

T.C.  
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AZ91 ALAŞIMININ SICAK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN :Erhan AYDEMİR  
DANIŞMAN :Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ

VAN-2018



T.C.  
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AZ91 ALAŞIMININ SICAK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN : Erhan AYDEMİR

Bu çalışma YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından **2015-FBE/YL275**  
No'lu proje olarak desteklenmiştir

VAN-2018



## KABUL VE ONAY SAYFASI

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ danışmanlığında, Erhan AYDEMİR tarafından sunulan "AZ91 Alaşımının Sıcak Presleme Yöntemi İle Üretilmesi" isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 09/02/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Serkan ÖZEL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Serap KOÇ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19.02.2018 tarih ve 2018/10-1 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Suat ŞENSOY  
Enstitü Müdürü





## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Erhan AYDEMİR





## ÖZET

### AZ91 ALAŞIMININ SICAK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

AYDEMİR, Erhan  
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ  
Şubat 2018, 84 sayfa

Bu çalışmada, mikroyapısında üretim sonrasında herhangi bir şekilde hapsolmuş gaz ve boşluk içermeyen AZ91 alaşımlarının üretilmesi hedeflenmiştir. AZ91 alaşımı toz metalurjisi metotlarından biri olan tek eksenli sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Sıcak presleme işlemi AZ91 için 420, 450 ve 500 °C; Mg için ise 420 ve 600 °C sıcaklıklarında 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Presleme basıncı 50MPa olarak sabit tutulmuştur. Üretilen numuneler tel erezyon ile 5x5x10 mm boyutlarında kesildikten sonra Arşimet metodu ile yoğunlukları ve gözeneklilikleri ölçülmüş, X-Işını Difraktometresi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikroyapıları incelenmiştir. 450 ve 500 °C’de yapılan sıcak presleme işlemi sırasında AZ91 alaşımında kısmi erime meydana geldiği gözlenmiş tamamen katı halde sinterleme yapabilmek için uygulanabilecek maksimum sıcaklığın ötektik sıcaklıktan (437 °C) daha düşük olması gerektiği sonucuna varılmıştır. 420 °C’de 1 saat süre ile yapılan sıcak presleme sonrasında AZ91 alaşımının tam yoğunluğa ulaştığı SEM incelemeleri ile tespit edilmiştir. XRD ve SEM analizleri sonucunda mikroyapının  $\alpha$  (Mg’ca zengin) ve  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Üretilen alaşımların ve referans malzemelerinin mekanik özellikleri oda sıcaklığı, 100, 150 ve 200 °C’de yapılan basma testleri ile belirlenmiştir. Sıcak presleme yöntemiyle üretilen AZ91 alaşımının mekanik özelliklerinin döküm yöntemleriyle üretilenlerden daha iyi olduğu görülmüş, akma dayanımı, basma dayanımı ve süneklik için sırasıyla 183 MPa, 241 MPa ve %10.1 değerleri elde edilmiştir. Beklendiği üzere, test sıcaklığı arttıkça akma ve basma mukavemetlerinde azalma, süneklikde ise artış görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** AZ91 magnezyum alaşımı, Mekanik özellikler, Mikroyapı, Sıcak Presleme, Toz Metalurjisi



## ABSTRACT

### PRODUCTION OF AZ91 ALLOY BY HOT-PRESSING METHOD

AYDEMİR, Erhan

M. Sc. Thesis, Mechanical Engineering Department

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ

February 2018, 84 pages

In this study, it was aimed to produce AZ91 alloys that do not contain any entrapped gas and voids in the microstructure after production. AZ91 alloy was produced by the single-axis hot pressing method, one of the powder metallurgy methods. Hot pressing was carried out for 1 hour at 420, 450 and 500 °C for AZ91 and at 420 and 600 °C for Mg. Pressing pressure was kept constant to be as 50 MPa. Having produced the samples were cut in the dimensions of 5x5x10 mm via wire electrical discharge machining. Densities and porosities were measured by Archimedes' method and X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM) were used to examine microstructures. It has been observed that the AZ91 alloy was partially melted during hot pressing at 450 and 500 °C, and the maximum temperature that can be applied to achieve a completely solid state sintering is lower than the eutectic temperature (437 °C). The AZ91 alloy was found by SEM observations to reach full density after hot pressing at 420 °C for 1 hour. XRD and SEM analyzes revealed that the microstructure was composed of  $\alpha$  (Mg-rich) and  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) phases. The mechanical properties of the alloys and reference materials produced were determined by compression tests at carried out at room temperature, 100, 150 and 200 °C. The mechanical properties of the AZ91 alloy produced by hot pressing were found to be better than those produced by casting methods and values of 183 MPa, 241 MPa and 10.1% were obtained for yield strength, compressive strength and ductility, respectively. As expected, as the test temperature increased, the yield and compressive strengths decreased and the ductility increased.

**Keywords:** AZ91 magnesium alloy, Mechanical properties, Microstructure, Hot pressing, Powder metallurgy



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ'a teşekkür ederim. Ayrıca araştırmam süresince yardımlarını esirgemeyen Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü'nden Sayın Öğr. Gör. Fevzi KELEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın finansal desteğini sağlayan Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına (BAP) (Proje No:2015-FBE-YL275) ve TÜBİTAK'a (Proje No: 215M808) teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

2018

Erhan AYDEMİR



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları .....	3
1.1.1. Magnezyumun tarihi ve gelişimi .....	3
1.1.2. Magnezyumun fiziksel özellikleri .....	5
1.1.3. Magnezyumun mekanik özellikleri .....	7
1.1.3.1. Alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarına etkisi.....	8
1.1.4. Magnezyum alaşımlarının standartları .....	9
1.1.5. Magnezyum alaşımlarının kullanım alanları .....	11
1.1.6. AZ91 alaşımı .....	13
1.2. AZ91 Alaşımlarının Üretim Yöntemleri .....	17
1.2.1. Döküm yöntemleri.....	17
1.2.1.1. Basınçlı döküm yöntemi.....	18
1.2.1.2. Kokil kalıba döküm .....	22
1.2.1.3. Kum kalıba döküm .....	23
1.2.1.4. Yarı-Katı döküm yöntemi.....	24
1.2.2. Toz metalurjisi yöntemi.....	25
1.2.2.1. Sıcak presleme .....	25
1.2.2.2. Sıcak izostatik presleme .....	28
1.2.2.3. Spark plazma sinterleme.....	29
1.2.3. AZ91 alaşımı ile ilgili yapılan çalışmalar.....	31
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	37
2.1 Kullanılan Tozlar .....	37
2.2. Numune Üretimi .....	40

	Sayfa
2.3. Karakterizasyon İşlemleri.....	46
2.3.1. Yoğunluk ölçüm işlemleri .....	46
2.3.2. X-Işını kırınımı .....	48
2.3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	48
2.4. Mekanik Testler .....	49
2.4.1. Mikro sertlik .....	49
2.4.2. Basma testi.....	50
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
3.1. Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu.....	51
3.2. Yoğunluk Ölçümleri .....	53
3.3. Makro ve Mikroyapı.....	55
3.4. Mekanik Analizler .....	68
3.4.1 Sertlik analiz bulguları.....	68
3.4.2. Mekanik basma testi bulguları.....	70
4. SONUÇLAR.....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83



## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1. 1. Magnezyumun Fiziksel Özellikleri (Gaines ve ark., 1996).....	5
Çizelge 1. 2. Magnezyumun başlıca avantaj ve dezavantajları (Friedrich ve Schumann, 2001; Mordike ve Ebert, 2001; Froes vd. 2006). ....	6
Çizelge 1. 3. Magnezyumun Mekanik Özellikleri (Westengen ve Aune, 2006).....	8
Çizelge 1. 4. Magnezyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri ve simgeleri (ASM Handbook Volume 2, 1996).....	10
Çizelge 1. 5. Üretim ve ısıl işlemlerin sınıflandırılması (Friedrich ve Mordike, 2006; Magnesium Technology, 2006) .....	10
Çizelge 1. 6. AZ91 alaşımlarının kimyasal kompozisyonu (Kaufman, 2011). ....	14
Çizelge 1. 7. AZ91 alaşımının özellikleri (Kaufman, 2011). ....	16
Çizelge 1. 8. Basınçlı dökümün belli başlı avantaj ve dezavantajları .....	19
Çizelge 1. 9. Kokil kalıba dökümün avantaj ve dezavantajları .....	22
Çizelge 1. 10. Toz metalurjisi yönteminin avantajları.....	25
Çizelge 1. 11. Sıcak presleme yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	28
Çizelge 1. 12. Döküm parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi (Pitsaris ve ark., 2003).....	32
Çizelge 1. 13. Farklı yöntemler ile üretilmiş AZ91D alaşımının mekanik özellikleri (Du ve Zhang, 2007). ....	34
Çizelge 2. 1. Numunelerin üretiminde kullanılan Mg ve AZ91D alaşım tozlarının özellikleri.....	37
Çizelge 3. 1. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait yoğunluklar .....	54
Çizelge 3. 2. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait sertlik ölçümleri .....	69
Çizelge 3. 3. Üretilen numunelerin oda sıcaklığında yapılan basma testlerin sonuçları. ....	72
Çizelge 3. 4. Mg (600 °C) ve AZ91 (A) alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri. ....	74



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. 1. 2004 yılı dünya ülkeleri Mg üretimi ve oranları (Brown, 2004).....	3
Şekil 1. 2. Magnezyumun yıllara göre tüketimi (Mordike ve Ebert, 2001). ....	5
Şekil 1. 3. Çeşitli alaşım elementlerin magnezyum metalinin gelişimine katkısı (Friedrich ve ark., 2006). ....	7
Şekil 1. 4. Mg Alaşımlarının CO <sub>2</sub> emisyonu üzerideki etkisi (Mordike ve Ebert 2001).....	11
Şekil 1. 5. AZ91 alaşımı döküm parçaları a) Üst yağ kapağı, b) Aktarma parçası. ....	12
Şekil 1. 6. AM alaşımı döküm parçaları a) Hava yastığı kutusu b) Direksiyon kilit kutusu c) Yolcu hava yastığı kilidi d) Direksiyon simidi e) panel (Landkof ve ark., 2005). ....	12
Şekil 1. 7. WE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu (Mordike and Kainer, 1998; Žaludová, 2005).....	13
Şekil 1. 8. Li esaslı magnezyum alaşımlı bir kamera kutusu (Dobrzanski ve ark., 2007).....	13
Şekil 1. 9. AZ91 alaşımının mikroyapısı (Qudong ve ark., 1999; Lin ve ark., 2007).....	15
Şekil 1.10. Döküm sonrası sırasıyla T4 (420°C, 72 saat) ve T6 (200°C) ısıl işleme görmüş AZ91 alaşımının mikroyapısı, a) 1, b) 5, c) 10 ve d) 30 saat (Zheng, 2013) .....	15
Şekil 1. 11. Basınçlı döküm ile üretilmiş parçalar.....	18
Şekil 1. 12. Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesi, (1) kalıp kapalı ve piston gerideyken, erimiş metal hazneye doğru akar, (2) piston haznedeki metali kalıbın içine akmaya zorlar ve soğuma ve katılaşma sırasında basıncı sürdürür (Groover, 2016). ....	20
Şekil 1. 13. Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi, (1) kalıp kapalı ve piston gerideyken erimiş metal hazneye dökülür, (2) Piston hareket ettirilerek metali kalıp boşluğuna akmaya zorlarken soğuma ve katılaşma sırasında basıncı sürdürür (Groover, 2016). ....	21
Şekil 1. 14. Kokil kalıba döküm işlemi. ....	22

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1. 15. Kum kalıba döküm yöntemi. ....	23
Şekil 1. 16 .Yarı-katı sıcaklık ve durumu 1) katı, 2) sıvı (Watarai ve ark., 2004). ....	24
Şekil 1. 17. Yarı-katı döküm yöntemi (Watarai ve ark., 2004). ....	24
Şekil 1. 18. Sıcak presleme makinesi (internet, 2015). ....	26
Şekil 1. 19. Sıcak preslemede kullanılan kalıp ve zımbaların (panç) görünümü. ....	27
Şekil 1. 20 .Sıcak izostatik presleme cihazının şematik görüntüsü (Aybers, 1999; Tokita, 2004). ....	29
Şekil 1. 21. Spark plazma sinterleme ünitesi (Tokita, 2004). ....	30
Şekil 1. 22. Spark plazma sinterleme ile üretilen malzemelerin şeması (Tokita, 2004). ....	30
Şekil 1. 23. Toz partikülleri arası darbeleri akım akışı. ....	31
Şekil 1. 24. AZ91 alaşımının soğuma hızına bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişimi. ....	33
Şekil 1. 25. AZ91 alaşımına silisyum ilavesi ile gözlenen değişimler (Ünal ve ark., 2009). ....	35
Şekil 2. 1. Magnezyum tozuna ait XRD analiz sonuçları. ....	38
Şekil 2. 2. AZ91D alaşım tozlarının XRD analiz sonuçları. ....	38
Şekil 2. 3. (a-b) magnezyum, (c-d) AZ91D tozlarına ait SEM görüntüleri. ....	39
Şekil 2. 4. (a-b) magnezyum, (c-d) AZ91D tozlarına ait büyütülmüş SEM görüntüleri. ....	40
Şekil 2. 5. Numune üretiminde kullanılan sıcak pres cihazı. ....	41
Şekil 2. 6. Tozların muhafaza edildiği eldivenli kabin. ....	42
Şekil 2. 7. Tozların ölçümünde kullanılan terazi. ....	42
Şekil 2. 8. a) Kullanılan kalıp takımı b) üretilen numune c) sıcak pres cihazına yerleştirilen kalıp takımı. ....	43
Şekil 2. 9. Tel erezyon ile kesilmiş numuneler. ....	44

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2. 10. Numunelerin zımparalanması.....	45
Şekil 2. 11. a) AZ91D alaşımı ve b) Saf Mg numune örnekleri.....	45
Şekil 2. 12. Zımparalanan numunelerin ultrasonik temizlenmeye tabi tutulması. ....	46
Şekil 2. 13. AZ91D alaşımının yoğunluk ölçümü. ....	47
Şekil 2. 14. Numunelerin analizinde kullanılan SEM cihazı.....	48
Şekil 2. 15. Shimadzu HMV-G marka sertlik ölçüm cihazı.....	49
Şekil 3. 1. AZ91D alaşımının 450 °C'de 1 saat süreyle sinterleme sonrasında elde edilen görüntü. ....	51
Şekil 3. 2. Al-Mg ikili faz diyagramı. ....	53
Şekil 3. 3. Farklı koşullarda üretilen saf Mg ve AZ91D alaşımlarının ortalama yoğunlukları.....	54
Şekil 3. 4. a) AZ91D alaşımı ve b) Mg makro yapıları.....	55
Şekil 3. 5. a) Mg tozu, b) 420 ve c) 600 °C'de sinterlenmiş Mg numunelere ait XRD paternleri.....	57
Şekil 3. 6. a) AZ91D tozu, b) AZ91D (A) ve c) AZ91D (B) numunelerine ait XRD paternleri.....	58
Şekil 3. 7. a) 420 °C'de üretilmiş Mg, b) 600 °C'de üretilmiş Mg, c) 420 °C'de üretilmiş AZ91D (A), d) 420 °C'de üretilmiş AZ91D (B) numuneleri.....	61
Şekil 3. 8. a) 420 °C'de üretilmiş Mg, b) 600 °C'de üretilmiş Mg, c) 420 °C'de üretilmiş AZ91D (A), d) 420 °C'de üretilmiş AZ91D (B) numunelerinin farklı büyütmelelerdeki görüntüleri. ....	63
Şekil 3. 9. AZ91D alaşımında oluşan fazların SEM görüntüsü.....	64
Şekil 3. 10. Mg tane içerisinde alınan EDS analiz sonucu. ....	64
Şekil 3. 11. Mg tane sınırında yapılan çizgisel EDS analiz sonucu. ....	65
Şekil 3. 12. AZ91D alaşımının fazları dışında alınan EDS görüntüsü.....	66
Şekil 3. 13. AZ91D alaşımı üretiminde oluşan fazlar üzerinde alınan EDS görüntüsü. ....	67

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3. 14. a) 420 °C saf Mg b) 600 °C saf Mg c) 420 °C AZ91D (A) d) 420 °C AZ91D (B) numunelerine ait sertlik ölçüm görüntüleri. ....	68
Şekil 3. 15. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait sertlik grafiği. ....	70
Şekil 3. 16. Üretilen numunelerin oda sıcaklığında basma testleri. ....	71
Şekil 3. 17. a) Mg (600 °C) ve b) AZ91D (A) numunesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değişimi grafikleri. ....	73
Şekil 3. 18. a) 25 °C, b) 100 °C, c) 150 °C, d) 200 °C sıcaklıklarında basma testlerine tabi tutulmuş Mg ve AZ91D alaşımlarının gerilme-birim şekil değişimi diyagramları. ....	74
Şekil 3. 19. Üretilen Mg (600 °C) ve AZ91D (A) numunelerinde a) akma dayanımı, b) basma dayanımı ve c) kırılma birim şekil değişiminin sıcaklıkla olan ilişkisi. ....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikron
<b><math>^{\circ}\text{C}</math></b>	Celsius Derecesi
<b>dk</b>	Zaman Birimi, Dakika
<b>GPa</b>	GigaPaskal
<b>gr</b>	Gram
<b>ml</b>	Mili Litre
<b>mm</b>	Milimetre
<b>MPa</b>	Mega Paskal
<b>nm</b>	Nanometre
<b>Vb</b>	Ve benzeri
<b>V</b>	Hacim
<b>Wt</b>	Kütle

**Kısaltmalar****Açıklama****EDS**

Enerji Dağılım Spektroskopisi

**HB**

Brinell Sertlik

**HV**

Vickers Sertlik

**MMK**

Metal Matrisli Kompozit

**OM**

Optik Mikroskop

**RE**

Nadir Toprak Elementleri

**SEM**

Taramalı Elektron Mikroskobu

**HİP**

İzostatik Sıcak Presleme

**TM**

Toz Metalurjisi

**XRD**

X-Işınım Kırınımı



## 1. GİRİŞ

Son yıllarda hafif metal kullanımı birçok sektörde önemli hale gelmiş ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu durum, üreticilerin önceliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin geçmişte otomobil üreticileri sadece konforlu, güvenli ve performanslı araçlar üretirken günümüzde petrol fiyatları ve çevre kirliliğinin artması daha hafif ve çevreci araçlar üretme ihtiyacı doğurmuştur. Bundan dolayı, birçok sektörde malzemenin hafif olması ve dayanım özelliklerinin de belirli bir düzeyde olması istenmektedir. Bu yüzden yapısal malzemelerin içerisindeki en hafif metal olan magnezyum üzerinde çalışmalar yapılmış ve birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır (Kainer, 2003; Ünal ve ark., 2009; Gupta ve Sharon, 2011).

Magnezyum, saf haldeki yetersiz mekanik özelliklerinden dolayı tek başına kullanılamaz. Bu yüzden başka metaller ile alaşımlandırılarak veya takviye elemanları katılarak kullanıma sunulmaktadır (Friedrich ve Mordike, 2006; Czerwinski, 2008; Yang ve ark., 2008).

Magnezyum alaşımları, döküm ve plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Magnezyum ve alaşımlarının dökümünde en çok basınçlı döküm tekniği kullanılmaktadır. Ayrıca hassas döküm, gravite döküm ve yarı-katı döküm yöntemleri de kullanılmaktadır (Avedesian ve Baker, 2006; Kaçar ve Öztürk, 2006; Vanlı, 2007; Kuşdemir, 2008). Magnezyum alaşımlarının şekillendirmesinde ise genellikle ekstrüzyon ve haddeleme yöntemleri kullanılmaktadır (Smith, 1995).

AZ91, diğer Mg alaşımları ile karşılaştırıldığında oda sıcaklığında yüksek dayanım gösteren ve bu nedenle en çok kullanılan ticari Mg alaşımıdır. AZ91 alaşımının iyi dökülebilir özelliğinden dolayı üretilmesinde basınçlı döküm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemin yüksek miktarlarda üretilebilirlik, iyi yüzey kalitesi, yüksek soğuma hızlarından dolayı küçük tane boyutu, karmaşık şekil üretim kolaylığı, düşük maliyet gibi avantajları olmasına rağmen, malzeme içinde kalan gaz boşlukları, kalın kesitte döküm sınırlılığı, kaynak ve ısıl işlem sınırlılığı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Basınçlı dökümde sıvı metalin kalıba doldurulması esnasında meydana gelen türbülans nedeniyle sıvı metal içerisinde hapsolan gazlar hızlı soğumanın bir sonucu olarak katılaşmış döküm mikroyapısında da bulunmaktadır. Bu gazlar döküm

sonrası uygulanan çözeltiyeye alma (T4) ve yaşlandırma (T6) ısıt işlemleri sırasında genişerek yüzey kabarmalarına ve malzemenin çarpılmasına neden olmaktadır. Bu yüzden basınçlı döküm yöntemi ile üretilen AZ91 alaşımları ısıt işlem yapılmadan kullanılmaktadırlar.

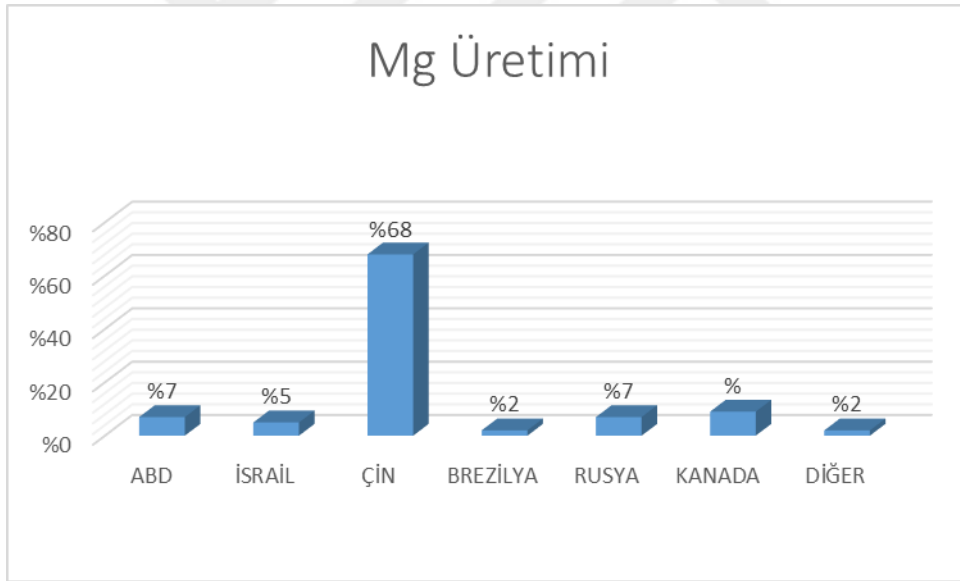
Bu çalışmada, mikroyapısında üretim sonrasında herhangi bir şekilde hapsolmuş gaz ve boşluk içermeyen dolayısıyla ısıt işlemlere uygun AZ91 alaşımlarının üretilmesi hedeflenmiştir. AZ91 alaşımı toz metalurjisi metotlarından biri olan tek eksenli sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemiyle, iç yapıları XRD ve SEM teknikleri ile mekanik özellikleri ise Vickers mikro sertlik ve basma deneyleri ile belirlenmiştir.



## 1.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları

### 1.1.1. Magnezyumun tarihi ve gelişimi

Yer kabuğunda en fazla bulunan sekizinci element olan magnezyum, son derece reaktif olduğundan tabiatta saf halde bulunmaz. Magnezyum genelde mineral halde olup bunlardan bazıları (dolomit,  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ , magnezit,  $MgCO_3$ , bischofite,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , karnalit,  $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ , serpentin,  $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  ve deniz suyu,  $Mg^{2+}$ ) ticari önem arz etmektedir (Aghion ve Golub, 2006). Dnyuda magnezyum üretiminin yaklaşık %68'ini Çin gerçekleştirmekte, ikinci sırada ise Amerika Birleşik Devletleri (ABD) yer almaktadır. Şekil 1.1'de dnyuda magnezyum üreten ülkelerin dağılımı görölmektedir.



Şekil 1. 1. 2004 yılı dnyua ülkeleri Mg üretimi ve oranları (Brown, 2004).

Çin üretimini magnezyum oksit ( $MgO$ )'in silikotermik Pidgeon prosesi ile saf magnezyuma indirgenmesi yöntemi ile yaparken, ABD'de kullanılan teknik ise deniz suyundan elde edilen magnezyum klorür ( $MgCl_2$ )'ün elektrolizi ile saf metal üretilmesine dayanan Dow prosesidir. Amerika Birleşik Devletleri 1995'e kadar dnyua

magnezyum ihtiyacının %45'ini karşılarken yıllar sonra bu üstünlüğünü Çin'e kaptırıştır. ABD, günümüzde ise pazarın %7'sini elinde tutmaktadır (Brown, 2006).

Magnezyum'un tarihi ilk kez 1754 yılında Joseph Black'in magnezyayı (MgO) keşfetmesi ile başlamıştır. 1808 yılında ise Humphrey Davy magnezyanın yeni bir elementin oksiti olduğunu keşfetmiş ve bu metali oksitten izole etmiştir. 1928 yılında Antoine Alexandre Brutun Bussy magnezyumu daha saf ve yüksek miktarda üretebilmiştir. Michael Faraday 1933 yılında ilk kez elektroliz ile magnezyum üretimi gerçekleştirmiş, 1852 yılında ise Robert Bunsen yaptığı karbon çelik elektrik hücresi ile deniz suyundan magnezyum üretmeyi başarmıştır. 1886 yılında Almanya ilk ticari magnezyumu üretmiştir (Harbolt, 2006).

1915 yılına kadar ticari anlamda magnezyum üreten tek ülke Almanya idi. ABD, birinci dünya savaşı sırasında magnezyumun yanıcı özelliğinden faydalanarak ateşli silah alanında kullanmıştır. Küçük toz ve şerit halindeki magnezyum, kolay tutuşabilir özelliğinden dolayı su, azot ve karbondioksit gibi söndürücüler söndürmede etkili değildir. Aksine magnezyum ile reaksiyona girerek yangın daha da büyüebilir. Magnezyum bu nedenle geçmişte, sıklıkla bomba yapımı, işaret fişegi, izli mermiler ve askeri alanlarda kullanılmıştır. Almanlar ve ABD ikinci dünya savaşı sırasında magnezyumu düşük yoğunluğu nedeniyle uçak imalatında kullanmışlardır. 1924 yılında ilk kez AZ (%2.5-3.0 Al; 3.0-4.0 Zn) alaşımından üretilmiş pistonlar otomobillerde kullanılmaya başlanmıştır (Harbolt, 2006). İkinci dünya savaşı ile magnezyuma olan talep azalmış 1990 yıllarına doğru magnezyuma olan talebin arttığı görülmüştür (Friedrich ve Schumann, 2001). 1944 yılında magnezyum tüketimi 228.000 ton/yıl, ikinci dünya savaşı sonunda 10.000 ton/yıl, 1998 yılında artan ilgiyle tekrar 360.000 ton/yıla ulaşmıştır (Mordike ve Ebert, 2001). 2013 yılı itibari ile magnezyum tüketimi 1.000.000 ton/yıl olmasına rağmen yıllık 50.000.000 ton tüketimindeki alüminyuma nazaran çok düşüktür. Şekil 1.2'de yıllara göre magnezyum tüketimi verilmiştir.



Şekil 1. 2. Magnezyumun yıllara göre tüketimi (Mordike ve Ebert, 2001).

