektedir. Açıkça görülmektedir ki, bütün alaşımlar büyük bir kapasitif döngüye ve ardından bir miktar rastgele değere sahip benzer spektrumlar sergilemişlerdir. Ancak elde edilen yayların çaplarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Hiçbir örnekte endüktif döngü görülmemiştir. Bu, korozyon mekanizmalarının, korozyon ürünü filmi ve şarj transferinden güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. EIS spektrumları Şekil 4.17' de gösterilen eşdeğer devreye göre uydurulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4' te gösterilmiştir. Burada, R_s çözelti direnci, R_{ct} şarj transfer direnci, R_f korozyon ürünü direnci, CPE_1 ve CPE_2 sabit faz elemanları parametreleridir. Homojenizasyon ve ekstrüzyon işlemlerinden sonra R_{ct} ve R_f değerlerinin yükselme eğilimi gösterdiği açıkça görülmektedir. Şarj transferinin ve korozyon filmin sahip olduğu daha yüksek direnç değerleri, korozyon ürününün daha kararlı olduğunu ve böylece daha verimli bir bariyer etkisinin meydana geldiğini göstermektedir. Döküm ve homojenleştirilmiş alaşımlarda, kaba katodik W-fazı parçacıkları muhtemelen oksit filmin erken kırılmasına yol açmış ve ekstrüzyon işlemi, düzgün dağılmış ince W-fazı parçacıkları ve DYK 'lı taneler nedeniyle daha kararlı koruyucu oksit filme neden olmuştur. Ayrıca, DYK oluşum oranı artan ekstrüzyon sıcaklığı ile artış göstermiştir ve bu da yüksek iç gerilimlerin azalmasına ve daha düzgün eş eksenli tane yapısının oluşarak koruyucu oksit filmin daha iyi özelliklere sahip olmasına yol açmıştır.



Şekil 4.16. Alaşımların elektrokimyasal empedans (EIS) spektrumları.

Çizelge 4.4. Alaşımların EIS analiz sonuçları.

Numune	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_1 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n$)	n_1	CPE_2 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n$)	n_2
Numune	6,2	195,6	58,1	35,2	0,905	8013	0,846
Döküm	5,1	236,1	117,5	23,5	0,929	6502	0,707
Homojenleştirilmiş	4,9	289,0	167,2	22,6	0,938	5947	0,639
Ekstrüzyon (250 °C)	11,6	315,2	105,3	41,0	0,857	6823	0,869
Ekstrüzyon (300 °C)	4,9	348,9	206,4	26,1	0,921	6665	0,667
Ekstrüzyon (350 °C)	5,1	365,2	303,7	21,2	0,934	7122	0,685



Şekil 4.17. Alaşımın EIS spektrumları için modellenen eşdeğer devre.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Mevcut çalışmada GZX220 alaşımı dökülmüş, homojenleştirilmiş ve dört farklı sıcaklıkta ekstrüzyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen bütün numunelerin mikroyapı, çekme, basma ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Temel olarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Döküm halindeki alaşım α -Mg, $Mg_3Gd_2Zn_3$ (W-fazı olarak da belirtilir), $Ca_2Mg_6Zn_3$ ve Mg_5Gd fazlarından oluşmaktadır. Homojenizasyon işleminden sonra, ikinci faz partikülleri, matris fazı boyunca kısmen çözünmüş ve α -Mg tane boyutu artmıştır.
- Ekstrüzyon işlemi, DYK tarafından önemli bir tane incelmeye yol açmıştır. Artan ekstrüzyon sıcaklığı, DYK' lı tanelerin oranında bir artışa ve DYK tane boyutunda azalmaya neden olmuştur. Düşük ekstrüzyon sıcaklıklarında, daha yüksek bazal tekstür yoğunlukları gözlenmiştir.
- Ekstrüzyon işlemi, mekanik özelliklerde dikkate değer bir gelişme ile sonuçlanmıştır. 250 °C' de ekstrüze edilen alaşım, en yüksek mukavemeti sergilemiştir. Ekstrüze edilmiş alaşımların mukavemeti, artan ekstrüzyon sıcaklığı ile sürekli bir düşüş göstermiştir. Öte yandan, kırılmadaki gerinim değerleri, 350 °C ekstrüzyon sıcaklığına kadar iyileşme göstermiş, bunun üzerine tekrar bir miktar düşmüştür.
- Düşük sıcaklıkta ekstrüzyon, deformasyon sırasında $\{10\bar{1}1\}$ - $\{10\bar{1}2\}$ çift ikizlenme veren güçlü bazal tekstür ve büyük miktarda DYK' ya uğramamış tanelerin mevcudiyeti nedeniyle güçlü bir asimmetrik davranışla sonuçlanmıştır.