### 1.1.2. Magnezyumun fiziksel özellikleri

Magnezyum bir toprak alkali metali olup periyodik tablonun 2A grubunda yer almaktadır. Atom numarası 12, atom ağırlığı 24,3050 g/mol olup, periyodik tabloda Mg simgesi ile gösterilmektedir (Housh ve ark., 1998; Kainer ve ark., 2006). Saf magnezyumun fiziksel özellikleri çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1. 1. Magnezyumun fiziksel özellikleri (Gaines ve ark., 1996)

<b>Simgesi</b>	: Mg
<b>Atom numarası</b>	: 12
<b>Atom ağırlığı</b>	: 24,312 g/mol
<b>Kaynama noktası</b>	: 1090 °C
<b>Ergime noktası</b>	: 650 °C
<b>Yoğunluğu</b>	: 1,74 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Elektron düzeni</b>	: 3s <sup>2</sup>
<b>Kristal yapısı</b>	: Hegzagonal sıkı paket
<b>Çekme dayanımı</b>	: 80–180 MPa
<b>Young modülü</b>	: 45 MPa

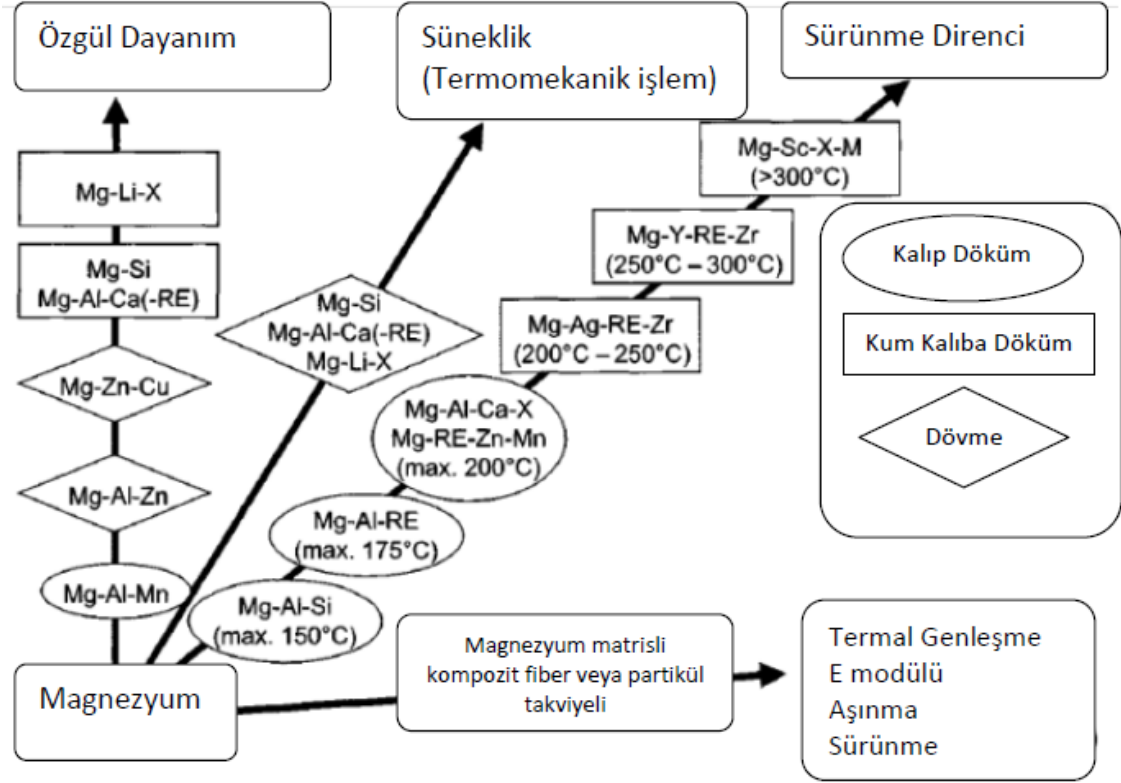
Dünyada en çok kullanılan yapısal metalik malzemeler sırasıyla demir, alüminyum ve magnezyumdur. Magnezyumun ( $1.738 \text{ g/cm}^3$ ) yoğunluğu demir ( $7.87 \text{ g/cm}^3$ ) ve alüminyuma ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) göre çok daha düşük olmasına rağmen bu malzemelerden daha az kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi magnezyumun performansını önemli ölçüde etkileyen bazı dezavantajlarının (düşük mukavemet, oda sıcaklığında yetersiz süneklik, yüksek sıcaklıklarda düşük sürünme direnci) olmasıdır.

Fakat bu dezavantajlara karşın sahip olduğu bir takım avantajlar da vardır. Özellikle otomotiv ve havacılık uygulamalarında düşük ağırlığın önem arz etmesi magnezyum kullanımını cazip hale getirmiştir. Örneğin bir otomobilin yakıt tüketimi %60 araç ağırlığına bağlıdır ve %10'luk bir azalma %5'lik bir tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca yakıt tüketiminin azalmasıyla CO<sub>2</sub> salınımlarının düşürülmesi ve var olan petrol rezervlerinin daha verimli kullanılması da mümkün olacaktır. Otomotiv ve havacılık uygulamaları dışında savunma sanayi, uzay, nükleer uygulamalar, kamera, taşınabilir elektronik cihazlar, biyomalzeme ve çeşitli ev eşyalarında da kullanımları görmek mümkündür. Magnezyumun sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 1.2'de gösterilmiştir (Friedrich ve Schumann, 2001; Mordike ve Ebert, 2001; Froes ve ark., 2006).

Çizelge 1. 2. Magnezyumun başlıca avantaj ve dezavantajları (Friedrich ve Schumann, 2001; Mordike ve Ebert, 2001; Froes ve ark., 2006)

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Düşük yoğunluk	Korozyon direncinin düşük olması,
Kolay geri kazanım	Düşük elastisite modülü
Yüksek sönümlenme kapasitesi	Düşük mukavemet
Kolay bulunabilirlik	Yüksek sıcaklık dayanımının düşük olması
	Sürtünme direncinin yetersiz olması
	Düşük süneklik
	Yanıcı olması

Magnezyum saf halde kullanıma uygun değildir. Bu yüzden takviye elemanları eklenerek yada alaşım elementleri ile alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Ayrıca magnezyumun üretim yöntemleri de mekanik özelliklerinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Şekil 1.3'te magnezyum metaline eklenen çeşitli alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi görülmektedir (Friedrich ve ark., 2006).



Şekil 1. 3. Çeşitli alaşım elementlerin magnezyum metalinin gelişimine katkısı (Friedrich ve ark., 2006).

### 1.1.3. Magnezyumun mekanik özellikleri

Çizelge 1.3'te görüldüğü gibi, saf magnezyumun oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri çeşitli yüklere maruz kalan yapısal ve fonksiyonel uygulamalar için yeterli değildir (Mordike ve Lukac, 2006). Artan sıcaklıkla mukavemeti azalmakta ve oda sıcaklığında yeterli süneklik gösterememektedir.

Çizelge 1. 3. Magnezyumun mekanik özellikleri (Westengen ve Aune, 2006)

Üretim yöntemi	Akma mukavemeti (Çekme), MPa	Akma mukavemeti (Basma), MPa	Çekme mukavemeti MPa	Süneklik %	Sertlik (Brinell) HB
Kum döküm	21	21	90	2-6	30
Ekstrüzyon	69-105	34-55	165-205	5-8	35
Haddelenmiş levha	115-140	105-115	180-220	2-10	45-47
Tavlanmış levha	90-105	69-83	160-195	3-15	40-41

### 1.1.3.1. Alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarına etkisi

Saf magnezyum, yetersiz olan mekanik özellikleri daha iyi bir duruma getirmek için birçok alaşım elementi ile alaşımlandırılmaktadır. En çok kullanılan alaşım elementleri, ve bu elementlerin mekanik özelliklere katkısı aşağıda özetlenmiştir.

Alüminyum (Al): Magnezyuma en fazla eklenen elementtir. Magnezyuma eklenen alüminyum elementi, oda sıcaklığında dayanım, sertlik, dökülebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri arttırmaktadır. Ayrıca alaşımın katılma zamanını uzatmakta ve döküm alaşımlarında gözenekliği azaltmaktadır. (Czerwinski, 2008; Ünal ve ark., 2009; Gupta ve ark., 2011).

Çinko (Zn): Tane sınırındaki ötektiği arttırarak, alaşımın erime sıcaklığını azaltmaktadır. Ayrıca, alaşıma ilavesi korozyonu düşürmektedir (Schwam ve ark., 2000; Barber, 2004; Watarai, 2006;). Çökelti sertleşmesi sayesinde sertliği, dayanımı, akıcılığı ve buna bağlı olarak çekme mukavemetini arttırır (Zhang, 2000; Barber, 2004).

Mangan (Mn): Magnezyum içerisindeki demirin çözünürlüğünü azaltarak, korozyon direncini geliştirir. Ayrıca akma mukavemeti ve sürünme direncini iyileştirir.

Kalsiyum (Ca): Sürünmeye dayanıklı magnezyum alaşımlarının üretilmesinde alternatifidir. Bu alaşımın ilavesi ile  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı yerine termal kararlılığı daha iyi olan  $Al_2Ca$  çökeltileri oluşmaktadır. Kalsiyum ile alaşımlama korozyon direncini düşürmektedir.

Silisyum (Si): Oluşturduğu silis ( $Mg_2Si$ ) intermetaliklerinden dolayı yüksek sıcaklık dayanımını arttırır. Fakat magnezyum alaşımlarında dökülebilirliği düşürür.



Gümüş (Ag): Magnezyum alaşımlarının yaşlandırma, sertleşme tepkisini ve yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirir. Fakat korozyon direncini düşürür.

Nadir Toprak Elementleri (RE): Magnezyum ile olan alaşımlarında sürünme dayanımını, korozyon direncini ve yüksek sıcaklık mukavemetini artırır. Yüksek maliyetli olduğundan kullanımı sınırlıdır.

Toryum (Th): 350 °C sıcaklıkta bile üstün sürenme direnci sağlamaktadır. Fakat toryumun radyoaktif bir element olmasından dolayı toryum içeren magnezyum alaşımları kullanımdan kaldırılmıştır.

İtriyum (Y): Nadir toprak elementleriyle kullanıldığında 300 °C sıcaklıklara kadar sürünme direncini artırır.

Zirkonyum (Zr): Magnezyum alaşımlarında tane küçültücü görevi görmektedir. Alüminyum yada mangan içeren alaşımlarda kararlı bileşikler oluşturduğundan kullanılmaz.

Stronsiyum (Sr): Magnezyum alaşımlarında gözenek eğilimini düşürür. Mg-Al sisteminde tane inceltici etkisi vardır ve ayrıca sürünme direncini geliştirir.

#### **1.1.4. Magnezyum alaşımlarının standartları**

Magnezyum alaşımları, 1948 yılında hazırlanmış olan ASTM (A275) standardı ile ifade edilmektedir. İçerdikleri alaşım elementine göre 5 ana grupta (Al, Mn, Zn, Zr ve RE) sınıflandırılırlar. Alaşımların adlandırılması iki harf ve iki sayı ile belirtilir. Harfler alaşımı içeren en yüksek orandaki alaşım elementlerini ifade ederken, sayılar ise alaşım elementlerin ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir. Örneğin **AZ91E-T6** alaşımını ele alabiliriz. Gösterimdeki “**AZ**” harfleri alüminyum ve çinko elementlerini, “**91**” sayısı ise elementlerin ağırlıkça yüzdelerini (%9 alüminyum %1 çinko) ifade etmektedir. “**E**” harfi standartlandırılmış alaşım içinde, beşinci alaşım olduğunu ve yüksek korozyon direnci gösterdiğini belirtir. “**T6**” ise alaşımın çözelti içine alma ısıl işlemine tabi tutulmuş ve yapay yaşlandırılmış olduğunu ifade eder (ASM Specialty Handbook, 1999). Çizelge 1.4’te magnezyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri ve simgeleri; Çizelge 1.5’te ise üretim ve ısıl işlemlerin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 1. 4. Magnezyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri ve simgeleri (ASM Handbook Volume 2, 1996)

Harf	Alaşım Elementi	Harf	Alaşım Elementi
A	Alüminyum (Al)	M	Mangan (Mn)
C	Bakır (Cu)	N	Nikel (Ni)
E	Nadir Topraklar (RE)	Q	Gümüş (Ag)
F	Demir (Fe)	S	Silisyum (Si)
H	Toryum (Th)	T	Kalay (Sn)
K	Zirkonyum (Zr)	W	İtriyum (Y)
L	Lityum (Li)	Z	Çinko (Zn)

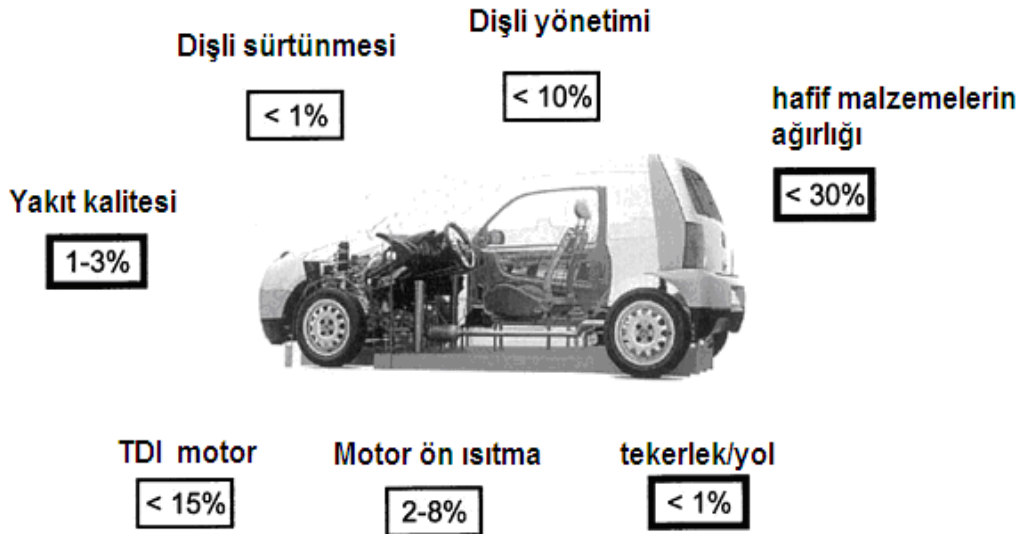
Çizelge 1. 5. Üretim ve ısıl işlemlerin sınıflandırılması (Friedrich ve Mordike, 2006; Magnesium Technology, 2006)

Genel Bölümler	
F	Üretildiği gibi
O	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş (sadece yağruk ürünler için)
H	Gerinme sertleştirilmesi yapılmış
T	F, O veya H den başka kararlı menevişler için ısıl işlem görmüş
W	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış (kararsız menevişleme)
Gerinme Sertleştirilmesi (H) Alt bölümleri	
H1	Sadece gerinme sertleştirilmesi uygulanmış
H2	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmi tavlanmış
H3	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kararlaştırılmış
Isıl İşlem (T) Alt bölümleri	
T1	Soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	Tavlanmış (sadece döküm ürünler için)
T3	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve soğuk işlenmiş
T4	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış
T5	Soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve kararlaştırılmış
T8	Çözelti ısıl işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısıl işlemi görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	Soğutulmuş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş

### 1.1.5. Magnezyum alaşımlarının kullanım alanları

Saf halde kullanımı son derece sınırlı olan magnezyum metale alaşımlandırma çalışmaları yapılarak birçok alaşım geliştirilmiştir. En büyük özelliği hafiflik olan magnezyum alaşımlarının çekme dayanımı, alüminyum ve çeliğin özgül dayanımından daha büyüktür. Bu yüzden havacılık, otomotiv, uzay, savunma ve elektronik sanayilerinde magnezyum alaşımları kullanılmaktadır (Çıtak, 2004).

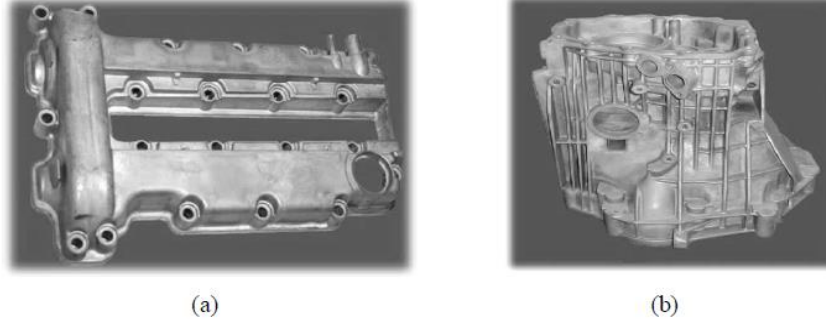
Günümüzde magnezyum alaşımlara en büyük ilgi otomotiv endüstrisinden gelmektedir. Bunun sebebi, ağırlığın azalmasıyla yakıt tasarrufu yapılması ve buna bağlı gaz emisyonlarının azalmasıdır (Şekil 1.4). Gelecek yıllarda otomobillerde ulaşılması hedeflenen yakıt tüketimi 3 litre/100km olup bu hedefe ulaşabilmek için ağırlığın %30 azaltılması gerekmektedir. Ayrıca ağırlığın azaltılması güneş enerjisi, elektrik ve hidrojen gibi alternatif kaynaklar ile çalışacağı ön görülen otomobiller için de önem arz etmektedir (Friedrich and Schumann, 2001).



Şekil 1. 4. Mg Alaşımlarının CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkisi (Mordike ve Ebert 2001).

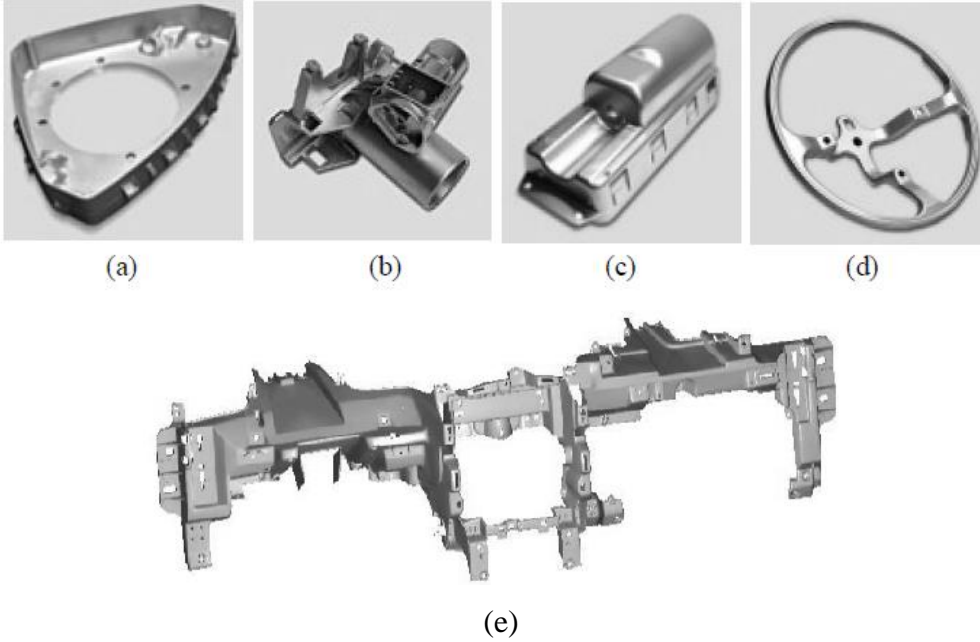
Magnezyum alaşımları, alüminyum ve çelikler ile kıyaslandığında yüksek maliyetli olmasına rağmen üstün döküm kabiliyetinden dolayı kullanımı giderek artmaktadır (Elizer ve ark., 1998). Otomobil parçalarının dökülmesinde genellikle Mg-Al-Zn (AZ91) alaşımı kullanılmaktadır. AZ91 alaşımı, magnezyumun diğer alaşımları ile kıyaslandığında daha iyi dökülebilirlik ve daha iyi akma dayanımı göstermektedir.

AZ serisi alaşımlar en fazla kullanılan ticari alaşımlar olup, otomotiv ve havacılığın yanı sıra, bilgisayar, kamera ve mobil telefonlarda da sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1.5’de AZ91 alaşımlarından üretilmiş parçaları görölmektedir (Naiyi Li, 2002).



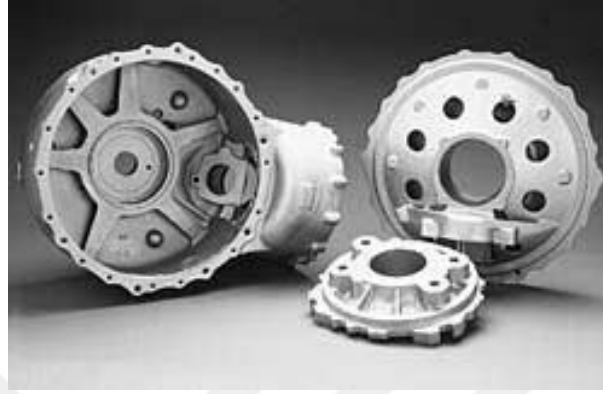
Şekil 1. 5. AZ91 alaşımı döküm parçaları a) Üst yağ kapağı, b) Aktarma parçası.

AM serisi alaşımlar yüksek tokluk ve enerji absorblama özelliği yüksek olduğundan özellikle direksiyon, tekerlek ve koltuk iskeletlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.6’da AM serili alaşımlara ait parçalar görölmektedir. Toprak elementi içeren AS41 ve AS21 alaşımları yüksek sürünme dayanımlarına sahip olduğundan aktarma parçaları imalinde kullanılmaktadır (Zhang, 2000; Vogel, 2002).



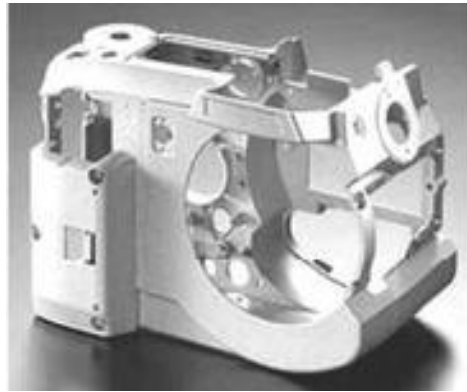
Şekil 1. 6. AM alaşımı döküm parçaları a) Hava yastığı kutusu b) Direksiyon kilit kutusu c) Yolcu hava yastığı kilidi d) Direksiyon simidi e) panel (Landkof ve ark., 2005).

AE42 alaşımları 200 °C sıcaklıklarda çalışan transmisyon elemanı ve motorlarda kullanılmaktadır (Zhang, 2000). Şekil 1.7'de WE43 alaşımından imal edilmiş helikopter vites kutusu grlmektedir (Mordike ve Kainer, 1998; Őaludov, 2005).



Şekil 1. 7. WE43 alaşımından üretilmiş helikopter vites kutusu (Mordike and Kainer, 1998; Őaludov, 2005).

Bilgisayar ve kamera gibi taşınabilir cihazların iskeletinde süper hafif Mg-Li esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Şekil 1.8'de Li esaslı bir kamera kutusu gtlmektedir.



Şekil 1. 8. Li esaslı magnezyum alaşımlı bir kamera kutusu (Dobrzanski ve ark., 2007).

#### 1.1.6. AZ91 alaşımı

AZ91 alaşımları, iyi dökülebilirlik ve mekanik özellik sergilemesinden dolayı en çok kullanılan ticari alaşımdır (Friedrich ve Mordike, 2006; Kaufman, 2011). Alaşımın mekanik ve korozyon özelliklerini ve mikroyapısını iyileştirmek için alaşım

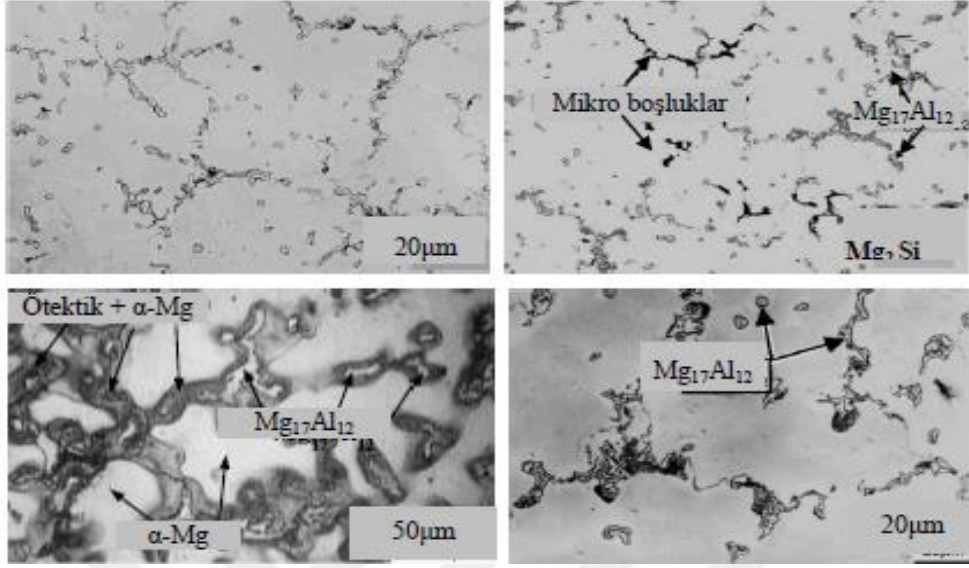
elementlerinin miktarında küçük değişiklikler uygulanmaktadır. Çizelge 1.6'da magnezyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir. Ayrıca AZ91alaşımı, ASTM standartına göre sınıflandırılmış ve Çizelge 1.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. 6. AZ91 alaşımlarının kimyasal kompozisyonu (Kaufman, 2011)

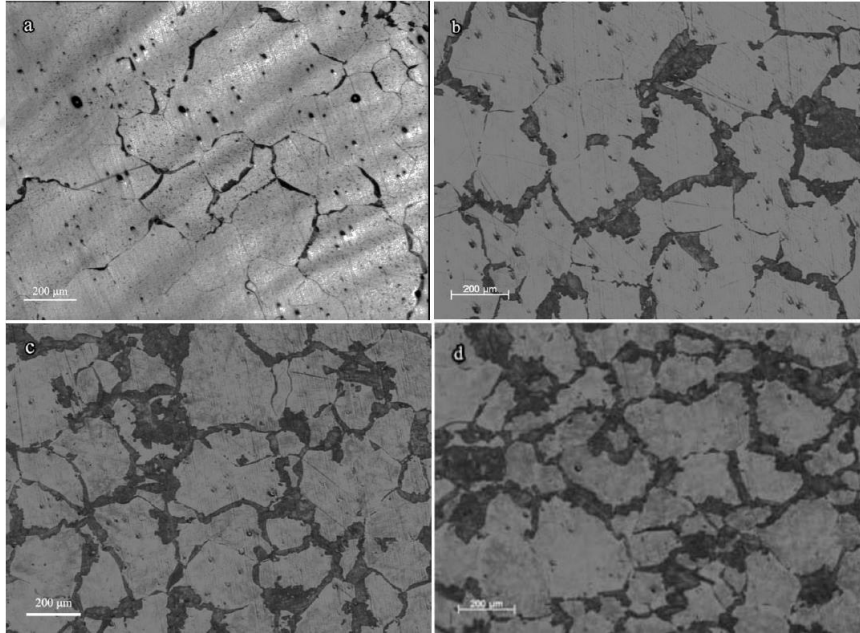
Kimyasal Kompozisyon (%)									
Alaşım	İçerik	Al	Mn	Zn	Cu	Si	Ni	Fe	Mg
AZ91A	Normal	9,0	0,3	0,7					Kalan
AZ91A	Sınırları	8,3-9,7	0,13-0,5	0,35-1,0	0,1 maks.	0,5 maks.	0,03 maks.		Kalan
AZ91B	Normal	9,0	0,3	0,7					Kalan
AZ91B	Sınırları	8,3-9,7	0,13-0,5	0,35-1,0	0,35 maks.	0,5 maks.	0,03 maks.		Kalan
AZ91C	Normal	8,5	0,3	0,7					Kalan
AZ91C	Sınırları	8,1-9,3	0,13-0,5	0,4-1,0	0,1 maks.	0,3 maks.	0,01 maks.		Kalan
AZ91D	Normal	9,0	0,3	0,7					Kalan
AZ91D	Sınırları	8,3-9,7	0,15-0,5	0,35-1,0	0,03 maks.	0,1 maks.	0,002 maks.	0,005 maks.	Kalan
AZ91E	Normal	8,5	0,26	0,7					Kalan
AZ91E	Sınırları	8,1-9,3	0,17-0,35	0,4-1,0	0,15 maks.	0,2 maks.	0,001 maks.	0,005 maks.	Kalan
AZ91F	Normal	8,5	0,26	0,7					Kalan
AZ91F	Sınırları	8,1-9,3	0,17-0,35	0,4-1,0	0,15 maks.	0,2 maks.	0,01 maks.	0,005 maks.	Kalan

Mg-Al alaşımlarında Zn/Al oranı 1/3 oranını aştığı zaman mikroyapıda üçlü Mg-Al-Zn fazı oluşur (Mordike ve Kainer, 1998). AZ91 alaşımının dengeli katılaşması, birincil  $\alpha$  (Mg) katı eriyik çekirdeklenmesi ile 600 °C sıcaklıkta başlar ve çekirdekteki büyüme ve katılaşma 470 °C sıcaklığında sona erer (Zhang, 2000; Barber, 2004). AZ91

alaşımının mikroyapısında  $\alpha$  (Mg) ve  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliti birlikte yer alır. Şekil 1.9'da AZ91 alaşımında karşılaşılabilecek mikroyapılar verilmiştir.



Şekil 1. 9. AZ91 alaşımının mikroyapısı (Qudong ve ark., 1999; Lin ve ark., 2007).



Şekil 1.10. Döküm sonrası sırasıyla T4 (420°C, 72 saat) ve T6 (200°C) ısıl işlemi görmüş AZ91 alaşımının mikroyapısı, a) 1, b) 5, c) 10 ve d) 30 saat (Zheng, 2013)

Döküm sonrası sırasıyla T4 ve T6 ısıl işlemi görmüş olan AZ91 alaşımının mikroyapısı (Şekil 1.10) incelendiğinde  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik fazının döküm yöntemlerinde olduğu gibi yine tane sınırları üzerine çöktüğü görülmektedir.

Çizelge 1. 7. AZ91 alaşımının özellikleri (Kaufman, 2011)

Alaşım	Isl işlem	Döküm Yöntemi	ASTM	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Basma akma dayanımı (MPa)	Maksimum kayma dayanımı (MPa)	Elastisitemodülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)	Poisson oranı
AZ91A	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91B	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91C	F	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	165	97	3	60	97	90	45	17	0,35
AZ91C	T4	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	275	90	15	55	90	150	45	17	0,35
AZ91C	T6	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	275	145	6	70		145	45	17	0,35
AZ91D	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91D	F	Tikso döküm		300	156	8					17	0,35
AZ91E	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91E	F	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	165	97	3	60	97	90	45	17	0,35
AZ91E	T4	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	275	90	15	55	90	150	45	17	0,35
AZ91E	T6	Kum, kalıcı kalıba	B80 B199 B403	275	145	6	66	145	145	45	17	035
AZ91F	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	140	140	45	17	035



## 1.2. AZ91 Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

### 1.2.1. Döküm yöntemleri

Magnezyum alaşımlarının üretilmesinde en çok kullanılan yöntem dökümdür. Genellikle basınçlı döküm, kokil kalıba döküm, kum kalıba döküm ve yarı-katı döküm yöntemleri kullanılmaktadır. Döküm yöntemlerinin diğer yöntemlerden daha çok tercih edilmesinin nedeni sahip olduğu bazı üstün özelliklerden kaynaklanmaktadır. Bu üstünlükleri şöyle sıralayabiliriz.

- Seri üretime uygun döküm yöntemleri geliştirilmiştir.
- Büyük ve küçük parçaların üretilmesinde uygun farklı yöntemler bulunmaktadır.
- Dökümle üretilen parçaların aşınma dayanımları yüksektir.
- Hemen hemen tüm metal alaşımların dökümü mümkündür.
- Çok karmaşık ve içi boş parçaların üretimi mümkündür.

Dökümde kullanılacak birçok alaşım olmasına rağmen, her alaşımın döküm yöntemi ile üretilmesi güçtür (Smith, 2001).

Magnezyum alaşımlarının üretilmesinde %98 oranında döküm yöntemi kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımları, üstün akıcılık özelliklerinden dolayı genellikle basınçlı döküm ile üretilmektedirler. Fakat magnezyum alaşımlarının döküm yönteminde üretilmesinde oksitlenme ve yanma kaybı gibi problemlere rastlanmaktadır (ASTM Handbook Vol. 2; Stubbington, 1998).

Magnezyum döküm alaşımları genellikle karbon potada ergitilir. Çünkü magnezyum ile yavaş reaksiyon gösteren bu potalar kullanıma en uygundur. Dökümde kullanılan kalıplar, sıvı magnezyum alaşımı içinde daha az çözündüğünden genelde demirden imal edilmektedir. Ayrıca sıvı magnezyum alaşımları oksitlenme ve yanma eğiliminde oldukları için proses süresince koruyucu gaz ile muhavaza edilmektedir. Magnezyum alaşımlarında koruyucu gaz olarak genelde Ar, SF<sub>6</sub>, N ve HFC-134a kullanılmaktadır (Paxton ve ark., 2009; Luo, 2013).

Günümüzde Mg-Al-Zn (AZ serisi) ve Mg-Al-Mn (AM serisi) gibi magnezyum alaşımlarının üretilmesi basınçlı döküm yöntemi ile yapılmaktadır. AZ serisi içerisinde en fazla kullanılan AZ91 alaşımının üretilmesi %90 basınçlı döküm yöntemi ile

yapılmaktadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında iyi mukavemet ve iyi süneklik özelliği göstermektedirler. Buna karşın yüksek basınçlı döküm ile üretilmiş bu alaşımlarda segregasyon, sıcak yırtılma ve porozite gibi istenmeyen durumlar gerçekleşmektedir (Astm Handbook Vol. 2; Stubbington, 1998; ASM Handbook Cast Metal-Matrix Composites Vol. 8).

### 1.2.1.1. Basınçlı döküm yöntemi

Basınçlı döküm, yüksek basınç altında sıvı metalin kalıp boşluğuna enjekte edilmesidir. Magnezyum alaşımları kalıp içinde mükemmel bir doldurma sağlar ve bu yöntem ile karmaşık şekilli üretimler yapılmaktadır (Şekil 1.11). Basınçlı döküm tekniği ile bisiklet parçaları, çatal bıçak takımları, saatler, klimalar, kül tablaları, el aletleri, motorlar, makaralar, traktör parçaları, tren parçaları, savaş gereçleri ve roket parçaları gibi daha sayamadığımız binlerce parça yüksek hassasiyet ile üretilmektedir (Karataş ve Kahraman, 2003).



Şekil 1. 11. Basınçlı döküm ile üretilmiş parçalar.

Kum ve kokil döküm ile kıyaslandığında kalıp doldurma işlemi yerçekimi kuvveti ile gerçekleştirilmez. Eriyik üzerinde oluşturulan basınç, kinetik enerjiye dönüştürülerek yüksek hızda kalıplara doldurulur. Kalıplara doldurulan eriyik malzeme kalıplarda mükemmel bir doldurma sağlar ve istenilen kalitede üretim gerçekleşir (Kudret ve Çetin, 2010). Basınçlı döküm yönteminin bir çok avantajı olmasına rağmen

bazı sınırlı olduğu durumlar da mevcuttur. Çizelge 1.8’de basınçlı döküm yöntemin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 1. 8. Basınçlı dökümün belli başlı avantaj ve dezavantajları

<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Yüksek verimlilik	Malzemede gaz gözeneklerinin oluşması
Yüksek yüzey kalitesi	Kalın parçaların dökülmesinin sınırlı olması
Yüksek hassasiyet	Malzemeye ısı işlemin uygulanamaması
İnce duvarlı kompleks parça üretimi	Üretilecek alaşımın sınırlı olması
İnce döküm yapısı	

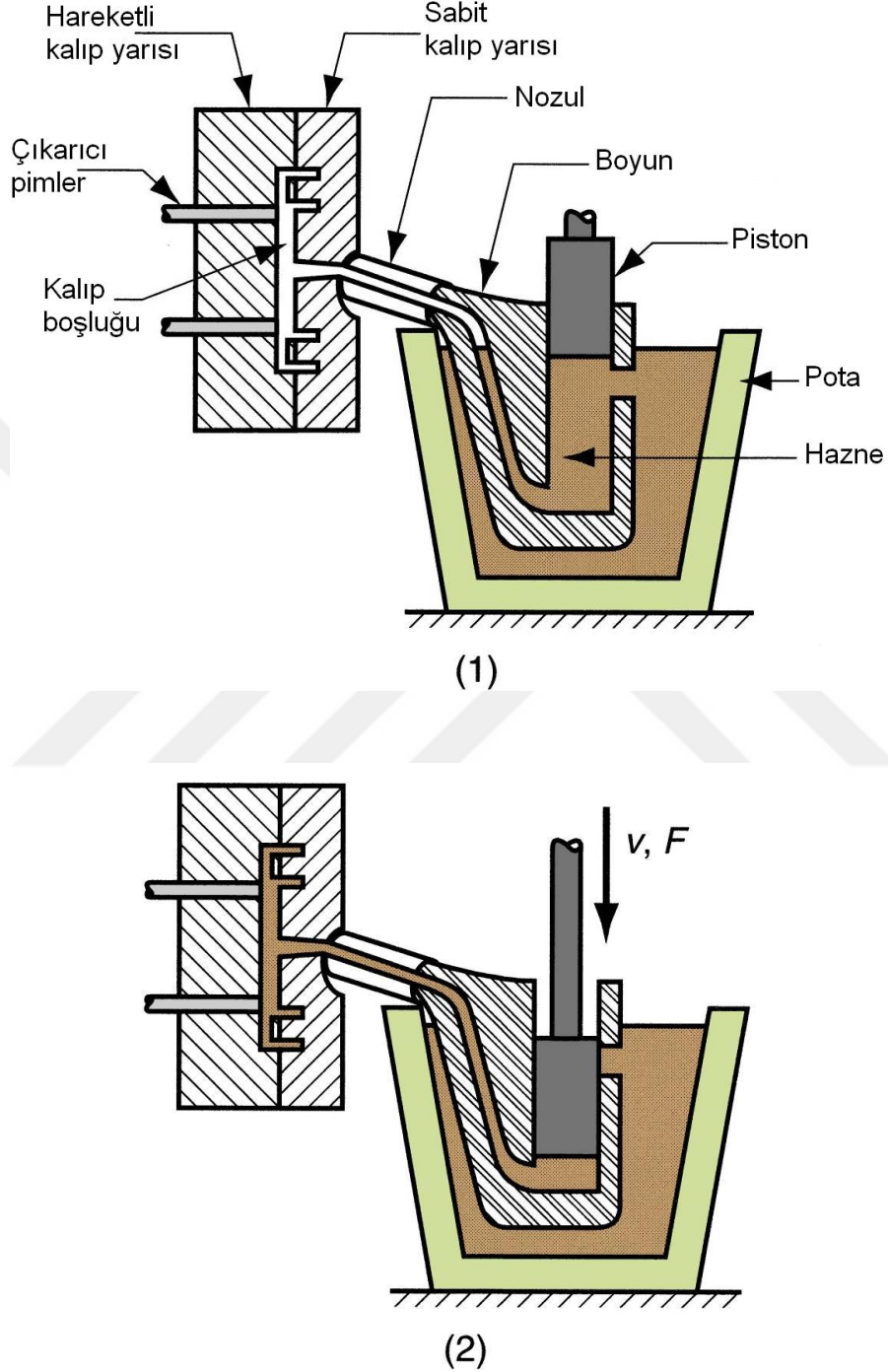
Basınçlı döküm yöntemi magnezyum alaşımlarının üretilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Özellikle endüstride en fazla kullanılan AZ91 ticari alaşımının üretilmesi %90 bu yöntem ile gerçekleşmektedir. Bu yöntem ile üretilen magnezyum alaşımları, alüminyum ve çinko alaşımlarıyla kıyaslandığında daha fazla avantajlara sahip olduğu görülür. Örnek vermek gerekirse AZ91 alaşımının üretilmesi için gereken enerji ihtiyacı ( $2 \text{ KJ/cm}^3$ ) AlSi12CuFe alaşımı için gerekli olan değer %77’sidir. Ayrıca alüminyum alaşımları demir kalıplar ile reaksiyona girerken, magnezyum alaşımları için bu durum söz konusu değildir (Zhang, 2000; Kainer, 2003; Ghomashchi, 2004; Zhou, 2004).

Basınçlı döküm yönteminde, sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı olmak üzere iki makine kullanılmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde sıcak kamaralı makineler, yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde ise soğuk kamaralı makineler kullanılmaktadır. Makineler birbirine çok benzese de enjeksiyon sistemleri birbirinden farklıdır (Doehler, 1974).

### **Sıcak kamaralı makineler**

Sıcak kamaralı makineler, düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların (çinko, kurşun, kalay) dökülmesinde kullanılmaktadır. Bu tip makinelerin ön kısmında fırın görevi gören bir hazne bulunmaktadır (Şekil 1.12). Alaşım metali bu haznede ergitilir

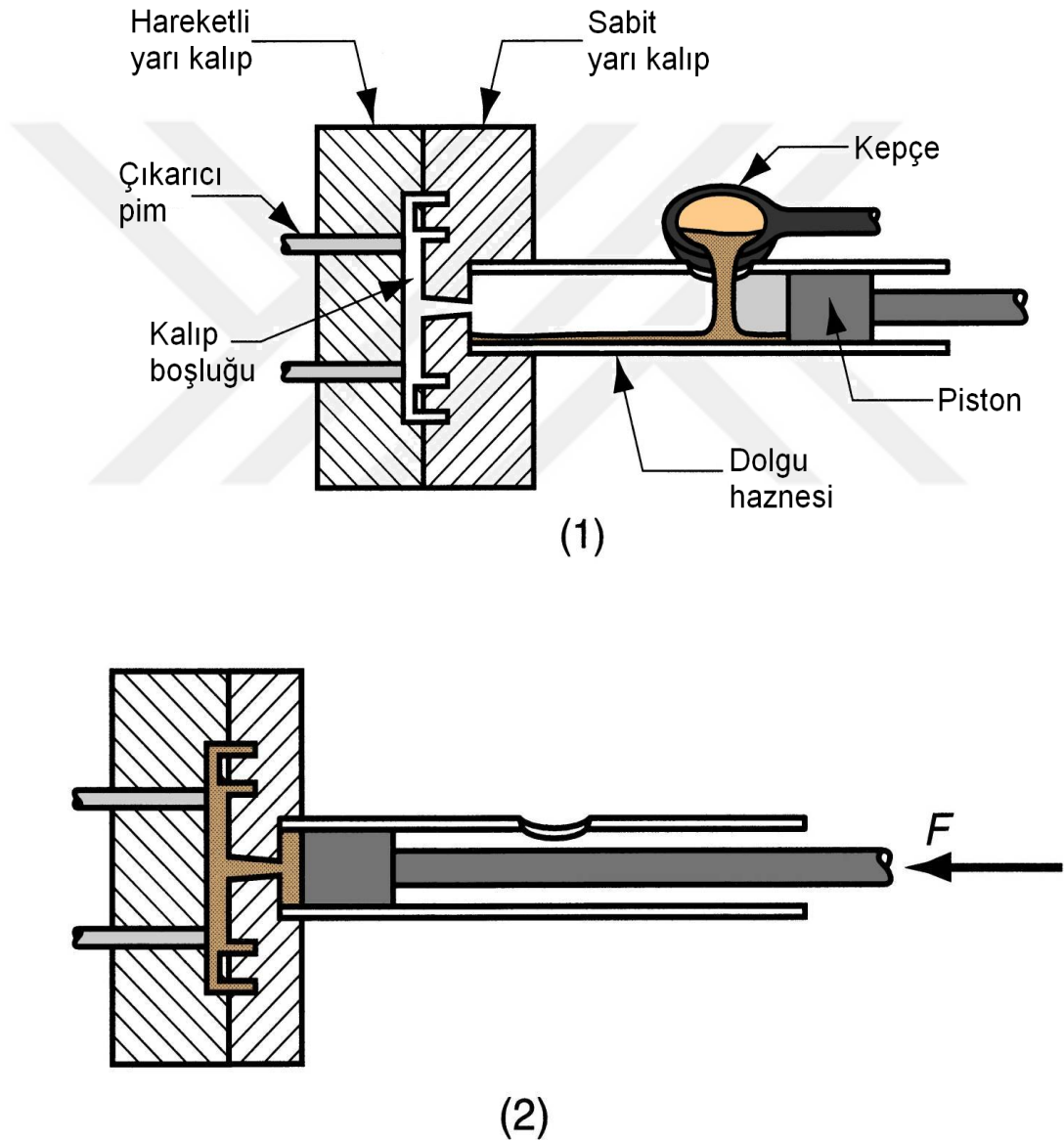
ve ergitilen alaşım metali bir piston yardımıyla kalıba gönderilir. Bu tip makinelerde 20 gramdan 22 kilograma kadar çeşitli boyutlarda malzeme üretilebilir (Vınarcık, 2003).



Şekil 1. 12. Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinesi, (1) kalıp kapalı ve piston gerideyken, erimiş metal hazneye doğru akar, (2) piston haznedeki metali kalıbın içine akmaya zorlar ve soğuma ve katılaşma sırasında basıncı sürdürür (Groover, 2016).

### Soğuk kamaralı makineler

Yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların üretilmesinde sıcak kamaralı makinelerin yetersiz kalması, soğuk kamaralı makineleri geliştirme ihtiyacı doğurmuştur. Soğuk kamaralı makinelerde, ergimiş metal haznesi makineden bağımsızdır ve ısıtılmaz (Şekil 1.13). Hazne yalnızca metalin ısısı ile ısıtılmaktadır. Bu tip makinelerde ergimiş metal 200 MPa basınç ile enjekte edilir.



Şekil 1. 13. Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi, (1) kalıp kapalı ve piston gerideyken erimiş metal hazneye dökülür, (2) Piston hareket ettirilerek metali kalıp boşluğuna akmaya zorlarken soğuma ve katılaşma sırasında basıncı sürdürür (Groover, 2016).

### 1.2.1.2. Kokil kalıba döküm

Kokil kalıba döküm, birden fazla parçadan oluşan metal kalıba ergitilmiş metalin dökülme işlemidir. Ergimiş metal herhangi bir basınç olmadan yerçekimi etkisiyle kalıbı doldurur. Şekil 1.14' kokil kalıba döküm işlemi gösterilmektedir.



Şekil 1. 14. Kokil kalıba döküm işlemi.

İki çeşit kokil kalıba döküm yöntemi bulunmaktadır. Bunlar maçanın metal veya kum olmasına bağlıdır. Metal maçalarda dökülen parçanın kolay bir şekilde çıkarılması için, parça soğutulur ve büzülmesi sağlanır. Bu mümkün değilse, metal maça yerine kum veya alçı maça kullanılır. Ayrıca kalıbın zarar görmemesi için kalıp boşluğu refrakter bir malzeme ile kaplanır ve böylece kalıp ömrü uzatılmış olur (Akbulut, 1994). Kokil kalıba döküm yöntemi, kum kalıba döküm yöntemi ile kıyaslandığında; daha iyi yüzey kalitesi, ve daha üniform parçalar üretilir. Çizelge 1.9'de kokil kalıba dökümün belli başlı bazı avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 1. 9. Kokil kalıba dökümün avantaj ve dezavantajları

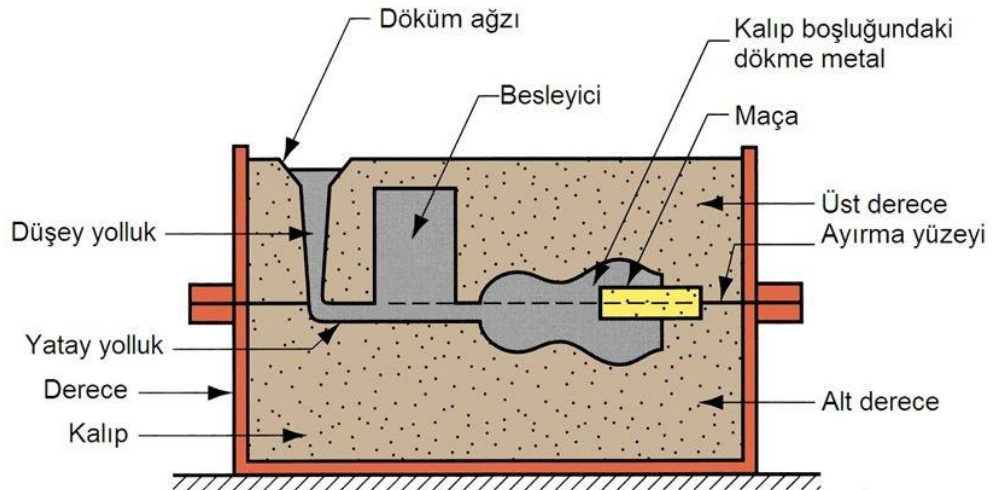
<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Dökülen parçanın yüzey kalitesinin iyi olması	Her malzemenin bu yöntem ile dökülememesi
Temizleme işlemlerinin ekonomik olması	Dökülen malzemenin kalıptan çıkarma zorluğu
Hassas boyut toleranslarına sahip olması	Genelde küçük boyuttaki parçaların dökülmesi
Seri üretime uygun olması	İlk etapta kurulumunu maliyetli olması

Mg-Al-Zn alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi ile üretimi yapılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen Mg alaşımların dökümü Al alaşımların dökümünden çok daha hızlıdır. Mg alaşımların kalıp yüzeyine yapışma riski Al alaşımların yapışma riskinden daha az olması kalıp ömrünü arttırmaktadır. Kalıplar doğru kullanıldığında ve kalıp yüzeyleri reflakter bir malzeme ile kaplandığında kalıp ömrü daha da arttırılabilir. Alüminyum alaşımları demir ile reaksiyona girdiğinden takım ömrü kısalmaktadır. Magnezyum alaşımlarında bu durum gerçekleşmediği için kalıba bir zararı olmamaktadır. Bu yüzden magnezyum alaşımları demir ve çelik kalıplarda ergitilebilir (Chen ve Jahendi, 1999).

### 1.2.1.3. Kum kalıba döküm

Kum kalıba döküm, bilenen geleneksel döküm yöntemidir. Dökülecek parçalar için hazırlanan kum kalıplara ergitilmiş metal dökülür ve üretim gerçekleştirilir (Şekil 1.15). Bu yöntem ile üretilen magnezyum alaşımlarının yanmaması için kum taneleri arasındaki boşluklardan hava geçirilmesi önlenir. Bu yüzden kalıp boşluğu koruyucu gaz ile korunmaktadır.

## Kum Döküm Kalıbı

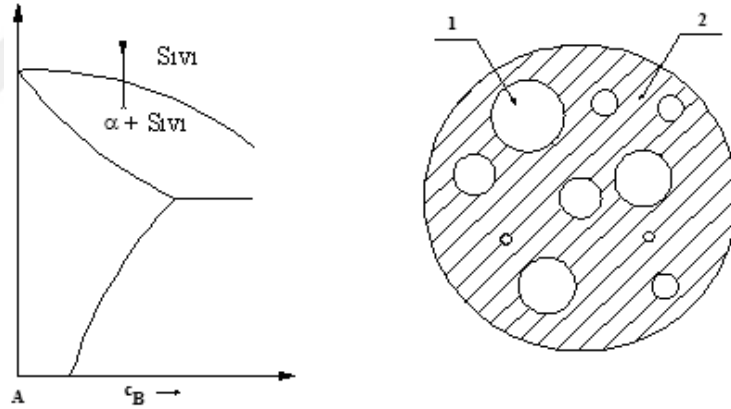


Şekil 1. 15. Kum kalıba döküm yöntemi.

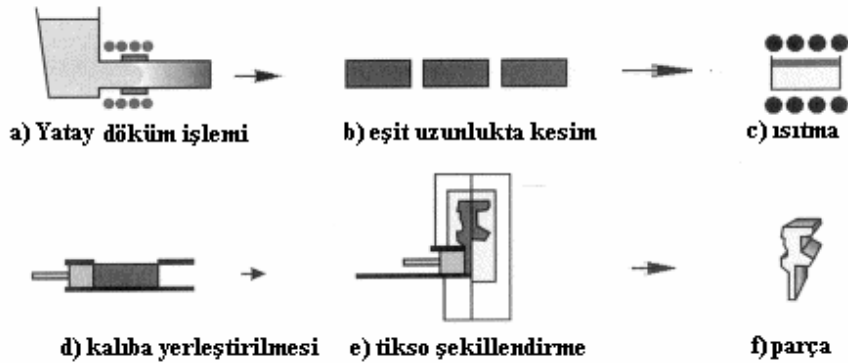
Magnezyum alaşımlarının üretilmesinde kullanılan en iyi kum döküm yöntemi kabuk kalıpcılığıdır. Kalıp üzerinde oluşturulan reçine tabakası, magnezyumun kalıp içerisinde yanmasını en aza indirecektir. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımları kolay dökülmelerine rağmen, bazı sınırlılıkları da vardır. Kum kalıpla üretilen magnezyum alaşımları mikro çekme göstermektedirler. (King, 2006).

#### 1.2.1.4 Yarı-Katı döküm yöntemi

Otomotiv üreticileri, otomobil saçlarının üretilmesinde yarı- katı üretilmiş magnezyum alaşımları üzerinde birçok çalışma yapmışlardır (Watarai ve ark., 2004). Sıvı durumdaki alaşım soğutulur ve sıvı-katı sıcaklıkları arasındaki sıcaklıkta bir karıştırma uygulanır. Böylece normal dentrik büyüme durdurulur ve kaba küresel dentrik parçacıkları oluşturulur. Şekil 1.16'da yarı-katı sıcaklık durumu ve şekil 1.17'de ise yarı-katı döküm yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1. 16 .Yarı-katı sıcaklık ve durumu 1) katı, 2) sıvı (Watarai ve ark., 2004).



Şekil 1. 17. Yarı-katı döküm yöntemi (Watarai ve ark., 2004).



### 1.2.2. Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurjisi (TM), aslında dökme ve ergitme yöntemlerinden daha önce kullanılan ve ham maddesi toz olan bir teknolojidir (Angelo ve Subramanian, 2008; Günay, 2009). TM tekniği, toz boyutlarındaki malzemelerin farklı yöntemler kullanılarak bir araya getirme işlemidir. Bu yöntem ile üretilen malzeme son formda yada son forma yakındır, ikinci bir imalat tekniğine (talaşlı imalat) çoğu zaman gerek duyulmaz. Çizelge 1.10'te toz metalurjisi yönteminin belli başlı avantajları verilmiştir.

Çizelge 1. 10. Toz metalurjisi yönteminin avantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Seri üretim yapılabilir.	Ekipmanların yüksek maliyeti.
Malzeme kaybı çok azdır. (Verim %97)	Toz kullanımı temizlik gerektirir.
Belirli derecede gözeneklilik ve geçirgenlik.	Metal tozlarının üretim maliyetleri ingota göre daha fazladır.
Yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi.	Büyük parçaları preslemek için çok yüksek basınç değerlerine ihtiyaç vardır.
İşlenmesi zor metaller TM şekillendirilebilir.	
Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin imalatı.	
Karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatı.	