- Ekstrüzyon sıcaklığı arttıkça, bazal tekstür yoğunluğundaki azalma ve gerilim altında uzama ikizlenmesinin aktivasyonu nedeniyle akma asimetrisinde bir iyileşme meydana gelmiştir.
- Katodik W-fazı parçacıklarının miktarı, boyutu ve dağılımı, proses şartları ile önemli ölçüde değiştiğinden, alaşımın korozyon direnci homojenizasyon ve artan sıcaklık ekstrüzyon işlemlerinin ardından iyileştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Avedesian, M. M. and Baker, H., "ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", *ASM International*, 336 (1999).
2. Kulekci, M. K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (9–10): 851–865 (2008).
3. Jahnke-Dechent, W. and Ketteler, M., "Magnesium basics", *Clinical Kidney Journal*, 5 (Suppl 1): i3–i14 (2012).
4. Zhang, X., Dai, J., Yang, H., Liu, S., He, X., and Wang, Z., "Influence of Gd and Ca on microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg–Gd–Zn(–Ca) alloys", *Materials Technology*, 32 (7): 399–408 (2017).
5. Kiani, M., Gandikota, I., Rais-Rohani, M., and Motoyama, K., "Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 2 (2): 99–108 (2014).
6. Bettles, C. and Barnett, M., "Advances in Wrought Magnesium Alloys: Fundamentals of Processing, Properties and Applications", *Elsevier*, 478 (2012).
7. Pekguleryuz, M. O., Kainer, K., and Kaya, A. A., "Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy", *Elsevier*, 381 (2013).
8. Bettles, C. and Gibson, M., "Current wrought magnesium alloys: Strengths and weaknesses", *JOM*, 57 (5): 46–49 (2005).
9. Zeng, H., "ZK60 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜM VE EKSTRÜZYON SONRASI MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ", 234 .
10. "Extrusion", 2nd ed. Ed., *ASM International*, Materials Park, OH, 592 (2006).
11. 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).
12. "Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications", *Springer*, Berlin ; New York, 677 (2006).
13. He, S. M., Peng, L. M., Zeng, X. Q., Ding, W. J., and Zhu, Y. P., "Comparison of the microstructure and mechanical properties of a ZK60 alloy with and without

- 1.3wt.% gadolinium addition", *Materials Science And Engineering: A*, 433 (1–2): 175–181 (2006).
14. Seçgin, G. O., "İKİZ MERDANELİ SÜREKLİ DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ AZ31 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ", 170 (2012).
15. Yildirim, H., "FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ", 69 .
16. Kara, İ. H., "NADİR TOPRAK ELEMENTİ İLAVELİ SICAK HADDELENMİŞ AZ31 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK, KOROZYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ", 240 .
17. Erdem, A., "YÜKSEK LİSANS TEZİ METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ", 84 .
18. Homma, T., Mendis, C. L., Hono, K., and Kamado, S., "Effect of Zr addition on the mechanical properties of as-extruded Mg–Zn–Ca–Zr alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 527 (9): 2356–2362 (2010).
19. He, S. M., Peng, L. M., Zeng, X. Q., Ding, W. J., and Zhu, Y. P., "Comparison of the microstructure and mechanical properties of a ZK60 alloy with and without 1.3wt.% gadolinium addition", *Materials Science And Engineering: A*, 433 (1–2): 175–181 (2006).
20. Huang, Z., Qi, W., and Xu, J., "Effects of Gd on microstructure and mechanical property of ZK60 magnesium alloy", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 23 (9): 2568–2576 (2013).
21. Mordike, B. L. and Ebert, T., "Magnesium Properties — applications — potential", *Materials Science And Engineering A*, 9 (2001).
22. Li, N. and Zheng, Y., "Novel Magnesium Alloys Developed for Biomedical Application: A Review", *Journal Of Materials Science & Technology*, 29 (6): 489–502 (2013).
23. Luo, A. A., "Magnesium casting technology for structural applications", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 1 (1): 2–22 (2013).
24. Ross, N. G., Barnett, M. R., and Beer, A. G., "Effect of alloying and extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn and Mg–Zn–RE alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 619: 238–246 (2014).
25. Yin, S., Zhang, Z., Liu, X., Le, Q., Lan, Q., Bao, L., and Cui, J., "Effects of Zn/Gd ratio on the microstructures and mechanical properties of Mg–Zn–Gd–Zr alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 695: 135–143 (2017).
26. Chen, J., Tan, L., Yu, X., and Yang, K., "Effect of minor content of Gd on the mechanical and degradable properties of as-cast Mg–2Zn–xGd–0.5Zr alloys", *Journal Of Materials Science & Technology*, 35 (4): 503–511 (2019).