#### 1.2.2.1. Sıcak presleme

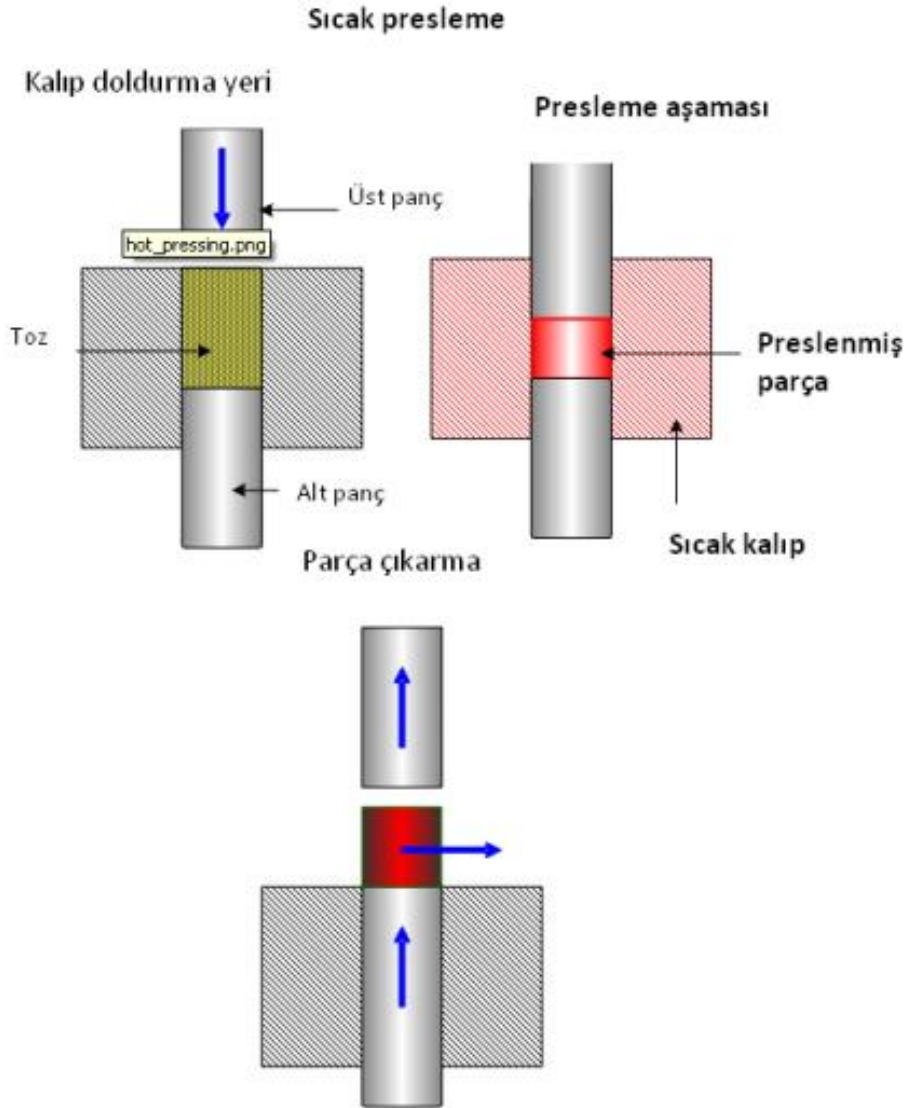
Sıcak presleme (SP), tozların yüksek sıcaklık ve basınç yardımıyla, tam yoğunluğa ulaştırıldığı sert ve gevrek malzemelerin üretilmesine yarayan bir yöntemdir. Basınç ve sıcaklık aynı anda uygulanır ve işlem sonuna kadar devam eder. Genellikle grafit kalıplar kullanılarak üretim gerçekleştirilir. Bunun sebebi ise grafitin ısı iletkenlik katsayısının yüksek olmasıdır. Ayrıca grafit kalıplar dışında tungsten karbür ve bor karbür gibi kalıplar da kullanılmaktadır. Sıcak preslemede, tek eksenli kuvvet uygulanmasına rağmen kalıp yüzey pürüzlülüğü ve numune miktarına bağlı olarak kalıp

temas yüzeylerinden numunenin merkezine doğru değişen kuvvet dağılımı görülür (Akın, 2010). Sıcak pres, sıcaklık ve basıncın uygulanması için bazı ekipmanlardan oluşmaktadır. Şekil 1.18 'de sıcak presleme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 1. 18. Sıcak presleme makinesi (internet, 2015).

Sıcak preslemede, kalıp boşluğuna toz doldurulur ve ideal şartlarda pres ve sıcaklık uygulanır. Şekil 1.19'da sıcak presleme işleminin şematik görünümü verilmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve basıncı, kullanılan kalıp malzemesinin termal iletkenliğine ve dayanımına bağlıdır.



Şekil 1. 19. Sıcak preslemede kullanılan kalıp ve zımbaların (panç) görünümü.

Sıcak preslemede, geleneksel sinterleme yöntemine nazaran daha düşük sinterleme sıcaklıklarında yoğunlaşma gerçekleşir. Bu yöntemde, ürünler vakum altında üretildiği gibi azot ve argon atmosferlerinde de üretilmektedirler. Malzemenin oksitlenmemesi için kullanılan argon ve azot gazları fırın dirençlerinin korunmasında da görev almaktadır (Pleen, 1979).

Sıcak presleme yönteminin belli başlı avantaj ve dezavantajları Çizelge 1.11'te verilmiştir.

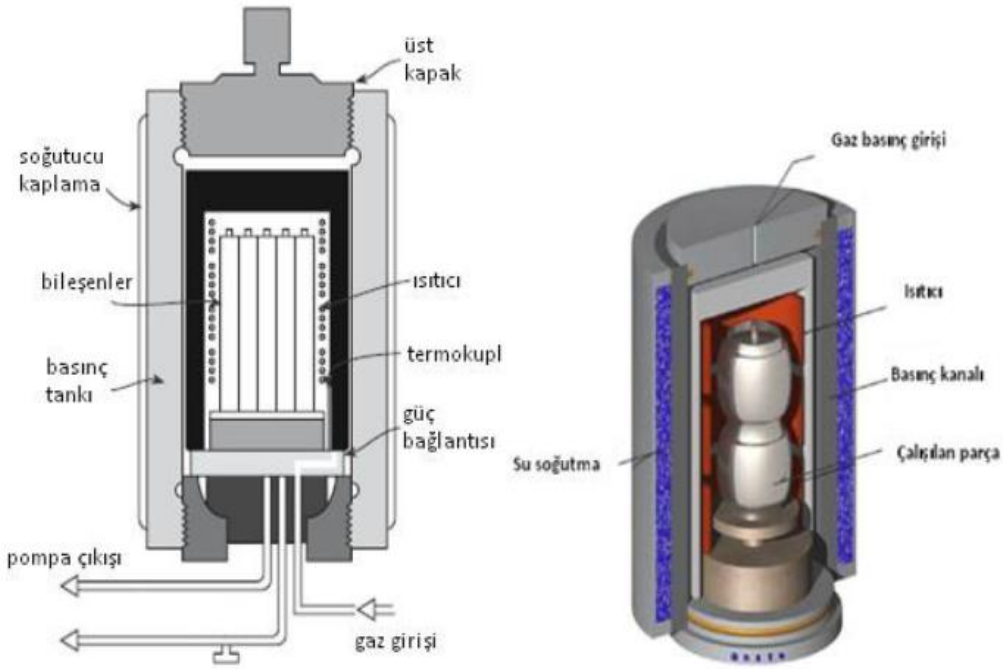
Çizelge 1. 11. Sıcak presleme yönteminin avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Saptanan fiziksel özellikler daha iyidir.	Üretimlerin yüksek maliyetli olması
Homojen iç yapıya malzemeler imal edilmekte	Kısıtlı şekillerde üretim yapılabilmesi
Yüksek yoğunluklara bağlı olarak mukavemet sağlanmakta	Ürünün işleme maliyetlerinin yüksek olması
	Kalıp sarflarının maliyetlerinin yüksek olması

Ayrıca bazı diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük ısıtma hızına sahip olması, tanelerin büyümesine neden olmaktadır. Tane büyümesi malzemenin mekanik özelliklerinin zayıflamasına sebebiyet vermektedir. Sıcak preslemede dikkat edilmesi gereken başka bir durum ise kalıp malzemesinin nasıl seçilmesi gerektiğidir. Seçilen kalıbın yüksek sıcaklıklarda malzeme ile reaksiyona girmemesi gerekir. Presleme sırasında uygulanan basınç, kalıbı plastik deformasyona maruz bırakmamalıdır (Pleen, 1979; Tokita, 2004).

#### 1.2.2.2. Sıcak izostatik presleme

Sıcak izostatik presleme, basıncın her yönden uygulandığı ve esnek kalıpların kullanıldığı bir yöntemdir. Bu yöntemde, basınç gaz aracılığıyla uygulanır ve sinterleme gerçekleştirilir. Üretim safhası sırasında herhangi bir reaksiyonun gerçekleşmemesi için argon veya helyum gazı kullanılır. Helyum gazının düşük yoğunluğa ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olması argon gazına kıyasla avantaj sağlar fakat pahalı olması bir dezavantajdır. Sıcak izostatik preslemede ısıtıcı elemanlar Mo, C, W gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerden yapılmaktadır. Basıncın malzeme iletimi metal veya cam zarflama malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilir (Aybers, 1999; Tokita, 2004). Sıcak izostatik presleme cihazının şematik görüntüsü Şekil 1.20'de gösterilmiştir.

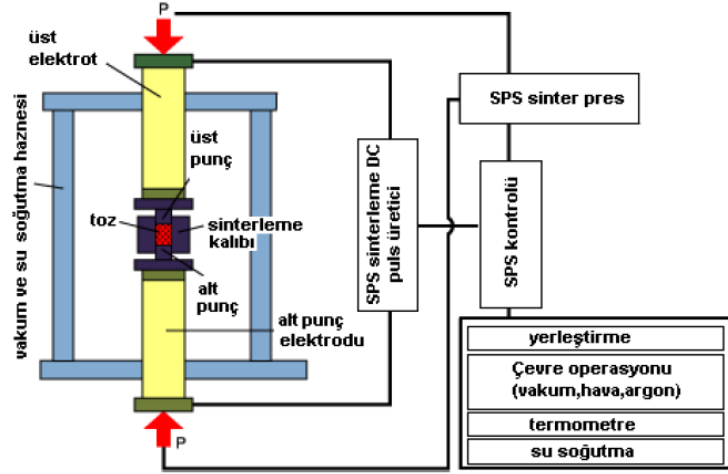


Şekil 1. 10 .Sıcak izostatik presleme cihazının şematik görüntüsü (Aybers, 1999; Tokita, 2004).

Sıcak izostatik preslemede 2000 °C sıcaklıklarda ve 30-400 MPa basınç aralığında üretimler yapılabilir. Zarflama malzemesi ile çevrilmiş, cam yatağı yöntemi ve şekillendirilmiş olmak üzere üç farklı şekilde sıcak izostatik presleme uygulanabilir. Sıcak izostatik preslemenin en büyük avantajı tane büyümesi olmadan tam yoğun malzemelerin üretilmesidir. Bu yöntemde istenen özellikler için mikroyapının zor olmasıdır. Fakat ürün şekil tutarlılığı ise yüksektir (Ünlü, 2014).

### 1.2.2.3. Spark plazma sinterleme

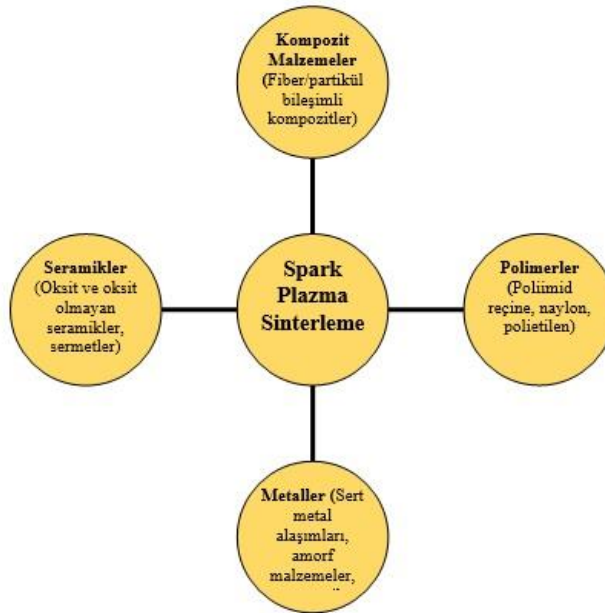
Spark plazma sinterleme yöntemi, sinterleme işleminin daha düşük sıcaklık ve sürelerde toz partüküllerine elektrik akımının verilmesi ve bu sıcaklıklarda anlık spark plazmalarının oluşturulmasıyla gerçekleşen bir yöntemdir. Spark plazma presleme yöntemi; sıcak presleme, izostatik presleme, ve basınçsız sinterleme gibi yöntemlere kıyasla sinterleme enerjisinin kontrolü, proses kolaylığı ve güvenliliği gibi birçok avantaja sahiptir. Şekil 1.21’de spark plazma sinterleme sisteminin görüntüsü gösterilmiştir (Tokita, 2004).



Şekil 1. 11. Spark plazma sinterleme ünitesi (Tokita, 2004).

Spark plazma sinterleme yönteminin çalışma prensibi, yüksek yoğunluğa sahip doğru elektrik akımının (DC) grafit kalıp ve kompakt hale gelmesi istenen tozlar üzerinden geçirilmesidir. Diğer yöntemlere nazaran spark plazma sinterlemede tozlar içeriden ısınır (Orrù ve ark., 2009).

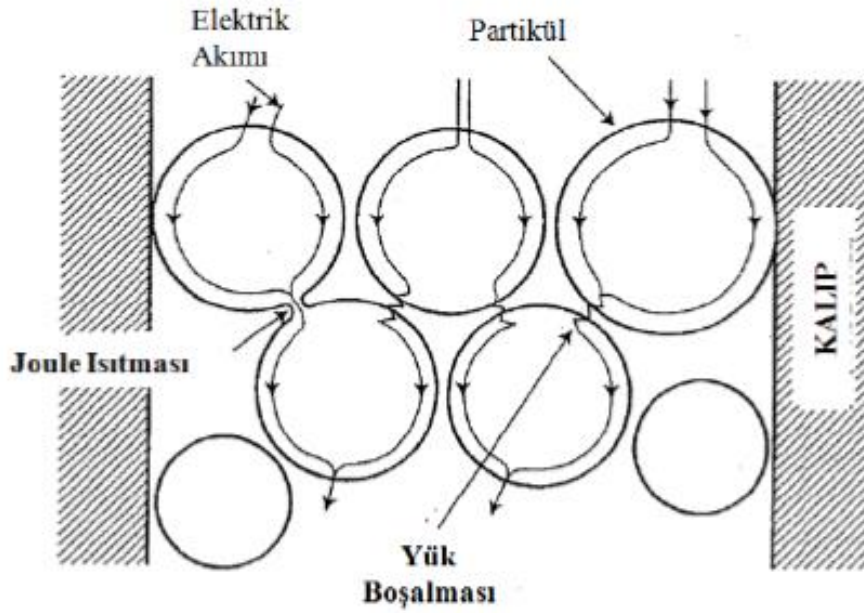
Spark plazma sinterleme yönteminde sinterlenmesi zor olan intermetalik bileşikler, fiber takviyeli seramikler, metal matrisli kompozitler (MMC) ve nonakristalin malzemeler üretilmektedir. Şekil 1.22’de spark plazma sinterleme yöntemi ile üretilen malzemelerin şeması verilmiştir.



Şekil 1. 12. Spark plazma sinterleme ile üretilen malzemelerin şeması (Tokita, 2004).

Sinterleme sırasında uygulanan basınç, partiküllerin düzenlemesi ve topakların ortadan kaybolması için yapılmaktadır. Sıcak presleme yönteminden farkı ısıtma süresinin çok hızlı olmasıdır. Spark plazma yönteminde sıcaklık hızı 1000 °C/dk'ya kadar çıkmaktadır (Tamburini, 2005).

Spark plazma, açık-kapalı darbeli doğru akım uygulaması ile spark darbe basıncı, joule ısıtması ve elektrik alan difüzyonu oluşturmaktadır. Spark plazma sinterleme işleminde tozlar arasında bir deşarj etkisi oluşturulur. Spark plazmalar yüksek sıcaklıkta püskürtme yaparak tozlar arasında yer alan gazları ve toz partiküllerinin yüzeylerindeki impüriteleri elimine eder. Oluşturulan elektrik alan ise yüksek hızdaki iyon göçü ile yüksek hızda difüzyona sebep olmaktadır. Şekil 1.23'de darbeli akımın toz partikülleri boyunca akışı gösterilmiştir.



Şekil 1. 13. Toz partikülleri arası darbeli akım akışı.

### 1.2.3. AZ91 alaşımı ile ilgili yapılan çalışmalar

Pitsaris ve arkadaşları, AZ91D, AM60B, AS21 alaşımlarının soğuk kamaralı basınçlı döküm yönteminde mekanik ve mikroyapı özelliklerini etkileyen döküm işlemlerinden olan giriş hızı ( $V_G$ ), ütüleme basıncı ( $P_U$ ), döküm sıcaklığı ( $T_D$ ) ve kalıp sıcaklığını ( $T_K$ ) incelemiştir. Çalışmada düşük-orta-yüksek olmak üzere üç farklı

seviye kullanmışlardır. Yapılan deney sonucu Çizelge 1.12’de verilmiştir (Pitsaris ve ark., 2003).

Çizelge 1. 12. Döküm parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi (Pitsaris ve ark., 2003)

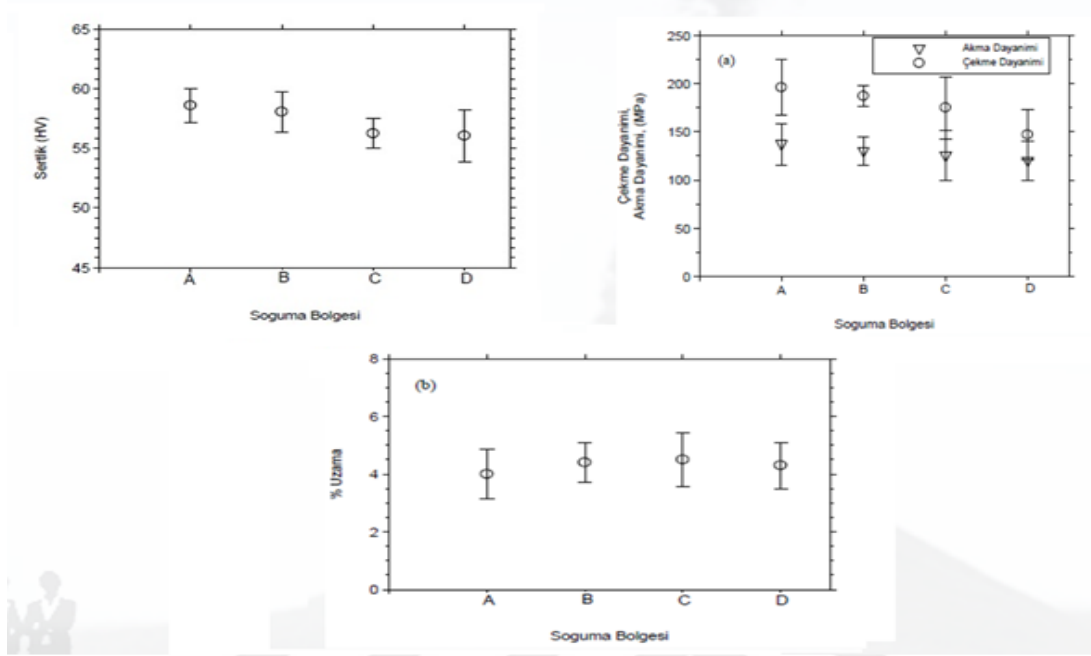
		<b>AZ91D</b>			<b>AM60B</b>			<b>AS21</b>		
		<b>Akma (MPa)</b>	<b>Kopma (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>	<b>Akma (MPa)</b>	<b>Kopma (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>	<b>Akma (MPa)</b>	<b>Kopma (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>
<b>Giriş Hızı (V<sub>G</sub>),</b>	Düşük	143.02	195.05	2.21	121.51	197.09	5.60	116.32	170.78	4.07
	Orta	145.74	212.34	3.32	125.29	208.52	7.06	118.32	209.80	8.55
	Yüksek	155.22	229.82	4.96	128.68	228.09	8.94	124.29	222.74	11.74
<b>Ütüleme Basıncı (P<sub>Ü</sub>),</b>	Düşük	144.92	211.14	3.67	121.55	196.29	5.63	120.32	199.86	7.39
	Orta	145.74	212.34	3.32	125.29	208.52	7.06	118.23	209.80	8.55
	Yüksek	150.39	220.71	4.32	130.33	215.02	7.30	123.86	231.58	13.15
<b>Döküm Sıcaklığı (T<sub>D</sub>)</b>	Düşük	142.01	195.37	2.39	119.69	212.12	7.01	114.34	190.94	6.43
	Orta	145.74	212.74	3.31	125.29	208.52	7.06	118.23	209.80	8.55
	Yüksek	158.85	240.74	5.58	131.56	251.12	13.17	122.74	221.11	10.14
<b>Kalıp Sıcaklığını (T<sub>K</sub>)</b>	Düşük	159.43	218.63	3.81	129.56	194.82	5.16	124.69	199.64	6.92
	Orta	145.74	212.34	3.31	125.29	208.52	7.06	118.23	209.80	8.55
	Yüksek	138.63	218.32	4.33	114.86	204.97	6.48	109.83	190.42	6.99

Candan Ş. ve arkadaşları AZ91 alaşımlarında soğuma hızlarının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Alaşımın soğuma hızının artması ile Şekil 1.24’den görülebileceği üzere tane boyutunun küçülmesi ve buna bağlı olarak sertlik artışı, çekme ve akma dayanımı artışı gözlenmiştir (Candan ve ark., 2014).

Lü ve arkadaşları, AZ91 alaşımının çatlak oluşumu kontrol etmişlerdir. AZ91 alaşımına çekme ve darbe testleri uygulandıktan sonra, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Uygulanan çekme ve darbe testleri AZ91 alaşımı üzerinde farklı bölgelerde ve farklı yapılarda çatlak ve yarılmalara neden olduğu tespit



edilmiştir. Çatlaklar genelde Mg/Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> arayüzde başladığı görülmüştür (Lü ve ark., 2000).



Şekil 1. 14. AZ91 alaşımının soğuma hızına bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişimi.

Lun Sin ve Dube, AZ91 alaşımının akıcılığı üzerine çalışma yapmıştır. Döküm ve kalıp sıcaklığını arttırmış ve buna bağlı olarak akıcılığın da arttığını gözlemlemişlerdir. Döküm sıcaklığının 750 °C, kalıp sıcaklığının ise 350 °C olduğu durumda akıcılığın en yüksek seviyede olduğunu tespit etmişlerdir (Lun Sin ve Dube, 2004).

Ho ve arkadaşları, AZ91 Mg alaşımına ince Cu partikülleri takviye ederek mekanik özellikleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Cu takviye edilen AZ91 alaşımının SiC takviye edilen AZ91 alaşımına nazaran sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin yüksek olduğu, fakat sünekliğinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir (Ho ve ark., 2004).

Du ve Zhang, yarı-katı basınçlı döküm yöntemi ile hazırlanan AZ91D alaşımının mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerinde çalışma yapmışlardır. Üretilen AZ91D alaşımı çekme testine tabi tutulmuş, kopma öncesindeki en yüksek kopma gerilimi ve uzamayı elde etmeyi başarmışlardır. Daha önce farklı yöntemler ile üretilen AZ91D

alaşımının mekanik özellikleri, bu çalışma ile kıyaslanmış ve Çizelge 1.13'de gösterilmiştir (Du ve Zhang, 2007).

Çizelge 1. 13. Farklı yöntemler ile üretilmiş AZ91D alaşımının mekanik özellikleri (Du ve Zhang, 2007).

Yöntem	Kopma gerilmesi (MPa)	Akma gerilmesi (MPa)	Uzama (%)
Basıncılı Döküm	212-230	140-159	3,0-5,6
Tikso Döküm	223	134	3,6
Tikso Kalıplama	150-241	-	3-5
Reo-konteyer Yöntemi	217	156	2,3
Yarı-katı Döküm	230-248	140-145	5,1-6,5

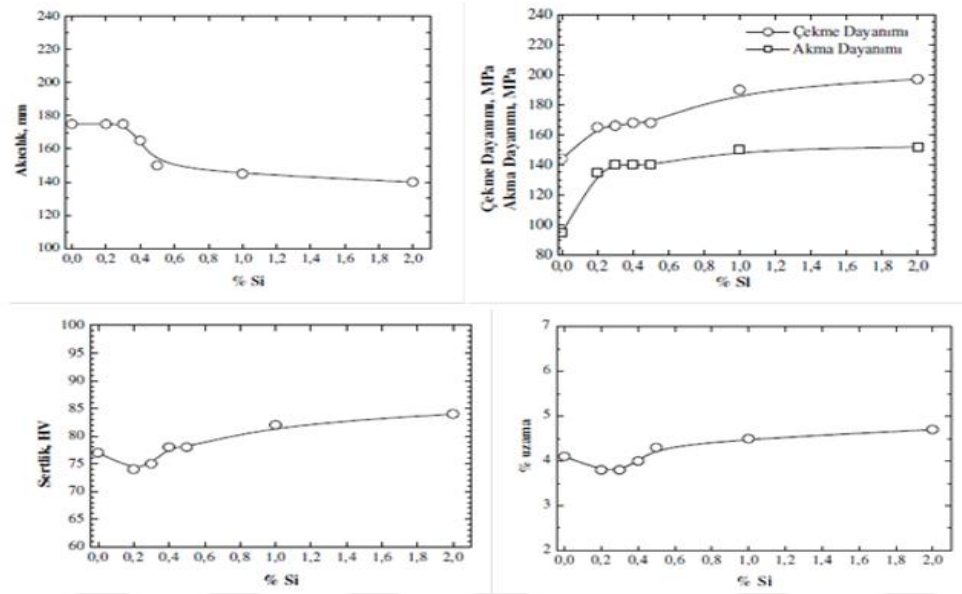
Tong ve arkadaşları, basınçlı dökümde kaliteyi etkileyen basınç faktörü üzerinde bir çalışma yürütmüşlerdir. İnce cidarlara sahip cep telefonu iskelet kalıbına, basınç sensörleri koyarak dolmuş ve katılma esnasında kalıp içi basınç değişimlerini ölçmüşlerdir. Kalıp içi basıncın optimum değerlerini tespit ederek, her baskıda en iyi kalitede üretim yapmayı başarmışlardır (Tong ve ark., 2002).

Koren ve arkadaşları, yarı-katı döküm yöntemini kullanarak AZ91 ve AM50 alaşımlarını doğrudan döküm ve külçe döküm olarak üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan viskozite testlerinde yarı-katı döküm yönteminin optimum sıcaklığı, AZ91 alaşımı için 575-595 °C ve AM50 alaşımı için ise 614-620 °C olduğu tespit edilmiştir. AZ91 alaşımı 585 °C sıcaklıkta en iyi yoğunluk ve mekanik özellikler göstermiş fakat AM50 alaşımı nispeten istenilen özellikleri gösterememiştir (Koren ve ark., 2002).

Trojanova ve Lukac magnezyum alaşımlarının basınç etkisi ile ısıl işlem uygulayarak şekillenebilme özelliklerini araştırmışlardır. AZ91, AE42, AS21, QE22, ZE41, Mg<sub>4</sub>Li ve Mg<sub>8</sub>Li alaşımlarına 230 ile 300 °C sıcaklık aralığında sertleştirme ve yumuşatma işlemleri uygulanmış farklı özellikler elde etmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşatma yapılarak dislokasyon tırmanması ve çapraz kayma üzerinde çeşitli kontroller sağlayabileceklerini gözlemişlerdir.

Ünal M. ve arkadaşları AZ91 alaşımlarının döküm ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla alaşıma ağırlıkça %0.2 – 2.0 oranlarda silisyum (Si) ilavesinin

etkisini araştırmışlardır. Şekil 1.25’de görüleceği üzere Silisyum elementinin AZ91 alaşımına ilavesiyle akıcılık azalmış (% 2.0 Si ilavesinde akıcılıkta % 25 düşüş), çekme ve akma dayanımı yükselmiştir. Ayrıca % 0.3 silisyum ilavesinden sonra % uzamada ve sertlikte orantılı artış gözlemlenmiştir (Ünal ve ark., 2009).



Şekil 1. 15. AZ91 alaşımına silisyum ilavesi ile gözlenen değişimler (Ünal ve ark., 2009)

Maki ve arkadaşları, oda sıcaklığında şekillendirilebilme özelliği kolay olmayan AZ91, AZ31, AZ61 alaşımalarını ısıtma ile şekillendirilebilme kabiliyetlerini iyileştirmek için çalışma yapmışlardır. Farklı çaplarda üretilen alaşımlar 15mm çaplı 20mm uzunluğundaki ısıtıcı rezistanları kullanmış ve bu alaşımları enjeksiyon yöntemi ile şekillendirmişlerdir (Maki ve ark., 2003).

Li ve arkadaşları, AZ91 ve AE42 alaşımlarının düşük döngü yorulma davranışlarını incelemiştir. Alaşımların yorulma ömürleri, Shimadzu marka servohidrolik test cihazında yapılmış ve test sonuçları istenilen değerlerin altında olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebinin alaşımların düşük süneklik özelliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir (Li ve ark., 2005).

Kumar ve arkadaşları, magnezyum ve AZ91 ve WE43 magnezyumun alaşımlarının yanma dirençlerini incelemiştir. Sağ magnezyum 630 °C sıcaklıkta katı halde, AZ91 alaşımının ise 680-690 °C arasında yandığını tespit etmişlerdir. Yi içeren

WE43 alaşımı ise 750 °C sıcaklıklara kadar yanmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca AZ91 alaşımında Al miktarı ve WE43 alaşımında ise Yi miktarının artmasıyla yüzeyde oksit tabakasının ve yanma sıcaklıklarının arttđını tespit etmişlerdir (Kumar ve ark., 2003).



## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

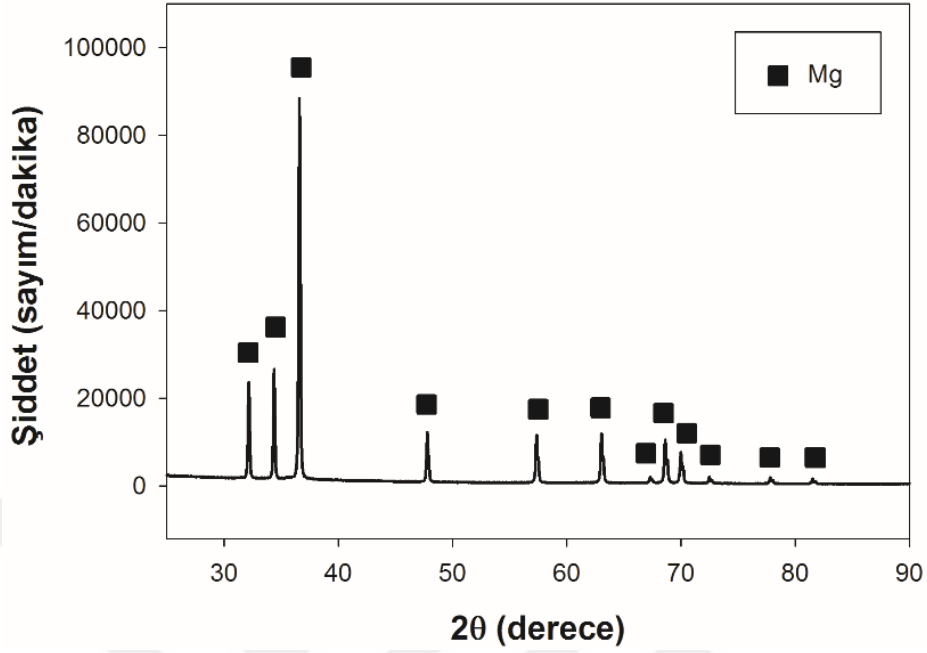
### 2.1 Kullanılan Tozlar

Numunelerin üretiminde saf magnezyum ve AZ91D tozları kullanılmıştır. Magnezyum tozu, Magnezyum ve Metal Tozları End. ve Tic. A.Ş. (Türkiye) ve AZ91D tozu ise TangShan WeiHao Magnesium Powder Co. Ltd. (Çin) firmasından satın alınmıştır. Üretimlerde 100-300µm boyutlarında talaşlı imalat ile üretilmiş magnezyum tozu ve 150-300µm boyutlarında, inört gaz atomizasyonu ile üretilmiş küresel şekilli AZ91D alaşım tozu kullanılmıştır. Magnezyum tozlarının %99 saflığa sahip olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir. Ayrıca üretici firma tarafından sertifikalı olan AZ91D alaşım tozu, kimyasal bileşim değerlerine göre ağırlıkça %90.4 Mg, %8.93 Al ve %0.43 Zn içermektedir. Magnezyum ve AZ91D tozunun boyut, şekil vb. özellikleri yanı sıra AZ91D tozunun kimyasal bileşimi çizelge 2.1’de verilmiştir.

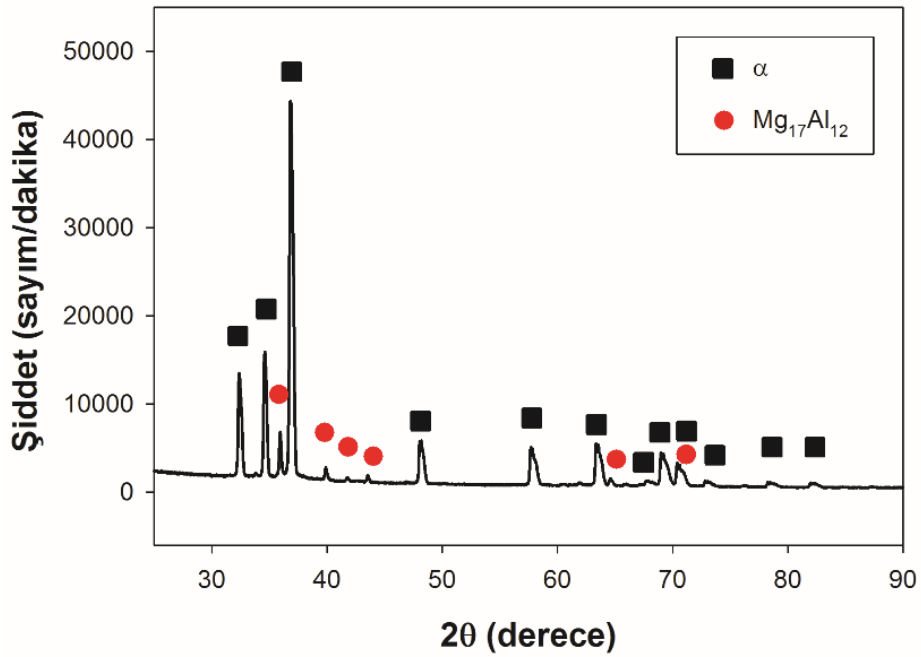
Çizelge 2. 1. Numunelerin üretiminde kullanılan Mg ve AZ91D alaşım tozlarının özellikleri

Toz	Üretim yöntemi	Toz boyutu (µm)		Toz şekli	Kimyasal bileşim
Mg	Mekanik	100-300		Yuvarlak ve düzensiz	Mg: min. 99 (ağırlıkça %)
AZ91D	Atomizasyon	150-300	+300 µm: %1.4 -150 µm: %10.6	Küresel	Mg: 90.40 Al: 8.93 (ağırlıkça %) Zn: 0.4294

Magnezyum ve AZ91D alaşım tozları X-Işını Difraktometresi (XRD) ile incelenmiştir. Görüleceği üzere saf magnezyum tozu sadece Mg, AZ91D alaşım tozu ise matris fazı olan  $\alpha$  fazına ek olarak  $Mg_{12}Al_{17}$  çökelti fazını içermektedir. Ayrıca magnezyum ve AZ91D alaşım tozlarında kirliliğe, kötü sinterlemeye ve mekanik özelliklere neden olan oksit, karbür veya nitrür gibi istenmeyen ikincil fazların bulunmadığı XRD analiz sonuçları ile teyit edilmiştir. Magnezyum ve AZ91D alaşım tozlarına ait XRD kırınım desenleri şekil 2.1 ve şekil 2.2’de verilmiştir.



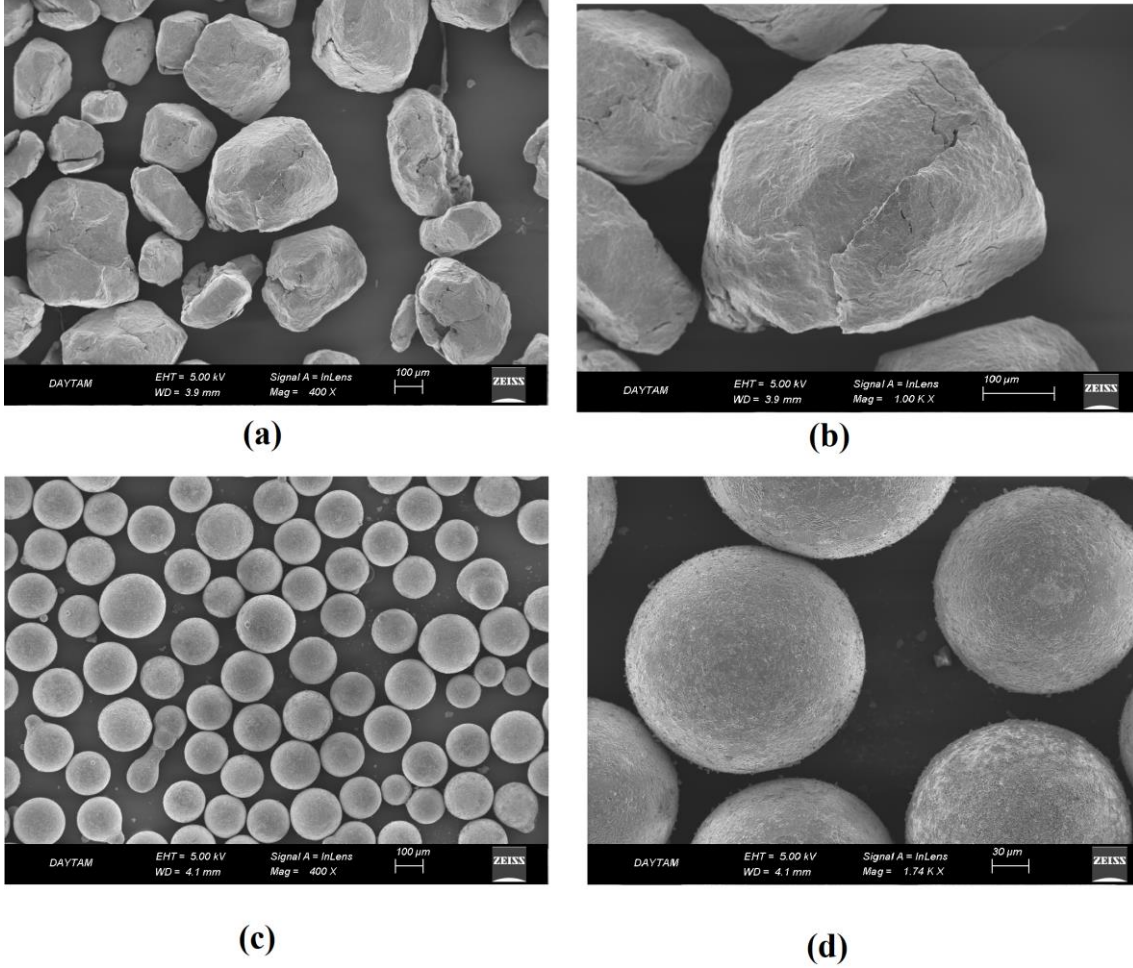
Şekil 2. 1. Magnezyum tozuna ait XRD analiz sonuçları.



Şekil 2. 2. AZ91D alaşım tozlarının XRD analiz sonuçları.

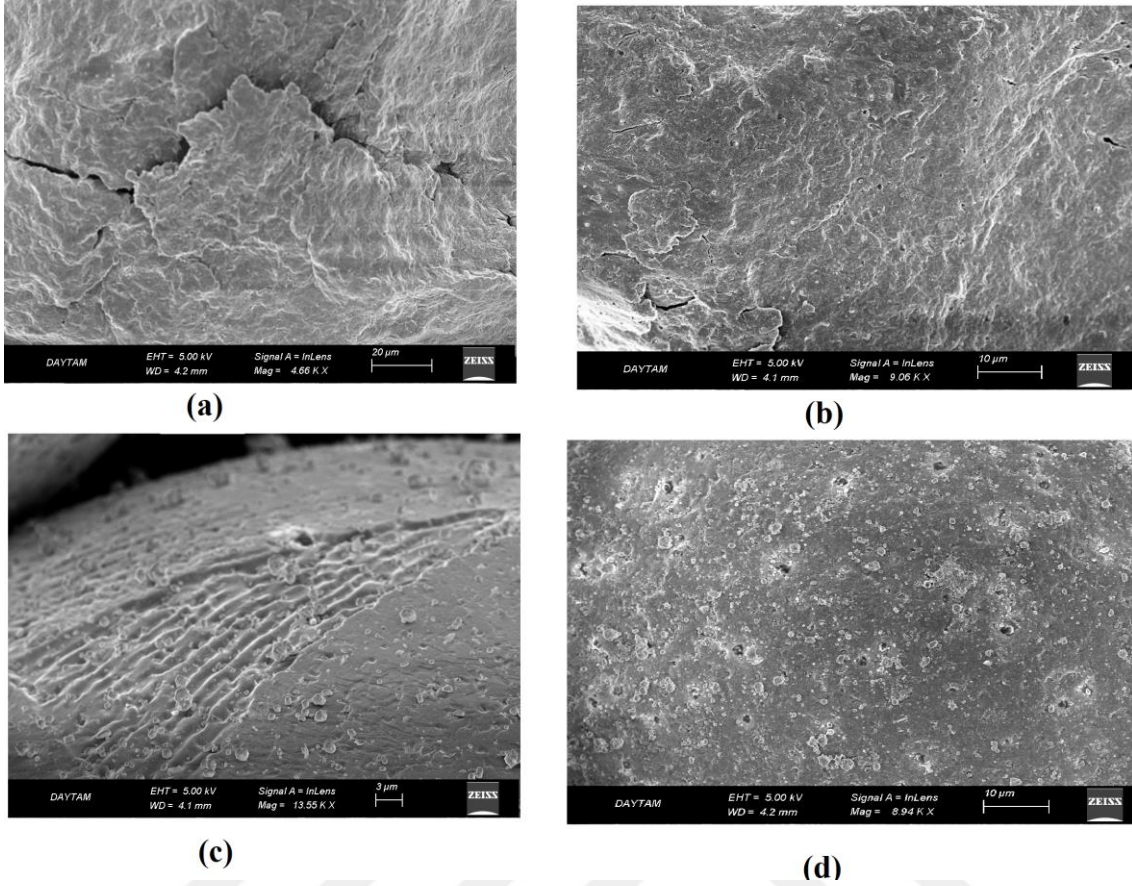
Şekil 2.3'te magnezyum ve AZ91D tozlarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Magnezyum tozu, mekanik işlemin bir sonucu olarak yuvarlak ve düzensiz şekilli parçacıklardan oluşurken, AZ91D alaşım tozu inört gaz atomizasyon yöntemi ile

üretildiği için küresel parçacıklardan oluşmaktadır. Tozların boyut, şekil vb. özelliklerinin üretici firmaların belirttiği özelliklere uyum sağladığı görülmüştür.



Şekil 2. 3. (a-b) magnezyum, (c-d) AZ91D tozlarına ait SEM görüntüleri.

Magnezyum tozunun yüksek büyütmelerdeki SEM görüntüsü incelendiğinde, yüzeylerin ara ara çatlak ve kırıklardan oluştuğu görülmektedir. Bu durumun gözlenmesi normal olup, talaşlı imalatın bir özelliğidir. Ayrıca magnezyum tozu üzerinde herhangi oksit tabakasına rastlanmadığı SEM görüntüleri ile teyit edilmiştir. AZ91D alaşım tozların yüzeyinde 1µm boyutunda çok sayıda küçük uydu parçacıkları görülmüş fakat bu parçacıklarda oksit izine rastlanmamıştır. Magnezyum ve AZ91D alaşım tozlarına ait büyütülmüş SEM görüntüleri şekil 2.4' gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. (a-b) magnezyum, (c-d) AZ91D tozlarına ait büyütülmüş SEM görüntüleri.

Magnezyum ve AZ91D alaşım tozlarının atmosfere açık ortamlarda bulunması sakıncalı bir durum teşkil eder. Atmosferde bulunan O, C ve N gibi elementler ile reaksiyona girerek oksit, karbür ve karbonitrür gibi ince yapılı tabakalar oluşabilir. Bu yüzden tozlar yüksek saflıktaki Ar gazı ile doldurulmuş eldivenli kabin içerisinde muhafaza edilmiştir.

## 2.2. Numune Üretimi

Magnezyum ve AZ91D alaşım numuneleri sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Sıcak presleme yöntemini geleneksel toz metalurjisi yönteminden ayıran özelliği basınç ve sıcaklığın aynı anda uygulanmasıdır. Cihaz maksimum 1200 °C çalışma sıcaklığı ve 10 tonluk yükleme kapasitesine sahiptir. Numune üretimi sırasında basınç manuel olarak uygulanırken, sıcaklık ise PID ünitelerden otomatik olarak kontrol



edilmektedir. Numuneleri üretmek için MSE\_M\_HP\_1300 model sıcak pres cihazı kullanılmış ve bir görüntüsü şekil 2.5'te verilmiştir.



1. Koçlar arası mesafe göstergesi
2. Analog vakum göstergesi
3. Dijital yük göstergesi
4. Dijital vakum göstergesi
5. Kompresör
6. Acil durdurma butonu
7. PID ünitesi
8. Gaz akış ölçeri
9. Manuel yük uygulama kolu
10. Koruyucu dış kapak
11. Koruyucu iç kapakla muhafaza edilmiş üretim bölümü
12. Kalıbın yerleştirildiği kısım
13. Gaz ve su bağlantıları

Şekil 2. 5. Numune üretiminde kullanılan sıcak pres cihazı.

Magnezyum ve AZ91D numunelerinin sıcak presleme yöntemi ile üretilme aşamaları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

1. Cihazın su ve gaz gibi bütün bağlantıları kontrol edilmiş ve istenilen ayarlar yapılmıştır.
2. Tozlar argon gazı ortamında eldivenli kabinde muhafaza edilmiştir (Şekil 2.6). Argon gazı ortamında saklanan tozlar yeterli miktarda alınarak kabinin ön bölmesine konulmuştur. Daha sonra kabin ile ön bölme arasındaki kapak sıkıca kapatılarak eksilen gaz kadar argon gazı eklenmiş ve kabin güvenli hale getirilmiştir. Ön bölmeye konulan tozlar kabin dışına alınmış ve ön bölmeye dolan hava vakumlanarak ortam havadan arındırılmış ve ön bölmede koruyucu ortam oluşturmak için argon gazı ile doldurulmuştur.



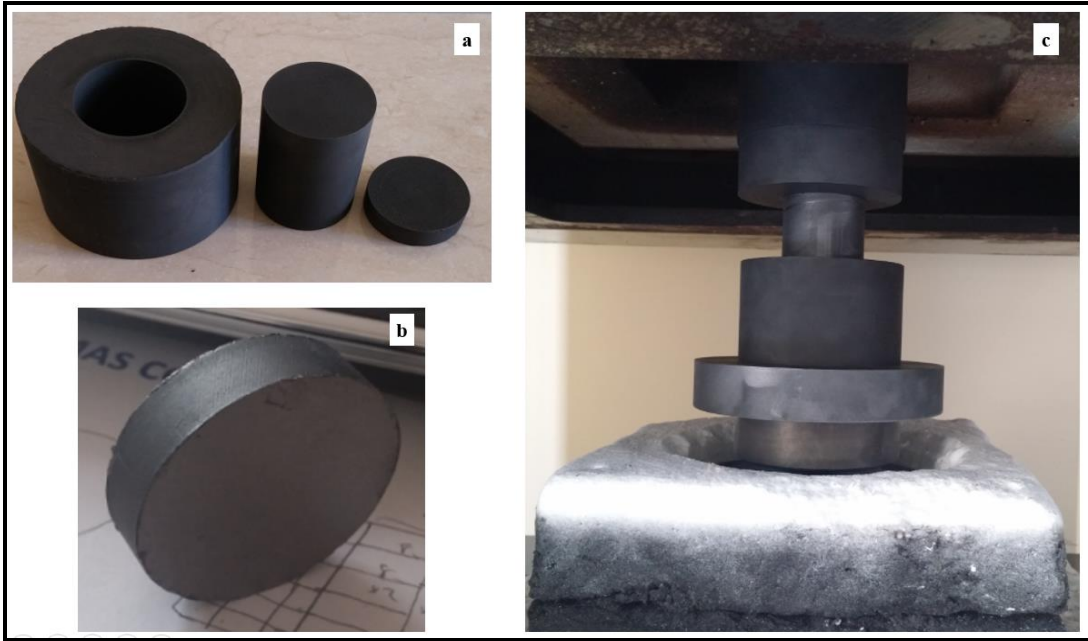
Şekil 2. 6. Tozların muhafaza edildiği eldivenli kabin.

3. Tozlar eldivenli kabinden alınarak hassas ölçüm yapan teraziye konulmuştur (Şekil 2.7). Gerekli miktarda ölçülen tozlar seramik bir kaba alınmıştır. Seramik kaptaki tozları homojen bir karışım elde etmek için 5 dakika boyunca karıştırılmıştır.



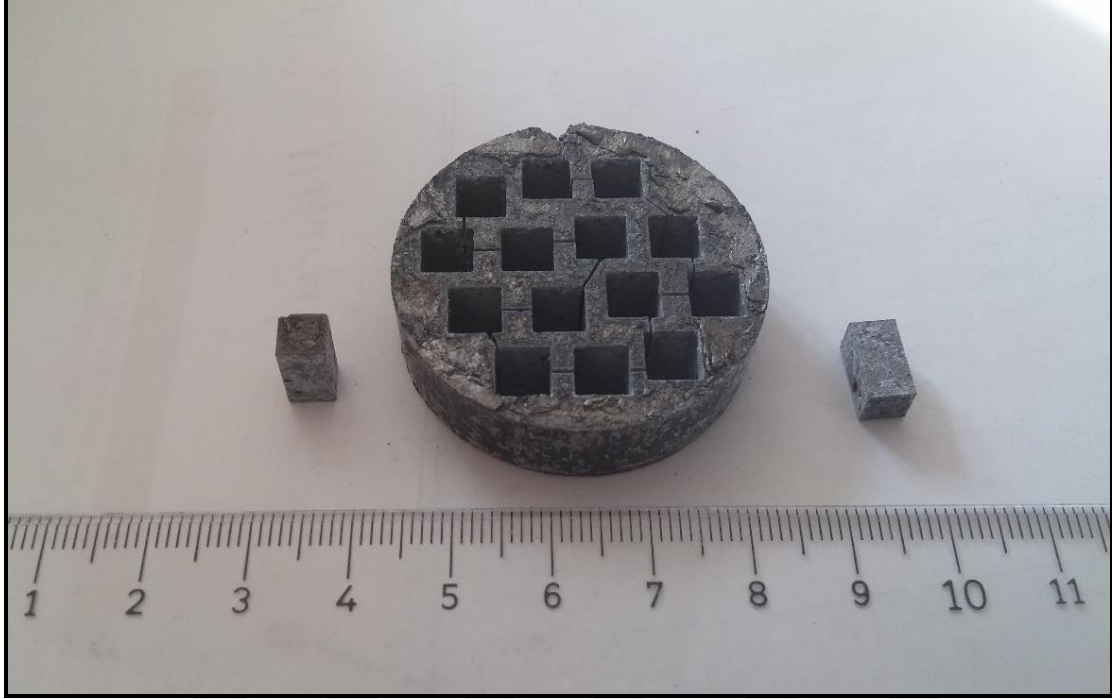
Şekil 2. 7. Tozların ölçümünde kullanılan terazi.

4. Sıcak presleme yapılmadan kalıp ve pançlar temizlenmiş ve alt panç kalıbın alt tarafına yerleştirilmiştir. Seramik kap içerisinde karıştırılan tozlar kalıp içerisine dökülmüş ve tozların iyice oturması için titreşim verilmiştir. Son olarak üst panç takılmış ve sonraki işleme geçilmiştir.
5. Sıcak pres cihazının kapakları kapatılmış ve dış ortam ile bağlantısı kesilmiştir. Sıcak pres cihazı içerisindeki hava vakumlanmış ve ortam 3 kez argon gazı ile süpürülmüştür.
6. Süpürülme işlemi sonlandırıldıktan sonra 50 MPa basınç uygulanarak tozlar preslenmiştir. Cihazın kontrol ünitesinden 10 °C/dak ısıtma hızıyla cihaz istenilen sıcaklığa ısıtılmış ve 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Presleme, ısıtma, sinterleme ve soğuma süreleri boyunca kabin içerisine yüksek saflıktaki (%99,99) argon gazı verilmiştir.
7. Presleme ve sinterleme eş zamanlı yapılırken tozlar tam yoğunluğa ulaşmış, uygulanan yükte düşüş gözlenmiş ve yük tekrar eski durumuna getirilmiştir.
8. Sinterleme sonrası soğuma işlemi tamamlandıktan sonra argon gazı akışı sonlandırılmış ve kalıp cihazdan çıkarılmıştır. Kalıp dışarda da belli bir süre soğuduktan sonra numune kalıptan çıkarılmıştır. Şekil 2.8'de kullanılan kalıp takımı ve üretilen numune gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. a) Kullanılan kalıp takımı b) üretilen numune c) sıcak pres cihazına yerleştirilen kalıp takımı.

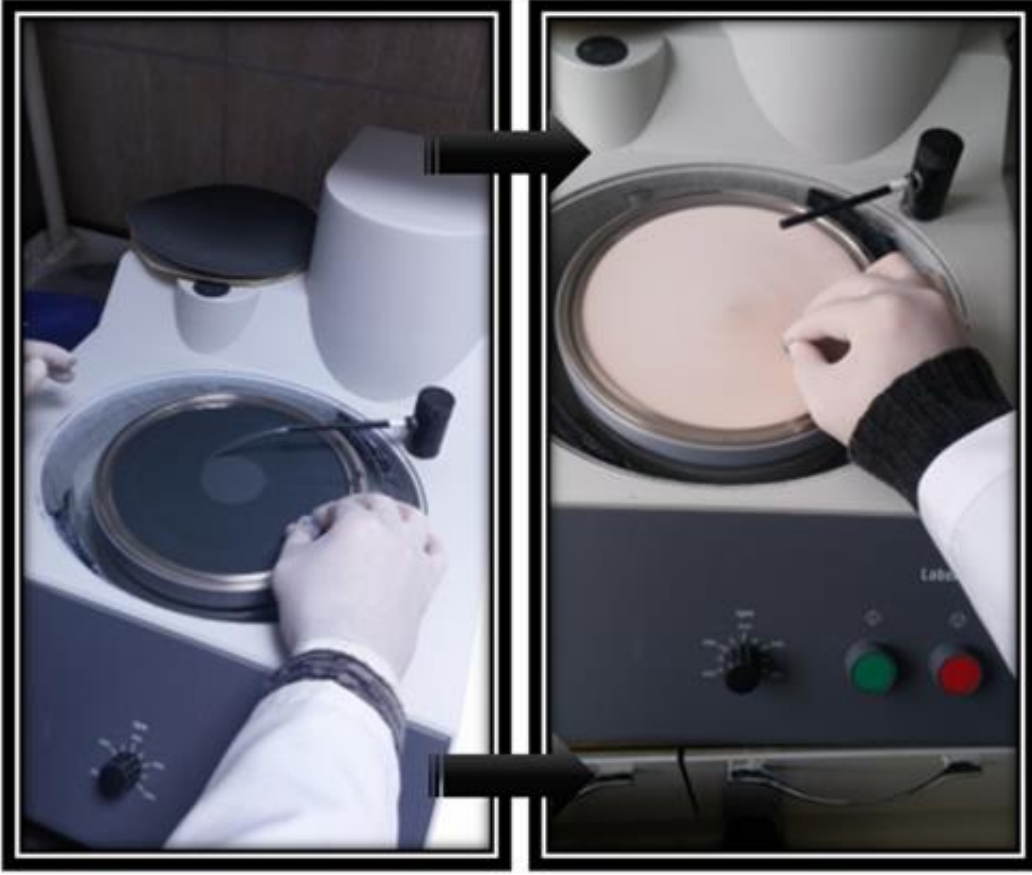
Sıcak presleme işlemi tamamlanan numuneler tel erezyon yöntemi ile 5x5x10 boyutlarında kesilmiştir (Şekil 2.9).