27. Hoseini-Athar, M. M., Mahmudi, R., Prasath Babu, R., and Hedström, P., "Effect of Zn addition on dynamic recrystallization behavior of Mg-2Gd alloy during high-temperature deformation", *Journal Of Alloys And Compounds*, 806: 1200–1206 (2019).
28. Liu, Y., Yuan, G., Zhang, S., Zhang, X., Lu, C., and Ding, W., "Effects of Zn/Gd Ratio and Content of Zn, Gd on Phase Constitutions of Mg Alloys", *MATERIALS TRANSACTIONS*, 49 (5): 941–944 (2008).
29. Chen, J., Tan, L., Yu, X., and Yang, K., "Effect of minor content of Gd on the mechanical and degradable properties of as-cast Mg-2Zn-xGd-0.5Zr alloys", *Journal Of Materials Science & Technology*, 35 (4): 503–511 (2019).
30. Chen, J.-X., Gao, M., Tan, L.-L., and Yang, K., "Microstructure, mechanical and biodegradable properties of a Mg-2Zn-1Gd-0.5Zr alloy with different solution treatments", *Rare Metals*, 38 (6): 532–542 (2019).
31. Zhang, Y., Li, J., and Li, J., "Effects of microstructure transformation on mechanical properties, corrosion behaviors of Mg-Zn-Mn-Ca alloys in simulated body fluid", *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, 80: 246–257 (2018).
32. Yin, S., Zhang, Z., Liu, X., Le, Q., Lan, Q., Bao, L., and Cui, J., "Effects of Zn/Gd ratio on the microstructures and mechanical properties of Mg-Zn-Gd-Zr alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 695: 135–143 (2017).
33. Huang, H., Yuan, G., Chu, Z., and Ding, W., "Microstructure and mechanical properties of double continuously extruded Mg-Zn-Gd-based magnesium alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 560: 241–248 (2013).
34. Miao, H., Huang, H., Shi, Y., Zhang, H., Pei, J., and Yuan, G., "Effects of solution treatment before extrusion on the microstructure, mechanical properties and corrosion of Mg-Zn-Gd alloy in vitro", *Corrosion Science*, 122: 90–99 (2017).
35. Pourbahari, B., Emamy, M., and Mirzadeh, H., "Synergistic effect of Al and Gd on enhancement of mechanical properties of magnesium alloys", *Progress In Natural Science: Materials International*, 27 (2): 228–235 (2017).
36. Hoseini-Athar, M. M., Mahmudi, R., Prasath Babu, R., and Hedström, P., "Effect of Zn addition on dynamic recrystallization behavior of Mg-2Gd alloy during high-temperature deformation", *Journal Of Alloys And Compounds*, 806: 1200–1206 (2019).
37. Shahzad, M. and Wagner, L., "Influence of extrusion parameters on microstructure and texture developments, and their effects on mechanical properties of the magnesium alloy AZ80", *Materials Science And Engineering: A*, 506 (1–2): 141–147 (2009).
38. Kim, H. J., Jin, S.-C., Jung, J.-G., and Park, S. H., "Influence of undissolved second-phase particles on dynamic recrystallization behavior of Mg-7Sn-1Al-

- 1Zn alloy during low- and high-temperature extrusions", *Journal Of Materials Science & Technology*, 71: 87–97 (2021).
39. Zengin, H., "Effect of La content and extrusion temperature on microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Zn-Zr magnesium alloy", 23 .
 40. Park, S. H., "Effects of extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-(Mn)-Ce/Gd alloys", *Materials Science*, 11 (2014).
 41. Robson, J. D., Henry, D. T., and Davis, B., "Particle effects on recrystallization in magnesium-manganese alloys: Particle-stimulated nucleation", *Acta Materialia*, 9 (2009).
 42. Zengin, H., "Evolution of Microstructure, Residual Stress, and Tensile Properties of Mg-Zn-Y-La-Zr Magnesium Alloy Processed by Extrusion", *Residual Stress*, 11 .
 43. Yu, H., "Effects of cerium addition on the microstructure, mechanical properties and hot workability of ZK60 alloy", *Materials Science*, 10 (2013).
 44. Stanford, N. and Barnett, M. R., "The origin of “rare earth” texture development in extruded Mg-based alloys and its effect on tensile ductility", *Materials Science And Engineering A*, 10 (2008).
 45. Huang, X., "Microstructure and mechanical properties of AZX912 magnesium alloy extruded at different temperatures", 31 .
 46. Xu, C., Nakata, T., Qiao, X. G., Jiang, H. S., Sun, W. T., Chi, Y. C., Zheng, M. Y., and Kamado, S., "Effect of extrusion parameters on microstructure and mechanical properties of Mg-7.5Gd-2.5Y-3.5Zn-0.9Ca-0.4Zr (wt%) alloy", *Materials Science*, 9 (2017).
 47. Yu, H., "Effects of extrusion speed on the microstructure and mechanical properties of ZK60 alloys with and without 1wt% cerium addition", *Materials Science*, 11 (2013).
 48. Barnett, M. R., "Twinning and the ductility of magnesium alloys Part II. “Contraction” twins", *Materials Science And Engineering A*, 9 (2007).
 49. Park, S. H., "Microstructural evolution of indirect-extruded ZK60 alloy by adding Ce", *Journal Of Alloys And Compounds*, 5 (2012).
 50. Lyu, S., "Abnormal extrusion texture and reversed yield asymmetry in a Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy", *Materials Science*, 5 (2019).
 51. Lv, C., Liu, T., Liu, D., Jiang, S., and Zeng, W., "Effect of heat treatment on tension-compression yield asymmetry of AZ80 magnesium alloy", *Materials And Design*, 5 (2012).