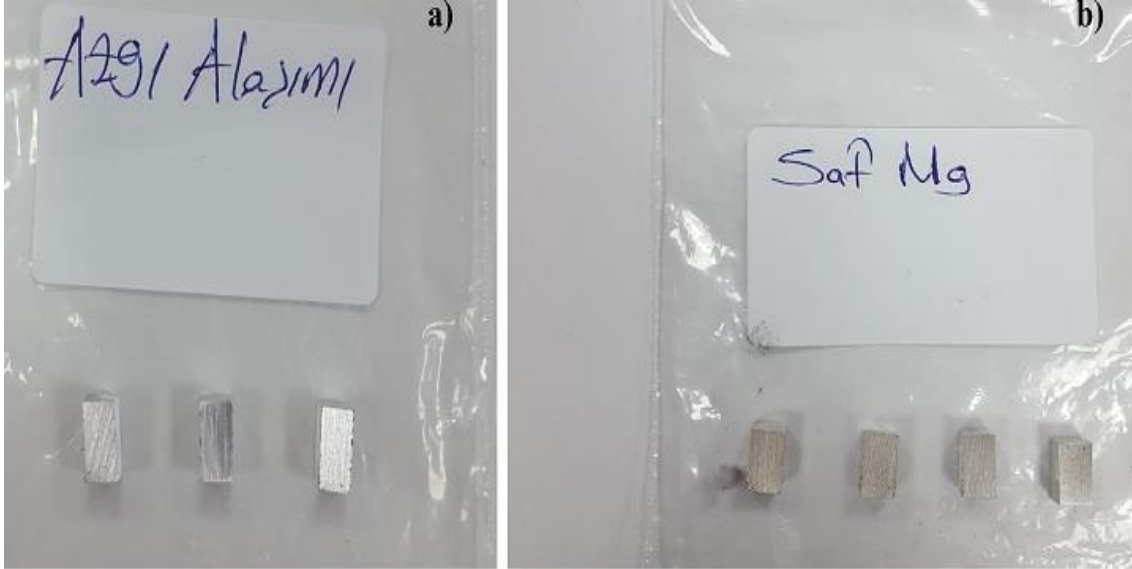
Şekil 2. 9. Tel erezyon ile kesilmiş numuneler.

Kesilen numuneler karakterizasyon işlemi için bir takım yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur (Şekil 2.10 ve 2.11). Bu işlemler aşağıda belirtilmiştir.

- ❖ Kesilen numuneler sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kağıtlarıyla zımparalanmış ve daha sonra etil alkol ile 5 er dakikalık ultrasonik temizleme işlemine tabi tutulmuştur.
- ❖ Yüzey pürüzlülükleri giderilen numuneler sırasıyla 3 ve 1 mikronluk elmaslar kullanılarak parlatma çuhasında parlatılmıştır.
- ❖ Parlatılan numuneler etil alkol ile tekrar 5 er dakikalık ultrasonik temizleye tabi tutulmuş ve kurutulmuştur (Şekil 2.12). Numunelerin zımparalanma ve parlatılma işleminden sonra AOB-XJL17 model dijital optik mikroskop ile yüzeyler kontrol edilmiştir.
- ❖ Numune tanelerinin belirgin bir hal alabilmesi için % 5 nital dağılayıcı (95ml etanol + 5 ml nitrik asit) hazırlanmış ve numuneler bu aside batırılmıştır.



Şekil 2. 10. Numunelerin zımparalanması.



Şekil 2. 11. a) AZ91D alaşımı ve b) Saf Mg numune örnekleri.



Şekil 2. 12. Zımparalanan numunelerin ultrasonik temizlenmeye tabi tutulması.

## 2.3. Karakterizasyon İşlemleri

### 2.3.1. Yoğunluk ölçüm işlemleri

Tel erezyon ile istenilen ölçülerde kesilen numuneler zımparalanma ve parlatma işleminden sonra yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluk ölçümlerinde Arşimet metodu kullanılmış bunun için Precisa LS 220A model, 220 g kapasiteli ve 0.0001 hassasiyetli analitik terazi ve yoğunluk kitinden yararlanılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2. 13. AZ91D alaşımının yoğunluk ölçümü.

Yoğunluk ve gözeneklilik sırasıyla aşağıda verilen Eşitlik 2.1 ve 2.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_g = \frac{W_a \cdot \rho_{su}}{W_a - W_b} \quad (2.1)$$

$$P = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_t} \quad (2.2)$$

$\rho_g$  : görünür yoğunluk, sadece kapalı gözenekler olduğunda yığınsal yoğunluğa eşittir.

$W_a$  : kuru numunenin havadaki ağırlığı

$W_b$  : numunenin su içindeki asılı ağırlığı

$\rho_{su}$  : saf suyun yoğunluğu

$P$  : gözeneklilik

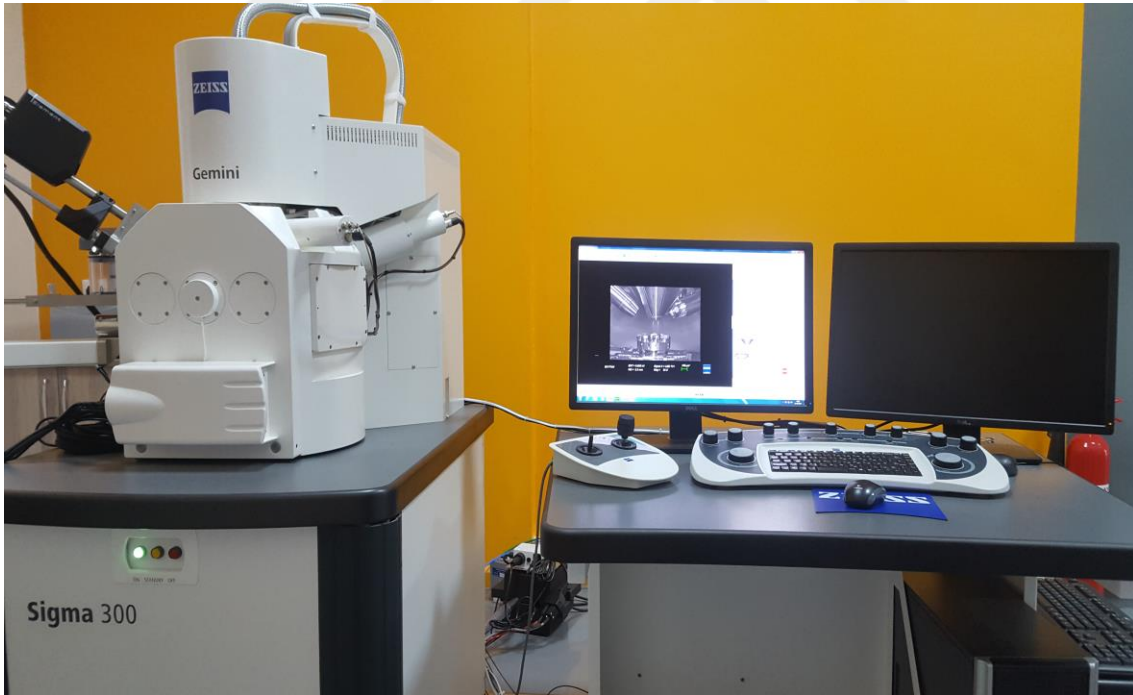
$\rho_t$  : teorik yoğunluk

### 2.3.2. X-Işını kırınımı

Başlangıç tozlarında ve üretilen numunelerde fazların belirlenmesi için XRD deneyleri yapılmıştır. Erzurum Doğu Anadolu İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Panalytical marka Empyrean model cihazda  $20-90^\circ 2\theta$  açılarında,  $2^\circ/\text{dak}$  tarama hızı kullanılarak numunelerdeki fazlar belirlenmiştir.

### 2.3.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM analizleri için Zeiss marka sigma 300 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 2.14). Bu analiz ile üretilen numuneler üzerine yüksek enerjili elektron demeti gönderilerek numune üzeri taranır ve böylece içyapı görüntüleri elde edilir. Numune mikro yapılarında bulunan fazların kimyasal bileşeni SEM cihazında bulunan EDS detektörü ile belirlenmiştir.



Şekil 2. 14. Numunelerin analizinde kullanılan SEM cihazı.



## 2.4. Mekanik Testler

### 2.4.1. Mikro sertlik

Üretimi gerçekleştirilen saf Mg ve AZ91D alaşım numunelerin sertlik ölçümleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi laboratuvarında bulunan Shimadzu HMV-G marka Mikro Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 2.15). Sertlik değerleri, saf Mg ve AZ91D alaşım numuneleri yüzeyinde piramit şeklindeki bir ucun 15 sn süreyle, 10 Gram Kuvvet (grf) bir yük ile daldırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesiyle hesaplanmıştır. Her numune üzerinde en az 5 farklı noktadan ölçümler yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak sertlik değerleri bulunmuştur.



Şekil 2. 15. Shimadzu HMV-G marka sertlik ölçüm cihazı.

### 2.4.2. Basma testi

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen saf Mg ve AZ91D alaşım numunelerinin basma deneyleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi mekanik laboratuvarında bulunan Raagen marka universal çekme – basma test cihazında yapılmıştır. Basma deneyleri dört farklı sıcaklıkta (oda sıcaklığında, 100 °C, 150 °C ve 200 °C) ve 0.5 mm/dak hızda yapılmıştır.



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu

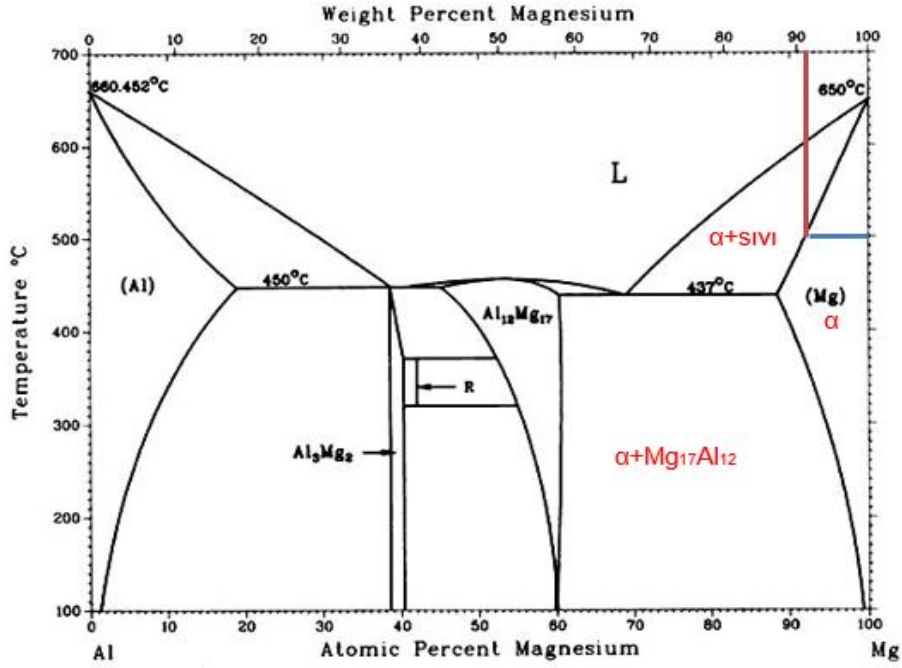
Sıcak presleme işleminde basınç, sıcaklık ve süre olmak üzere üç parametre mevcuttur. Tam yoğunluğa en kısa sürede ulaşmak için basınç 50 MPa uygulanmış ve numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme süresi ise ön deneyler ile belirlenmiş ve 1 saat yeterli görülmüştür. AZ91D numune üretiminde presleme sıcaklığı 500 °C olarak uygulanmış fakat basıncın aniden düştüğü görülmüştür. Basınç tekrar 50 MPa'a çıkarılmak istenmiş fakat bu mümkün olmamıştır. Grafit takım kalıbı soğuma sonrasında çıkarılmış ve kalıp boşluğunda sıvı faz oluştuğu ve bu fazın kalıp – zımba arasından fışkırarak zımba üzerinde katılaştığı görülmüştür. Presleme sıcaklığı 450 °C sıcaklığına düşürülmüş fakat aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.1)



Şekil 3. 1. AZ91D alaşımının 450 °C'de 1 saat süreyle sinterleme sonrasında elde edilen görüntü.

Atomizasyon yöntemiyle üretilmiş AZ91D alaşım tozlarının, atomizasyon sonrasında çok hızlı soğutulacakları varsayılarak tozların içyapısında  $Mg_{17}Al_{12}$  metaller arası bileşiğinin oluşmayacağı düşünülür. Fakat yapılan XRD taraması sonucunda (Şekil 2.2)  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.2’de verilen Al-Mg ikili denge diyagramı dikkatle incelenirse sıvı faz oluşumunun nedeni anlaşılabilir. Ağırlıkça %9 Al içeren alaşımda ilk sıvının oluştuğu sıcaklık şekil üzerinde gösterildiği gibi hemen 500 °C’nin üzerindedir.  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının tozun içyapısında bulunmaması durumunda 500 °C’de tamamen katı halde presleme işlemi yapılabilirdi. Ancak başlangıç tozu  $Mg_{17}Al_{12}$  çökeltilerini içerdiğinden hem 500 hem de 450 °C’de yapılan ön deneylerde sıvı faz oluşumu kaçınılmaz olmuştur.  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşiğinin oluşabilmesi için 17 Mg atomuna karşılık 12 Al atomu gerekmektedir. Yani daha fazla Mg’ya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da alaşımın  $\alpha$  fazının, denge bileşimi olan ağırlıkça %9 Al’dan daha fazla Al içermesine neden olmaktadır. Alüminyum Mg içerisindeki maksimum çözünürlüğüne (ağırlıkça %12.9) ötektik sıcaklık olan 437 °C’de ulaşmaktadır. Isıtma sırasında bu sıcaklığa çıkıldığında  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşikleri ile komşu olan  $\alpha$  fazının Al içeriği %12.9’dan fazla olduğundan bileşim tek fazlı  $\alpha$  Mg yerine  $\alpha + Mg_{17}Al_{12}$  bölgesine kaymaktadır. Bu da ötektik faz dönüşümüne yakalanmak anlamına gelir. Sonuç olarak gerek 500 gerekse 450 °C’de kompozisyon kayması nedeni ile  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşikleri ile komşu olan  $\alpha$  fazının bulunduğu yerel bölgeler katı  $\alpha$  fazı yerine  $\alpha +$  sıvı faz bölgesinde yer almaktadırlar.

İyi bir sinterlemenin yapılabilmesi için sıcaklık en önemli faktörlerden birisidir ve sinterlenme davranışı sıcaklığa üstel olarak bağlıdır. Yani sıcaklıktaki az miktarda artışlar bile önemli derecede sinterlenmeyi iyileştirmektedir. Bu yüzden sıcak presleme sıcaklığı ötektik sıcaklığa (437 °C) yakın bir sıcaklık olan 420 °C olarak optimize edilmiştir. Referans olarak üretilen saf Mg numuneleri de aynı basınç ve sürede, 420 °C ve 600 °C sıcaklıklarında sıcak preslenmişlerdir.



Şekil 3. 2. Al-Mg ikili faz diyagramı.

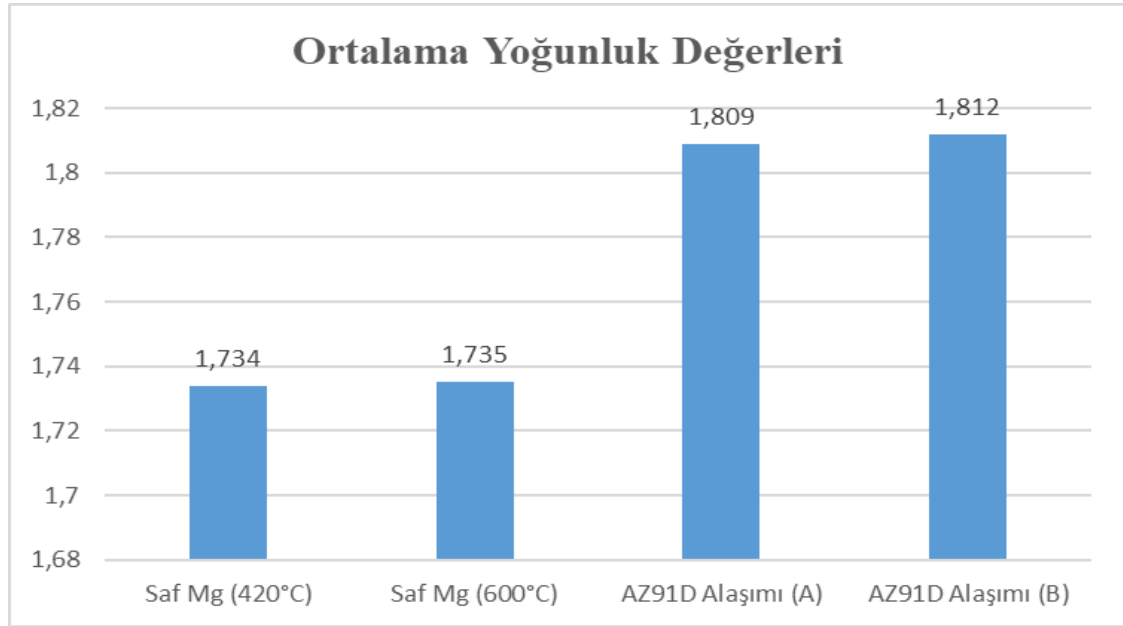
### 3.2. Yoğunluk Ölçümleri

Farklı koşullarda üretilen saf Mg ve AZ91D alaşım numunelerinin yoğunluk değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ortalama yoğunluk değerleri ise Şekil 3.3’de gösterilmiştir. 420 °C’de üretilen saf Mg ‘nin ortalama yoğunluğu 1.734 g/cm<sup>3</sup>, 600 °C’de üretilenin ise 1.735 g/cm<sup>3</sup> iken AZ91D alaşımının ortalama yoğunluğu ise soğutma sırasında yük uygulanması durumunda (A) 1.809, uygulanmaması durumunda (B) ise 1.812 g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Böylelikle 420 °C’de üretilen saf Mg dışında bütün numunelerin tam yoğunluğa ulaştıkları tespit edilmiştir. Saf Mg’un 420 °C gibi düşük bir sıcaklıkta preslenmesi sonucunda % 2.3 oranında gözenek içerdiği belirlenmiş olup bu sıcaklığın sinterlenme için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. Sıcaklığın 600 °C’ye yükseltilmesiyle tam yoğunluğa sahip numuneler üretilebilmiştir. Öte yandan AZ91D alaşımının 437 °C’de ötektik faz dönüşümü göstermesinden dolayı ve erime sıcaklığının saf Mg’a göre düşük olması nedeniyle 420 °C’de yapılan sıcak presleme işlemi ile gerek soğutma sırasında basıncın uygulanması gerekse uygulanmaması durumunda tam yoğunluğa ulaştığı gözlenmiş ve bu sıcaklığın sinterleme işlemi için yeterli olduğu ortaya konulmuştur. AZ91D alaşım tozlarının küresel şekilli olması da

kolay preslenmelerinin diğ er bir sebebini oluşturmaktadır. Mg tozları talaşlı imalat ile üretildiğ inden şekilleri düzensizdir ve mekanik işlem esnasında pekleşmeye de maruz kalmışlardır. Bu yüzden şekillendirilmeleri de daha zor olmuştur.

Çizelge 3. 1. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait yoğunluklar

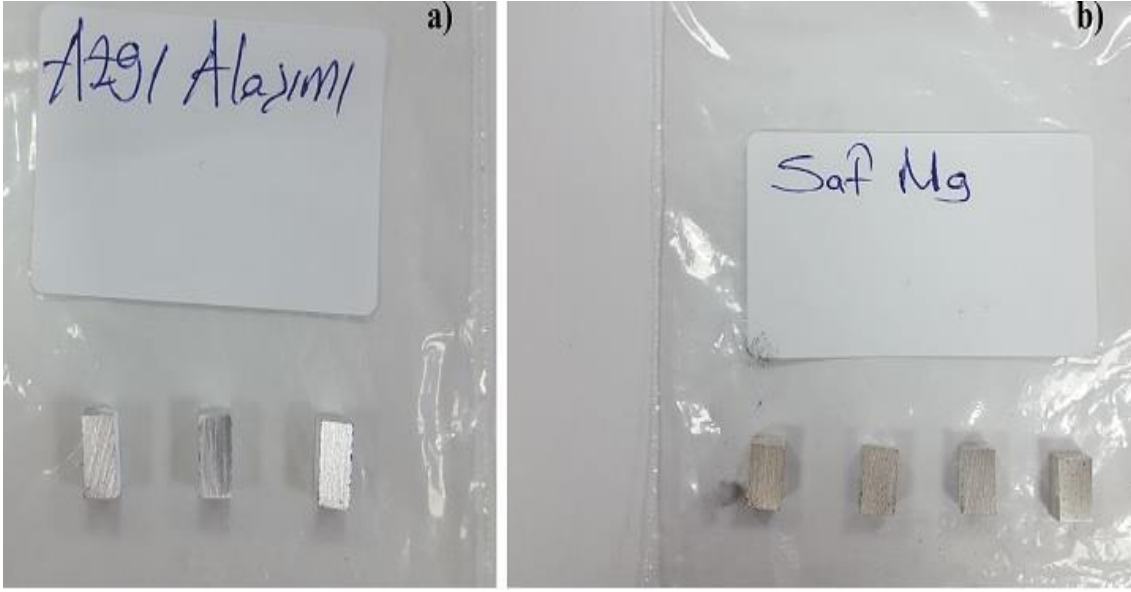
Yoğunluğu Ölçülen Numuneler	Teorik Yoğunluk	Ölçülen Yoğunluk	Ortalama Yoğunluk	Gözeneklik (%)
Saf Mg (420 °C)	1,738 g/cm <sup>3</sup>	1,726 g/cm <sup>3</sup>	1,734 g/cm <sup>3</sup>	2,3
		1,740 g/cm <sup>3</sup>		
Saf Mg (600 °C)	1,738 g/cm <sup>3</sup>	1,744 g/cm <sup>3</sup>	1,735 g/cm <sup>3</sup>	0,17
		1,725 g/cm <sup>3</sup>		
		1,737 g/cm <sup>3</sup>		
AZ91D Alaşımı (A)	1,810 g/cm <sup>3</sup>	1,808 g/cm <sup>3</sup>	1,809 g/cm <sup>3</sup>	0,03
		1,810 g/cm <sup>3</sup>		
AZ91D Alaşımı (B)	1,810 g/cm <sup>3</sup>	1,810 g/cm <sup>3</sup>	1,812 g/cm <sup>3</sup>	0
		1,813 g/cm <sup>3</sup>		
		1,813 g/cm <sup>3</sup>		



Şekil 3. 3. Farklı koşullarda üretilen saf Mg ve AZ91D alaşımlarının ortalama yoğunlukları.

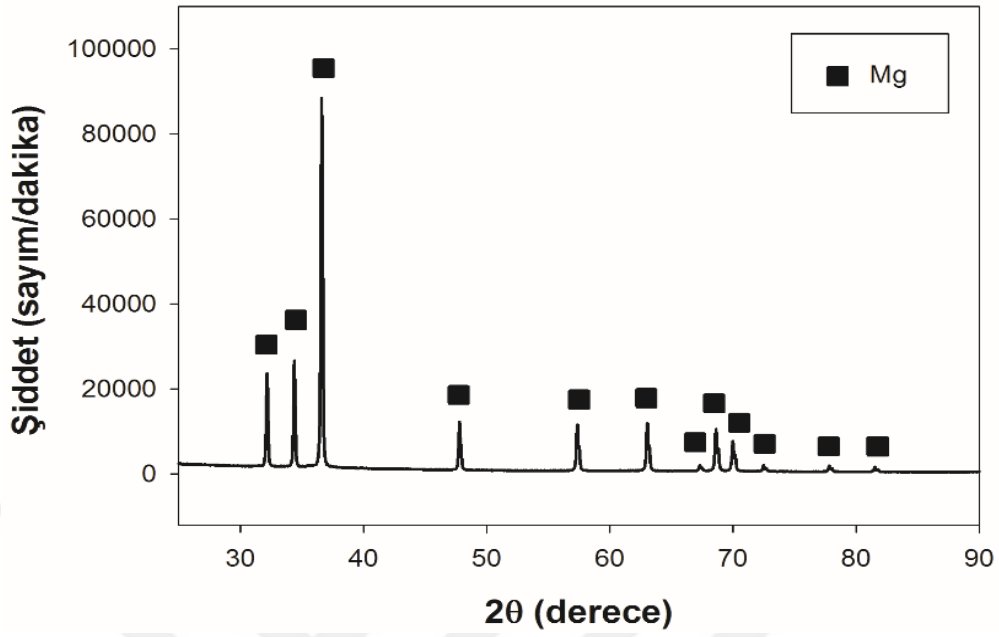
### 3.3. Makro ve Mikroyapı

Şekil 3.4 'te üretimi tamamlanan ve sırasıyla tel erezyon ile kesilme, zımparalama, parlatma ve son olarak dağlama işleminin yapıldığı numuneler görülmektedir. Gözle yapılan muayene sonucu numuneler üzerinde herhangi bir boşluklu yapıya ve üretim hatasına rastlanılmamıştır.

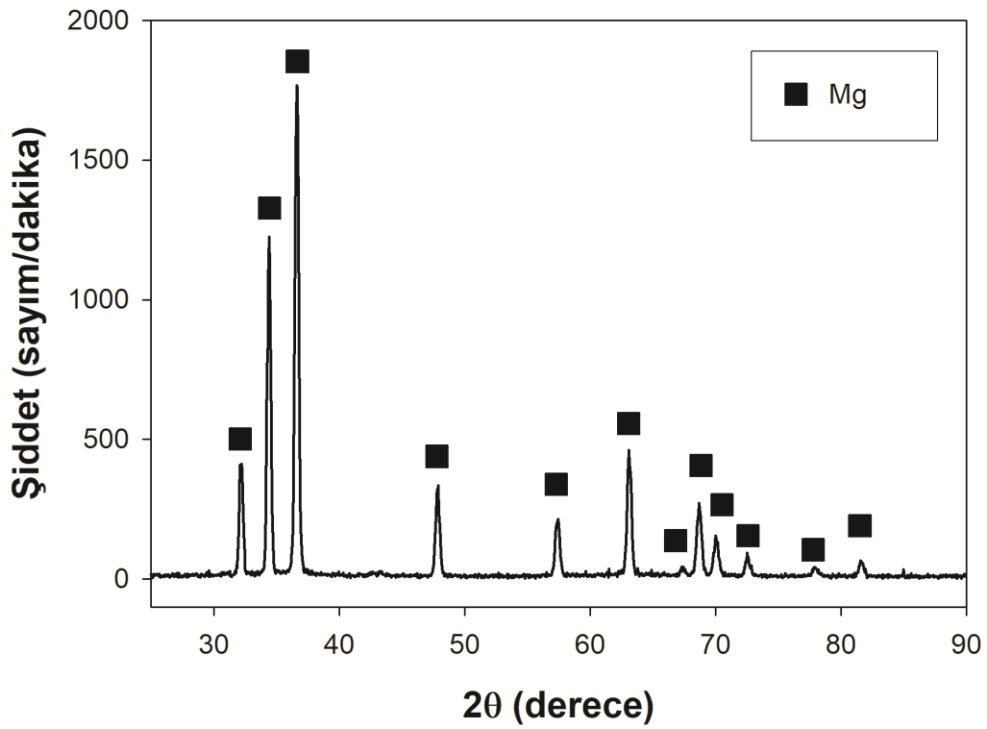


Şekil 3. 4. a) AZ91D alaşımı ve b) Mg makro yapıları.

Mg ve AZ91D alaşım numunelerinin içyapılarında bulunan fazlar Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 verilen XRD desenleri yardımıyla belirlenmiştir. Saf Mg (420 °C ve 600 °C'de üretilmiş) ve AZ91D (420 °C yüklü (A) ve yüksüz (B) olarak üretilmiş) alaşımına ait XRD desenleri başlangıç tozlarınınki ile birebir örtüşmektedir. Saf Mg sadece Mg'den oluşurken, AZ91D alaşımı ise  $\alpha$  fazı ve  $Mg_{17}Al_{12}$  metaller arası bileşiğinden oluşmaktadır. Üretilen bütün numunelerde oksit, karbür ve istenmeyen kırılğan fazlara rastlanılmamıştır. Grafit kalıplardan karbon difüzyonu sadece numune üzerinde görülmüş numune iç kısımlarında herhangi bir karbon ve karbür oluşumuna rastlanılmamıştır. Yüzeyde oluşan karbon tabakası zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra arındırılmış ve temiz yüzeyler elde edilmiştir. Böylelikle, sıcak presleme yönteminin uygun şartlar sağlandığında Mg ve alaşımlarının imalatında rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

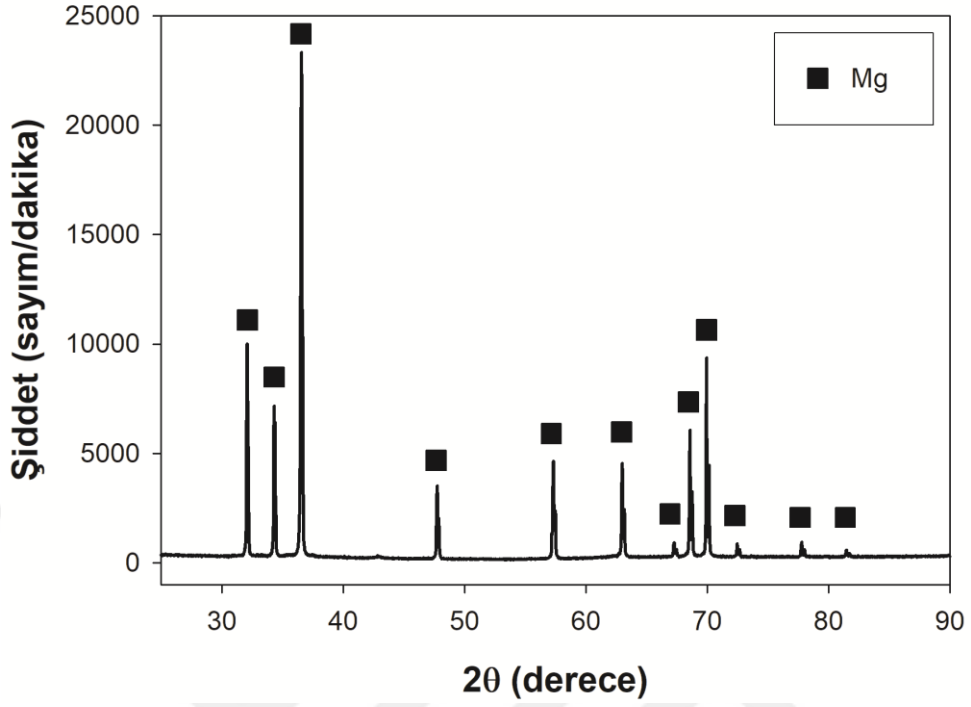


(a)



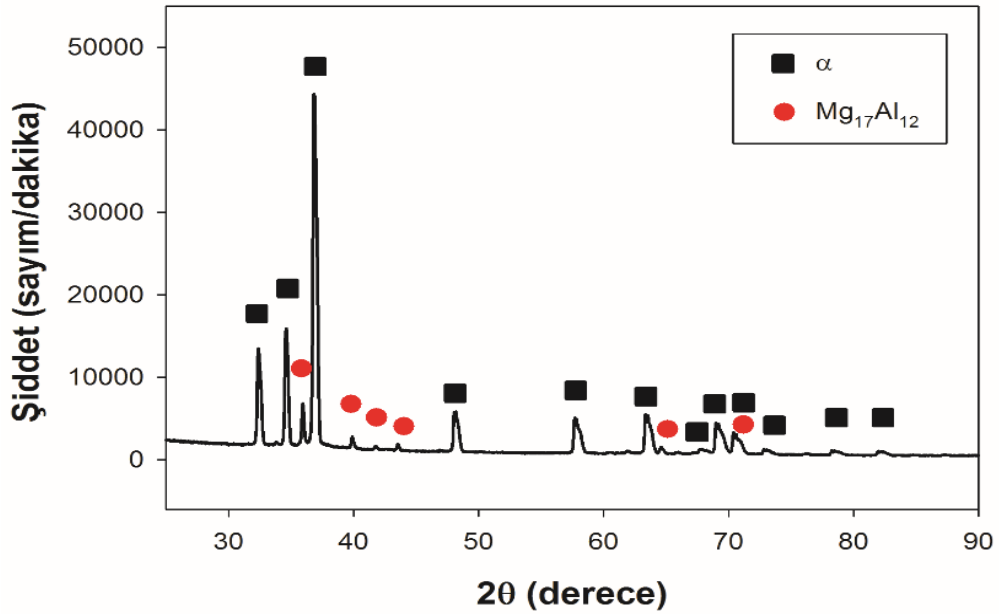
(b)



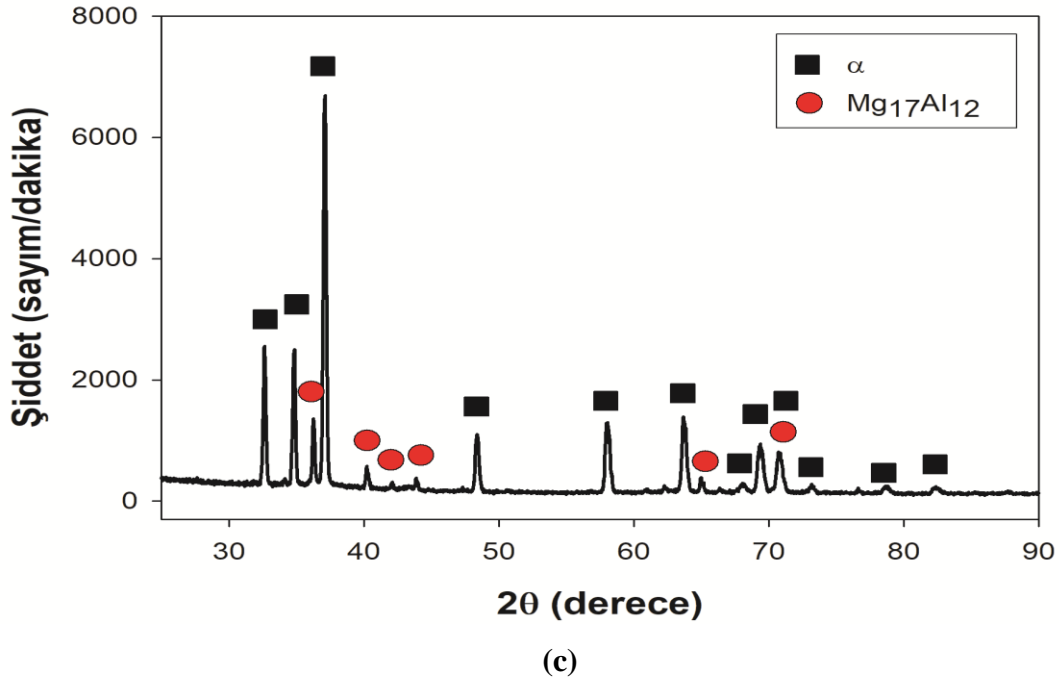
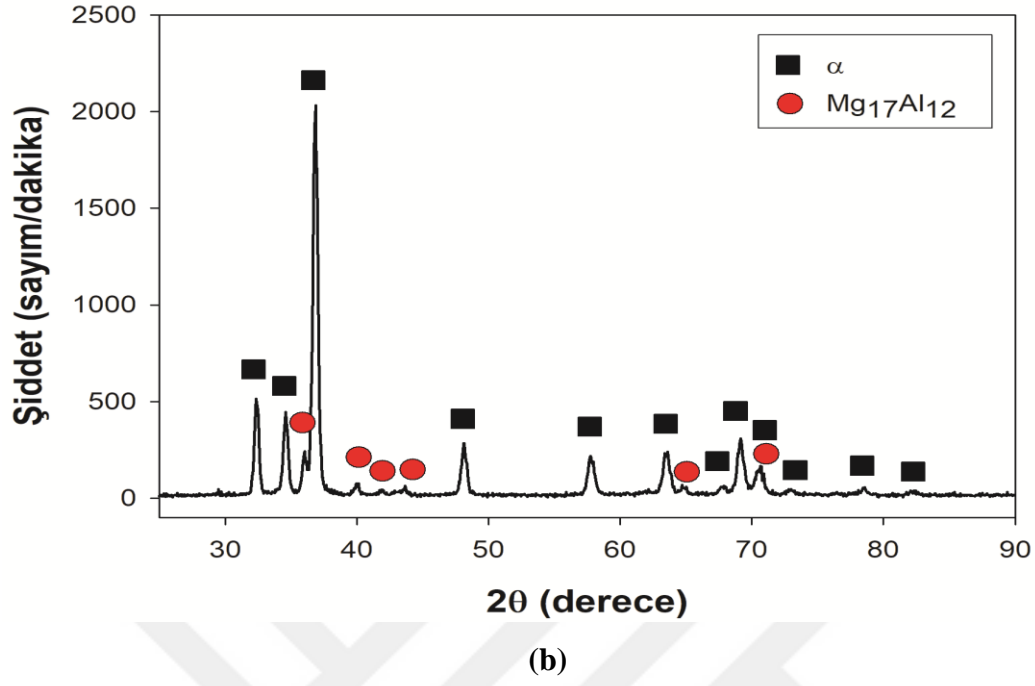


(c)

Şekil 3. 5. a) Mg tozu, b) 420 ve c) 600 °C’de sinterlenmiş Mg numunelere ait XRD paternleri.



(a)

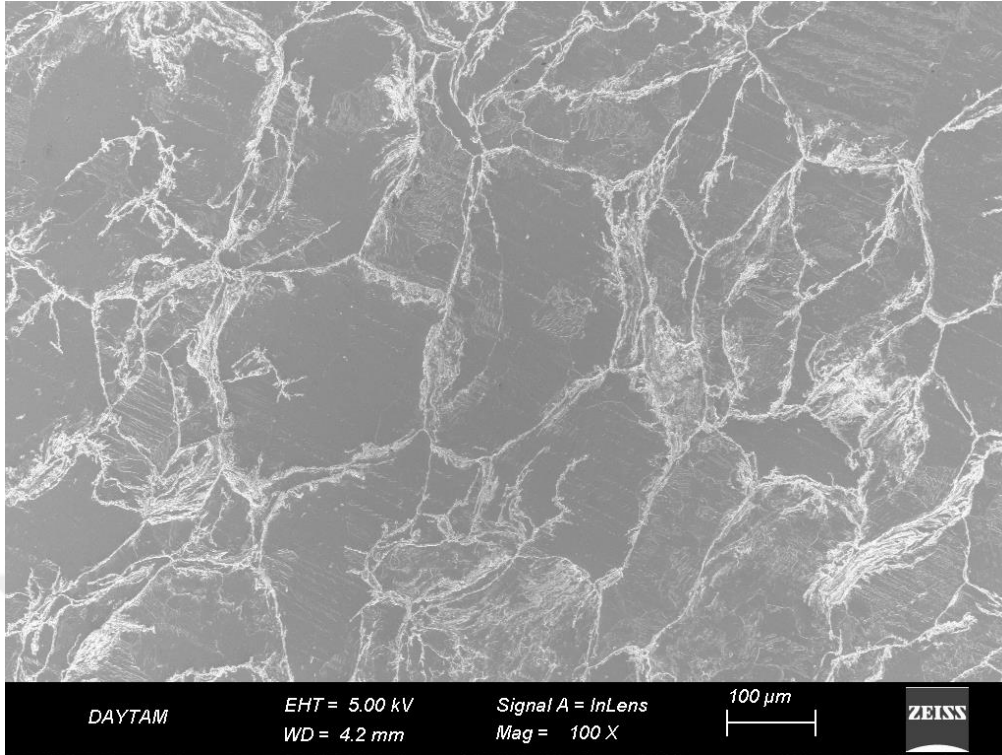


Şekil 3. 6. a) AZ91D tozu, b) AZ91D (A) ve c) AZ91D (B) numunelerine ait XRD paternleri

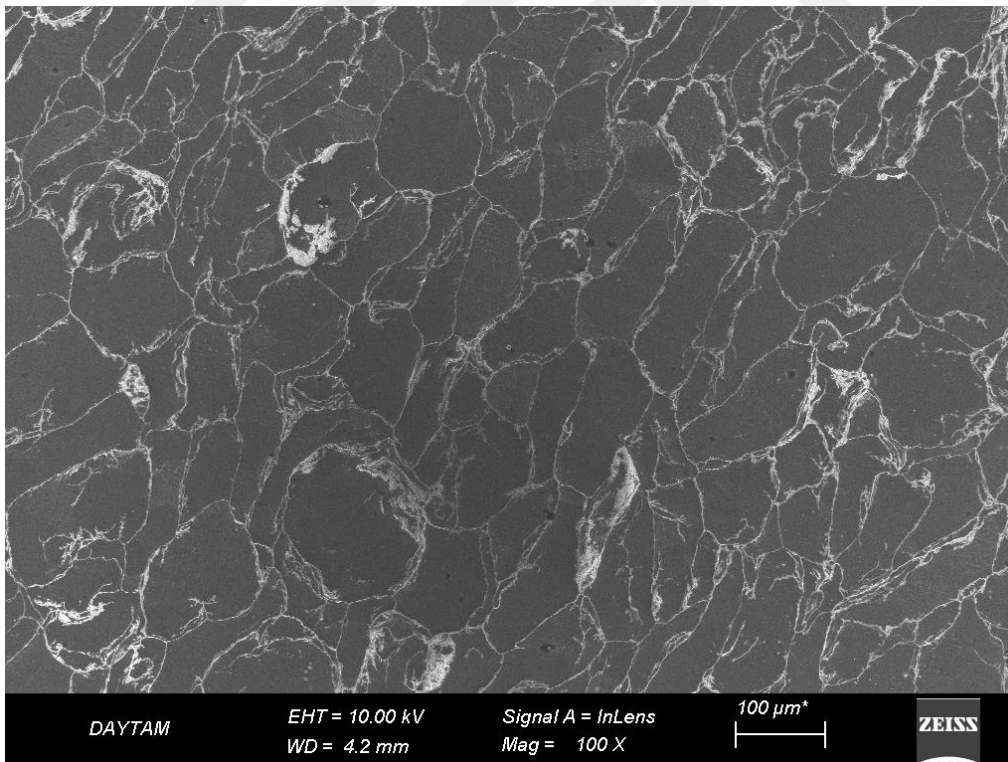
Şekil 3.7’de Mg ve AZ91D numunelerine ait SEM görüntüleri görülmektedir. Başlangıç tozları ile kıyaslandığında tane boyutlarının büyümediği görülmektedir. Ayrıca 420 °C’de üretilmiş Mg numunesi (Şekil 3.7 a) ve 600 °C’de üretilmiş Mg

numunesi (Şekil 3.7 b) aynı büyütmeye gösterilmiş görüntüleri kıyaslandığında tane büyüklüklerinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Sinterleme süresinin 1 saat gibi kısa bir süre seçilmesinden dolayı tane büyümesi için yeterli zamanın olmadığı sonucuna varılmıştır. Presleme sıcaklığının artırılması ile Mg tozlarında meydana gelen deformasyon açık bir biçimde görülmektedir. İy yapısı sadece saf Mg tanelerinden oluşmaktadır ve taneler yükün uygulandığı yöne dik yönde bir yönelmeye sahiptirler. 420 °C’de üretilmiş AZ91D alaşımları incelendiğinde (Şekil 3.7 c soğuma sırasında yük uygulanmış ve Şekil 3.7 d soğuma sırasında yük uygulanmamış) mikro yapılarının benzer olduğu görülmüştür. Mikro yapı içerisinde  $\alpha$  matris fazına ek olarak süresiz  $Mg_{17}Al_{12}$  çökelti fazlarının hem taneler arasında hem de tane iç kısımlarında olduğu görülmüştür. Soğutma sırasında yük uygulanmayan numunede daha fazla çökeltinin olduğu gözlenmiştir. (Şekil 3.7). Bu durum XRD desenlerinde soğutma sırasında yük uygulanmayan numunelerdeki  $Mg_{17}Al_{12}$  ( $\beta$ ) fazı piklerinin şiddetindeki artma ile de teyit edilebilir. Bundan basıncın çökeltilerin büyümesini yavaşlattığı sonucu çıkarılabilir.

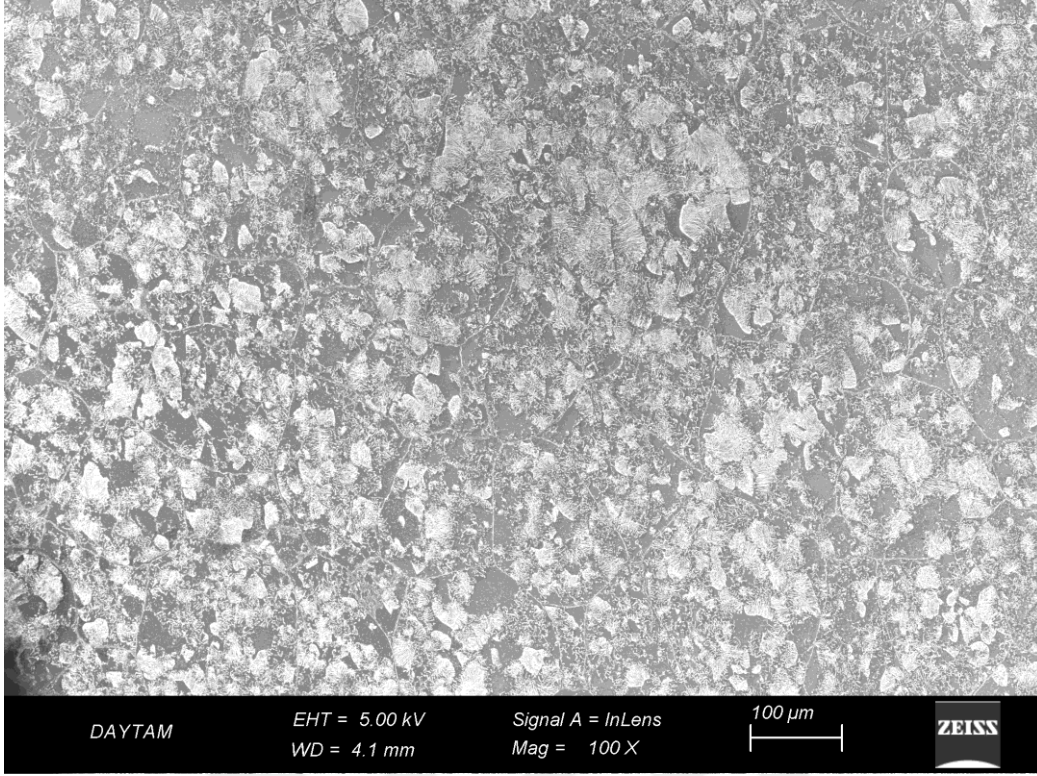
SEM görüntüleri incelendiğinde XRD ve yoğunluk sonuçlarını desteklemektedir. Mg ve AZ91D alaşım numunelerinde herhangi bir gözenek ve XRD’den belirlenen fazlardan başka fazların olmadığı görülmüştür. Şekil 3.8’de çeşitli büyütmelemlerde Mg ve AZ91D alaşımlarına ait SEM görüntüleri, Şekil 3.9’de ise AZ91D alaşımında oluşan  $\alpha$  ve  $Mg_{17}Al_{12}$  fazları gösterilmiştir.



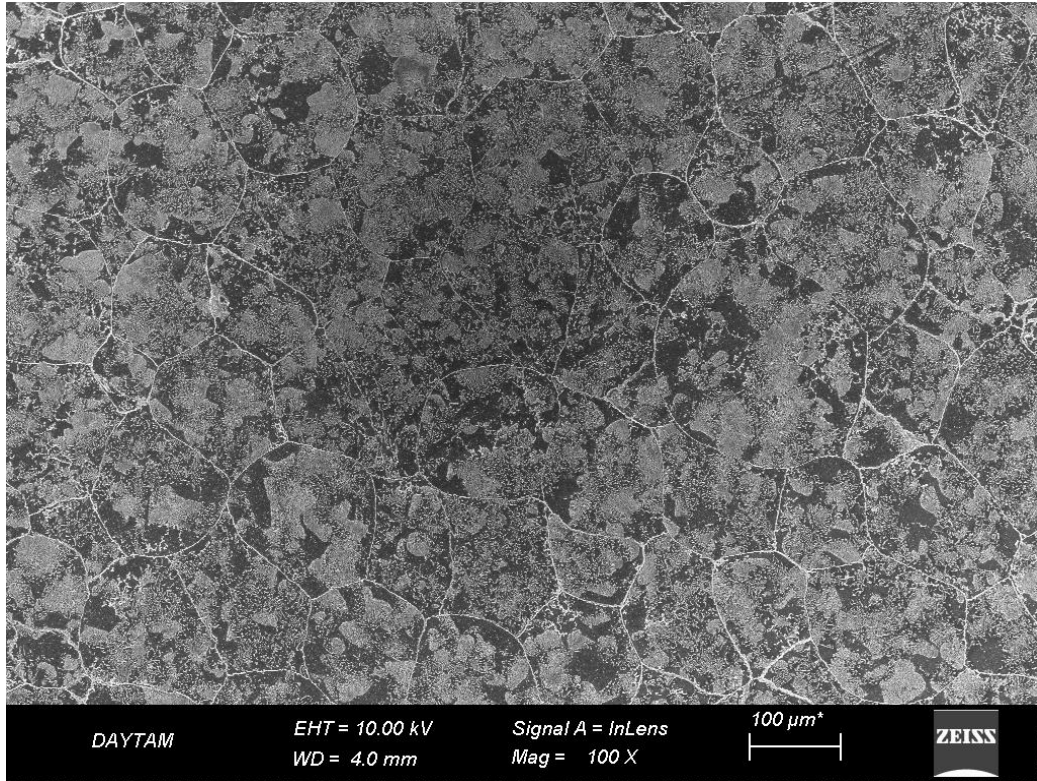
(a)



(b)

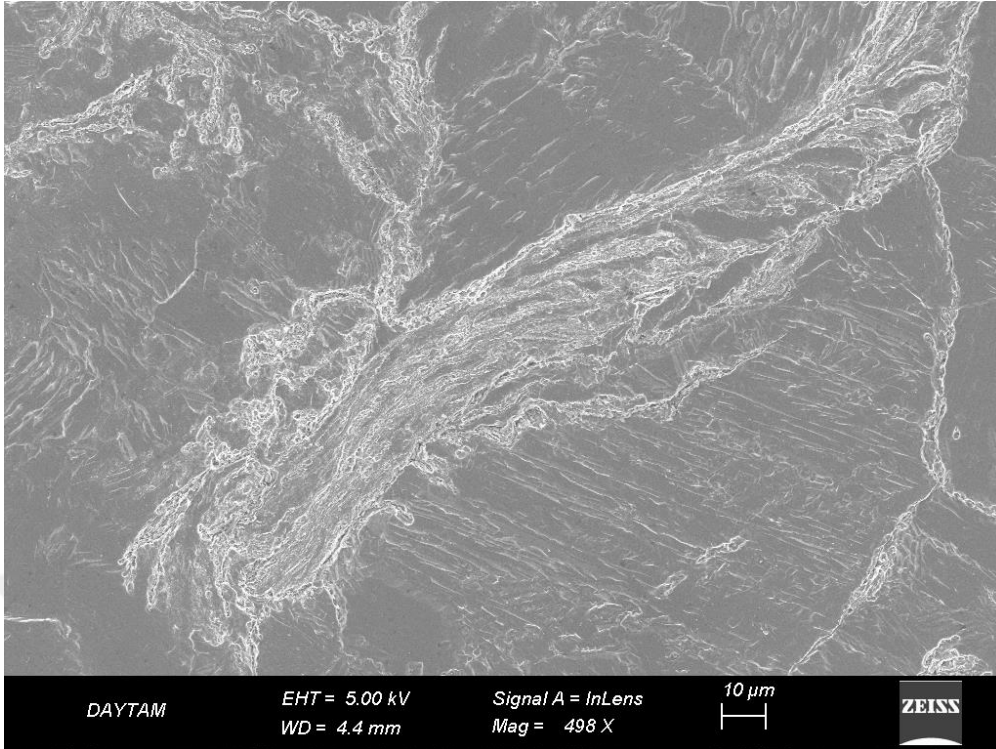


(c)

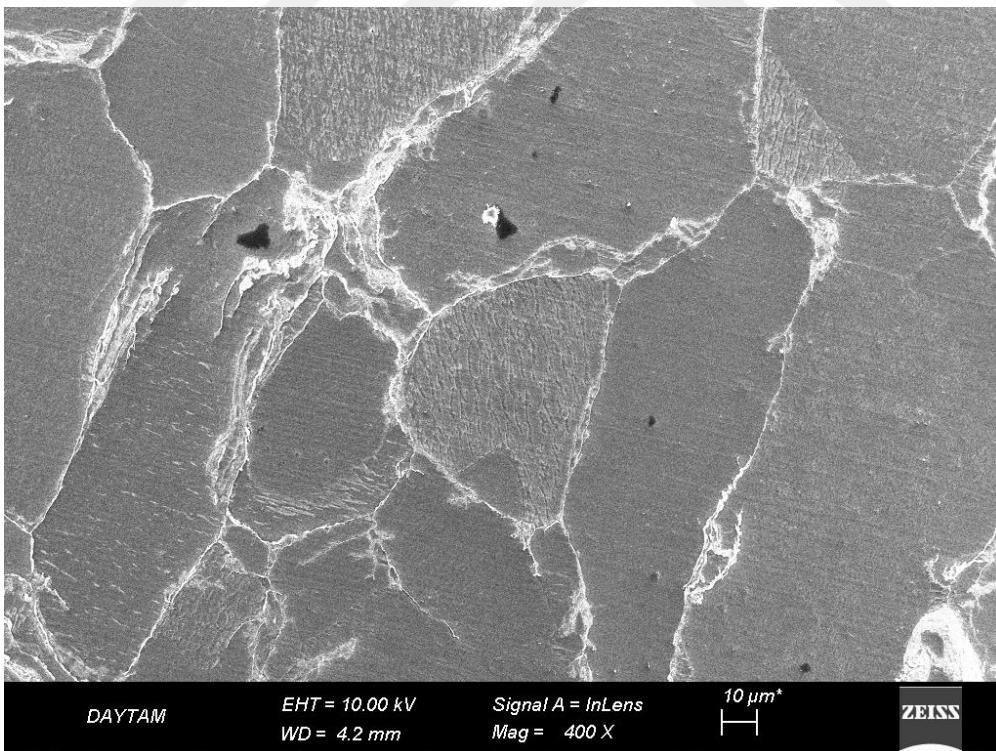


(d)

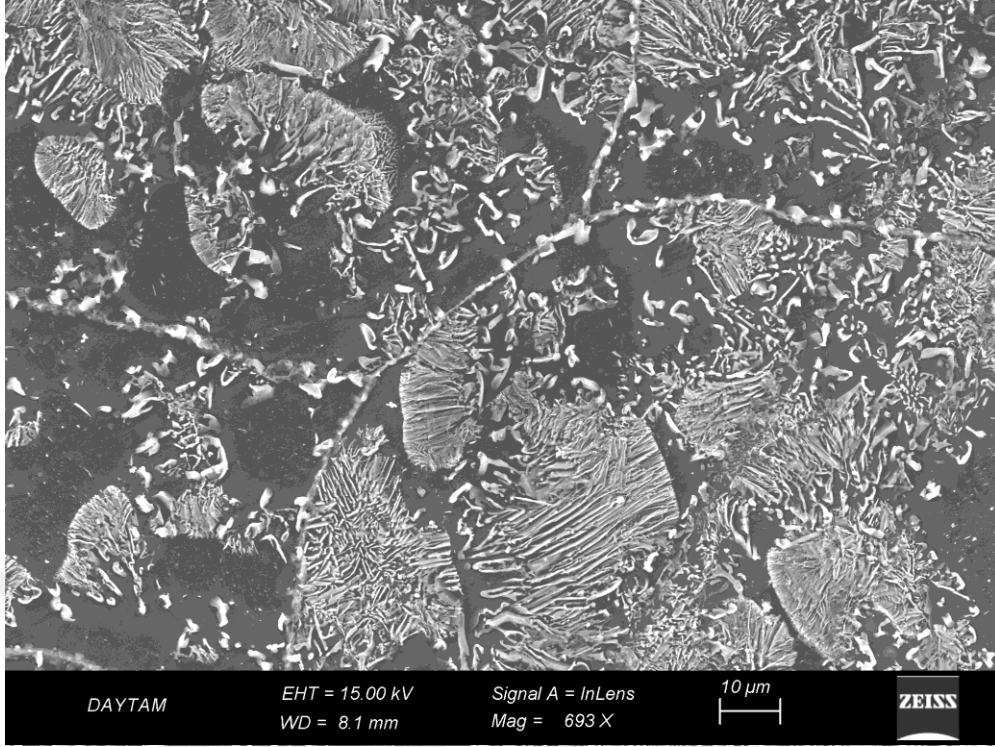
Şekil 3. 7. a) 420 °C’de üretilmiş Mg, b) 600 °C’de üretilmiş Mg, c) 420 °C’de üretilmiş AZ91D (A), d) 420 °C’de üretilmiş AZ91D (B) numuneleri.