52. Yu, H., Xin, Y., Chapuis, A., Huang, X., Xin, R., and Liu, Q., "The different effects of twin boundary and grain boundary on reducing tension-compression yield asymmetry of Mg alloys", *Scientific Reports*, 6 (1): 29283 (2016).
53. Park, S. H., Lee, J. H., Moon, B. G., and You, B. S., "Tension–compression yield asymmetry in as-cast magnesium alloy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 617: 277–280 (2014).
54. Yin, S. M., Wang, C. H., Diao, Y. D., Wu, S. D., and Li, S. X., "Influence of Grain Size and Texture on the Yield Asymmetry of Mg-3Al-1Zn Alloy", *Journal Of Materials Science & Technology*, 27 (1): 29–34 (2011).
55. Zengin, H., Turen, Y., Ahlatci, H., Sun, Y., and Kara, I. H., "Microstructure and Corrosion Properties of Homogenized Mg-4Zn-1La Magnesium Alloy", *Key Engineering Materials*, 750: 118–123 (2017).
56. Xu, Y., Li, J., Qi, M., Gu, J., and Zhang, Y., "Effect of extrusion on the microstructure and corrosion behaviors of biodegradable Mg–Zn–Y–Gd–Zr alloy", *Journal Of Materials Science*, 55 (3): 1231–1245 (2020).
57. Argade, G. R., Panigrahi, S. K., and Mishra, R. S., "Effects of grain size on the corrosion resistance of wrought magnesium alloys containing neodymium", *Corrosion Science*, 58: 145–151 (2012).
58. Xu, H., Zhang, X., Zhang, K., Shi, Y., and Ren, J., "Effect of extrusion on corrosion behavior and corrosion mechanism of Mg-Y alloy", *Journal Of Rare Earths*, 34 (3): 315–327 (2016).
59. Zengin, H., Turen, Y., Ahlatci, H., and Sun, Y., "Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of as-cast and as-extruded Mg–4Zn–1La magnesium alloy", *Rare Metals*, 39 (8): 909–917 (2020).
60. Neil, W. C., Forsyth, M., Howlett, P. C., Hutchinson, C. R., and Hinton, B. R. W., "Corrosion of magnesium alloy ZE41 – The role of microstructural features", *Corrosion Science*, 51 (2): 387–394 (2009).
61. Zhao, M.-C., Liu, M., Song, G. L., and Atrens, A., "Influence of Microstructure on Corrosion of As-cast ZE41", *Advanced Engineering Materials*, 10 (1–2): 104–111 (2008).
62. Zengin, H., Turen, Y., Ahlatci, H., and Sun, Y., "Mechanical Properties and Corrosion Behavior of As-Cast Mg-Zn-Zr-(La) Magnesium Alloys", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 27 (2): 389–397 (2018).
63. Chang, J. W., Peng, L. M., Guo, X. W., Atrens, A., Fu, P. H., Ding, W. J., and Wang, X. S., "Comparison of the corrosion behaviour in 5% NaCl solution of Mg alloys NZ30K and AZ91D", *Journal Of Applied Electrochemistry*, 38 (2): 207–214 (2008).

64. Yin, S., Duan, W., Liu, W., Wu, L., Yu, J., Zhao, Z., Liu, M., Wang, P., Cui, J., and Zhang, Z., "Influence of specific second phases on corrosion behaviors of Mg-Zn-Gd-Zr alloys", *Corrosion Science*, 166: 108419 (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Soner ARI ilk, orta ve lise öğrenimini MANİSA/ Gördes’de tamamladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde öğrenime başladı. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalına yüksek lisans öğrencisi olarak başladı.