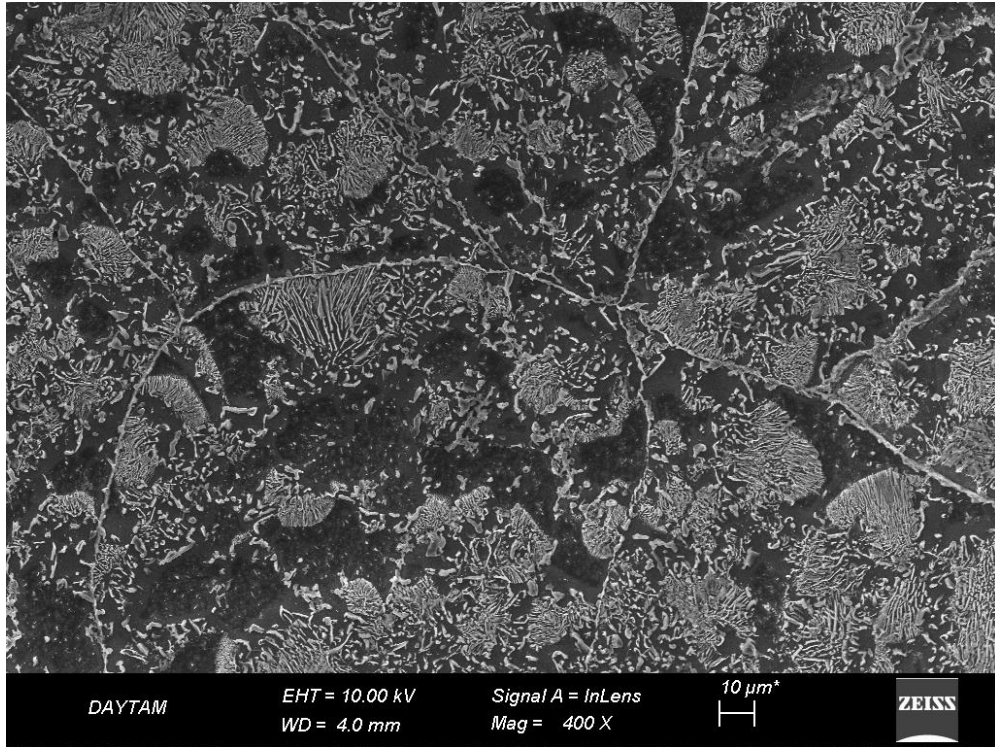
(a)



(b)

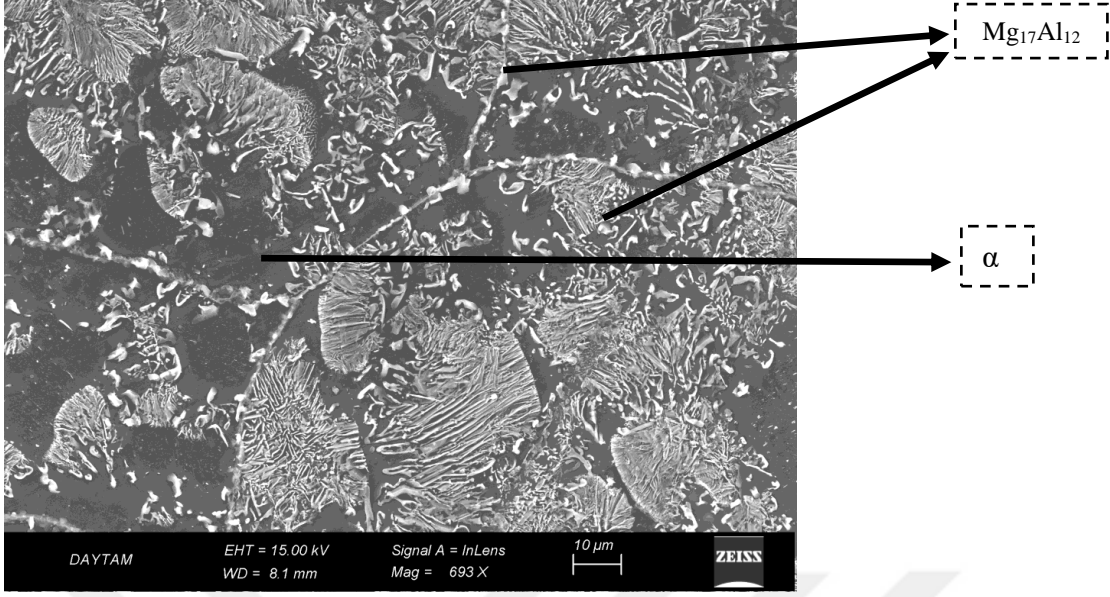


(c)



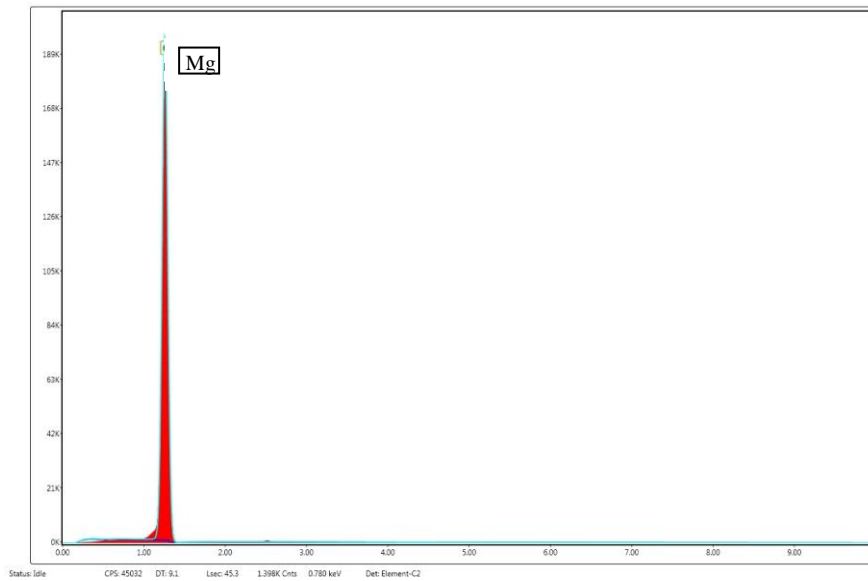
(d)

Şekil 3. 8. a) 420 °C’de üretilmiş Mg, b) 600 °C’de üretilmiş Mg, c) 420 °C’de üretilmiş AZ91D (A), d) 420 °C’de üretilmiş AZ91D (B) numunelerinin farklı büyütmelelerdeki görüntüleri.



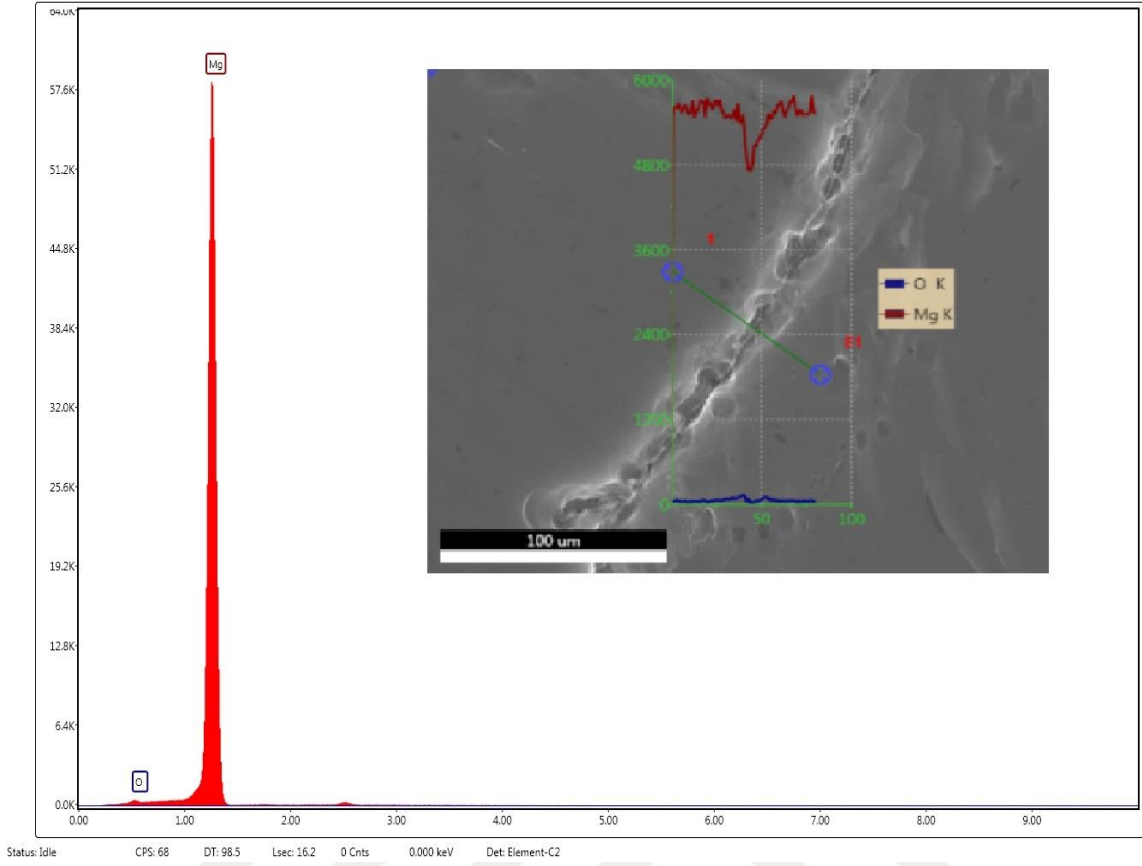
Şekil 3. 9. AZ91D alaşımında oluşan fazların SEM görüntüsü.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de Mg tane içinden alınan noktasal ve tane sınırlarını da içeren bir bölgede yapılan çizgisel EDS analizleri görülmektedir. Bu analiz ile saf Mg’un sıcak presleme ile üretilmesinde herhangi bir oksitlenmenin meydana gelmediği gösterilmiştir. Tane içerisinde yapılan analizde sadece Mg’ye rastlanırken, tane sınırında ise Mg’nin yanı sıra çok az oksijene de rastlanılmıştır. Bu oksitlerin proses sırasında değil, Mg tozunun üretimi sonrasında yüzeyinde oluşabilecek az miktarda oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



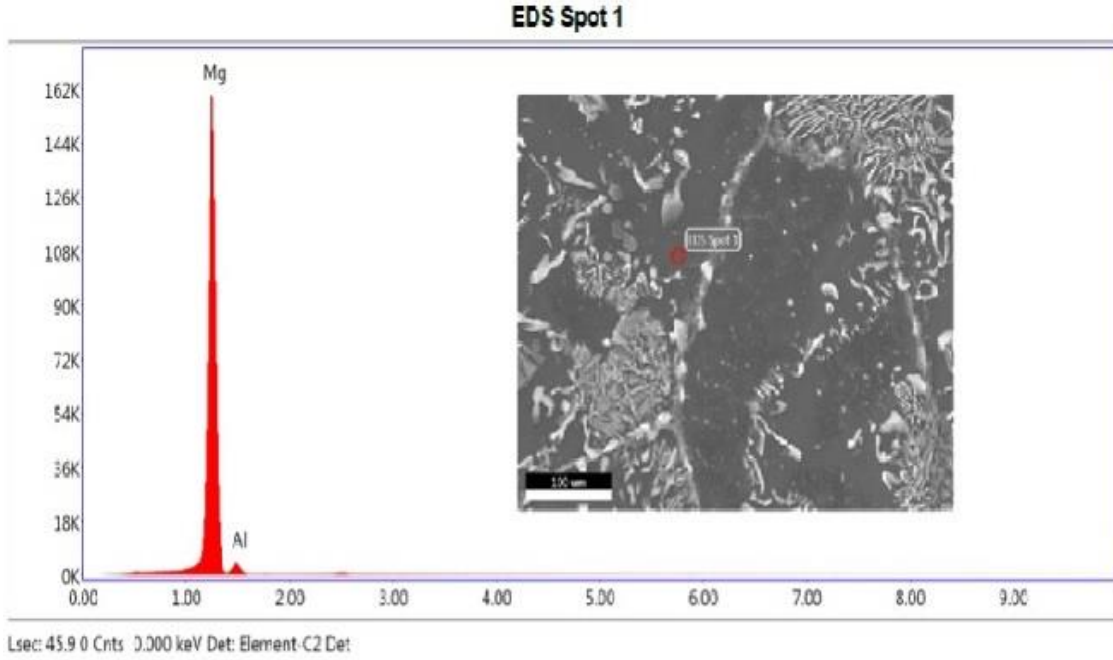
Şekil 3. 10. Mg tane içerisinde alınan EDS analiz sonucu.





Şekil 3. 11. Mg tane sınırında yapılan çizgisel EDS analiz sonucu.

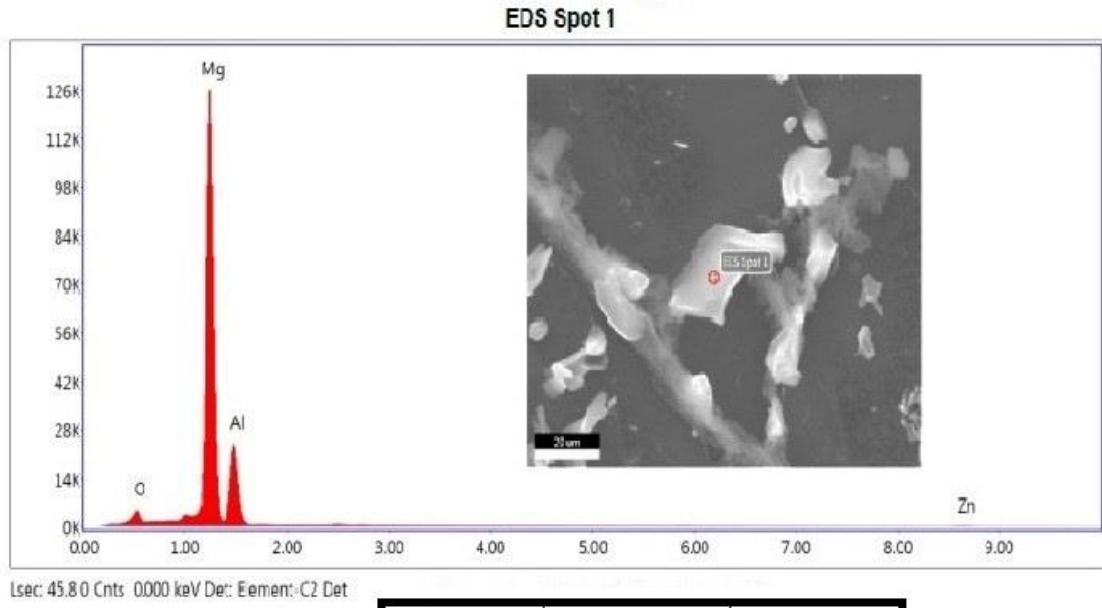
Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de ise AZ91D alaşımlarına ait farklı noktalarda alınmış EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 3.12’de AZ91D alaşımında  $\alpha$  fazı içerisinde noktasal EDS analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre  $\alpha$  fazının ağırlıkça %7 Al içerdiği bulgusuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, alaşımın ortalama Al içeriği olan %8.93 ile uyumludur. Zira çökelti fazlarının oluşması ile  $\alpha$  fazı içerisindeki Al miktarı azalacaktır.



Element	Ağırlık %	Atomik %
Mg	93.0	93.7
Al	7.0	6.3

Şekil 3. 12. AZ91D alaşımının fazları dışında alınan EDS görüntüsü.

Şekil 3.13’de AZ91D alaşımında oluşan çökelti  $Mg_{17}Al_{12}$  fazından alınan noktasal EDS analizi sonuçları gösterilmiştir. Çökeltelerin büyük oranda Mg ve Al, çok az miktarda da Zn ve O içerdikleri görülmüştür.  $Mg_{17}Al_{12}$  ( $\beta$ ) intermetalığı stokiometrik olarak 17 Mg atomuna karşı 12 Al atomundan oluşmaktadır. Bu durumda, atomik olarak %41 Al %59 Mg içermesi gerekir. EDS analizi sonucu bu oranlar sırasıyla %25.9 ve %65.9 olarak bulunmuştur. Bunun nedeni EDS analizinde kullanılan X ışınlarının yüzeyden birkaç  $\mu m$  derinliğe kadar nüfus etmesidir.  $\beta$  çökeltilerinin kalınlığının da 1-2  $\mu m$  olması nedeniyle hemen altında bulunan  $\alpha$  fazına da X ışınları ulaşmış bu da  $\beta$  fazının Mg içeriğinin olması gereken değerden daha fazla, Al içeriğinin ise olması gerekenden daha az olmasına yol açmıştır. Ayrıca X ışınlarının iyi odaklanamaması durumunda  $\beta$  çökeltilerinin hemen yanında bulunan  $\alpha$  fazından da detektöre sinyaller ulaşabileceği dikkate alınmalıdır.



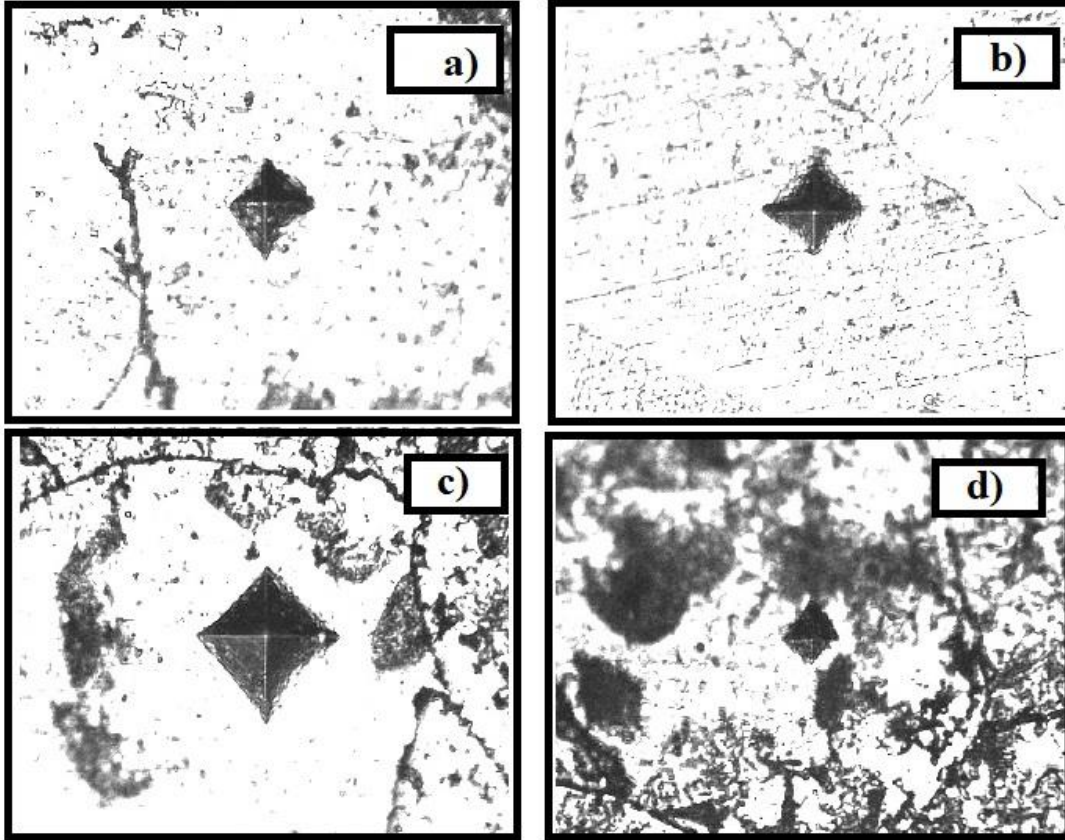
Element	Ağırlık %	Atomik %
O	2.6	4.2
Mg	65.9	68.2
Al	25.9	24.2
Zn	3.7	1.1

Şekil 3. 13. AZ91D alaşımı üretiminde oluşan fazlar üzerinde alınan EDS görüntüsü.

### 3.4. Mekanik Analizler

#### 3.4.1 Sertlik analiz bulguları

Şekil 3.14’de farklı koşullarda üretilmiş Mg ve AZ91D alaşımına ait mikro sertlik görüntüleri verilmiştir. Saf Mg ve AZ91D alaşım numunelerinin ölçülen sertlik değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Saf Mg’un sertlik ölçümlerini incelediğimizde 600 °C’de üretilen numunelerin sertlik değerlerinin (ortalama 40HV) 420 °C’de üretilen (35HV) numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle presleme sıcaklığının artmasının sertliği de arttırdığı sonucuna varılmıştır. Sinterleme temelde yayılım (difüzyon) kaynaklı bir işlem olup sıcaklığa üssel olarak bağlıdır. Sıcaklığın artması ile birlikte çok daha güçlü sinterlenme bağları oluşacağı ve yoğunluğun da artacağı düşünülürse sertliğin de artması kaçınılmaz olacaktır. 420 °C’de üretilen saf Mg az da olsa gözenek içerirken 600 °C’de üretilen ise gözenek içermemekteydi.

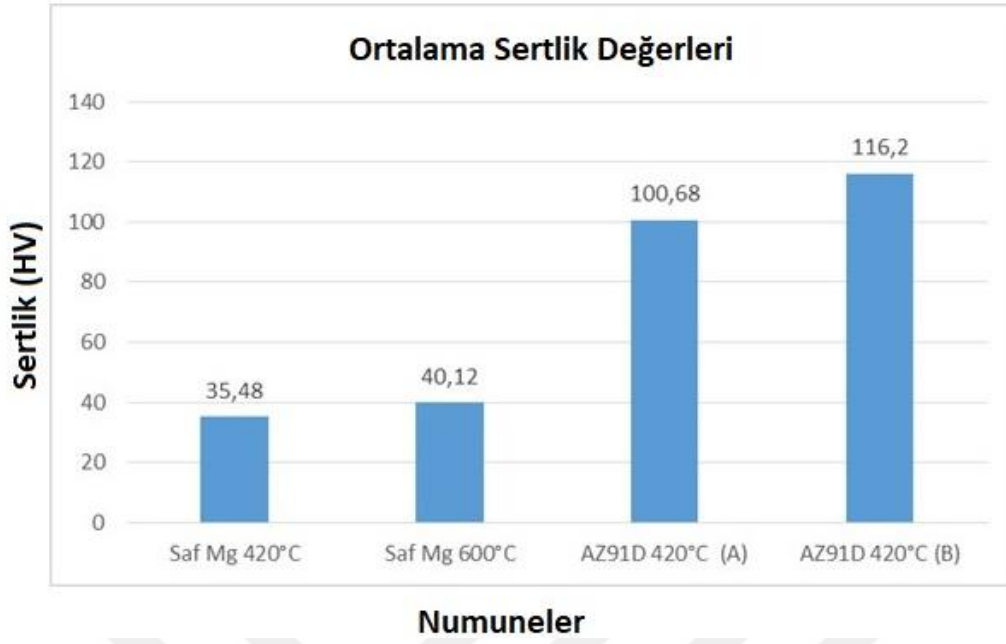


Şekil 3. 14. a) 420 °C saf Mg b) 600 °C saf Mg c) 420 °C AZ91D (A) d) 420 °C AZ91D (B) numunelerine ait sertlik ölçüm görüntüleri.

Aynı sıcaklıklarda üretilen AZ91D alaşımları soğuma sırasında birine yük uygulanırken diğerine yük uygulanmamıştır. Bu iki numunenin sertliğini incelediğimizde AZ91D (A) numunesinin sertliğinin (100HV'ye karşı 116HV) daha az olduğu tespit edilmiştir. SEM mikrograflarından da gözleendiği üzere sıcak presleme sonrası soğuma sırasında 50 MPa'lık basıncın uygulanması durumunda  $\beta$  çökeltilerinin büyümesinin yavaşladığı ve bunun sonucu olarak da bu numunelerin daha az  $\beta$  fazı içerdiği gözlenmiştir. AZ91D alaşımlarının iç yapısını oluşturan  $\alpha$  katı çözeltilisi yumuşak iken  $\beta$  intermetaligi sert ve kırılmandır. Alaşımın sertliği  $\beta$  fazının oranına bağlıdır. Dolayısıyla soğuma sırasında yük uygulanmayan numunede yüksek miktarda daha  $\beta$  çökeltileri oluştuğu için sertlik daha fazla ölçülmüştür. Şekil 3.15'de saf Mg ve AZ91D numunelerine ait ortalama sertlik grafiği verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait sertlik ölçümleri

Numune adı	Ölçüm Sıra No	Yük (gram Kuvvet)	Süre (saniye)	HV Değeri	Ortalama Değer (HV)
Saf Magnezyum (420 °C)	1	10 (98.07 mN)	15	36.2	35.48
	2	10 (98.07 mN)	15	35.9	
	3	10 (98.07 mN)	15	35.9	
	4	10 (98.07 mN)	15	35	
	5	10 (98.07 mN)	15	34.4	
Saf Magnezyum (600 °C)	1	10 (98.07 mN)	15	40.8	40.12
	2	10 (98.07 mN)	15	40.8	
	3	10 (98.07 mN)	15	40.1	
	4	10 (98.07 mN)	15	39.8	
	5	10 (98.07 mN)	15	39.1	
AZ91D Alaşımı (A) (420 °C)	1	10 (98.07 mN)	15	96.1	100.68
	2	10 (98.07 mN)	15	98.8	
	3	10 (98.07 mN)	15	102	
	4	10 (98.07 mN)	15	87.5	
	5	10 (98.07 mN)	15	119	
AZ91D Alaşımı (B) (Yüksüz 420 °C)	1	10 (98.07 mN)	15	103	116.2
	2	10 (98.07 mN)	15	114	
	3	10 (98.07 mN)	15	116	
	4	10 (98.07 mN)	15	119	
	5	10 (98.07 mN)	15	129	



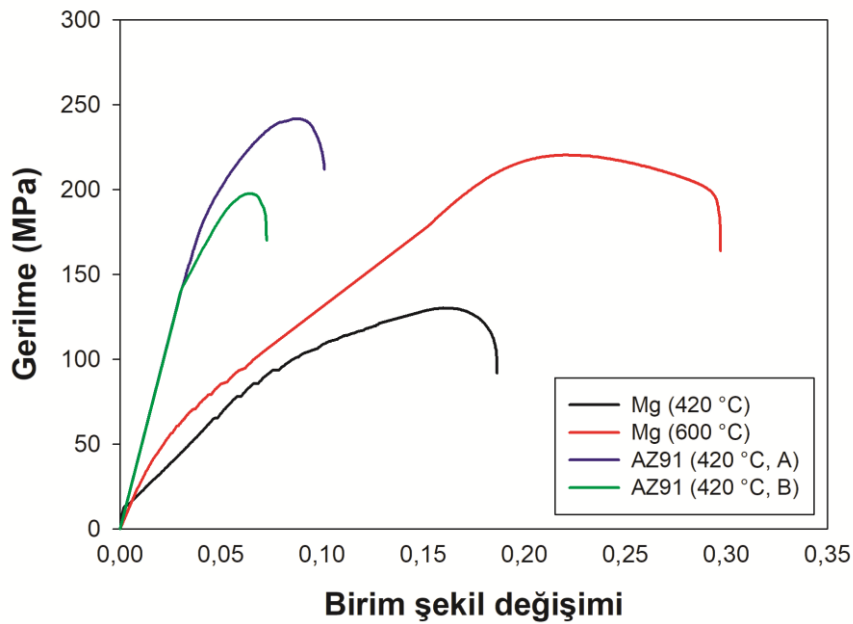
Şekil 3. 15. Saf Mg ve AZ91D alaşımlarına ait sertlik grafiği.

### 3.4.2. Mekanik basma testi bulguları

Oda sıcaklığında basma testlerine tabi tutulmuş Mg (420 °C), Mg (600 °C), AZ91D (A) ve AZ91D (B) numunelerinin gerilme-birim şekil değişimi grafikleri Şekil 3.16’de verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi AZ91D (A) alaşımı AZ91D (B) alaşım numunesinden, Mg (600 °C) numunesi ise Mg (420 °C) numunesinden daha iyi özellikler (akma dayanımı, basma dayanımı ve süneklik) sergilemiştir. Bu grafiklerden elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.3’de toplu olarak verilmiştir. Presleme sıcaklığının artması ile çok daha iyi difüzyon ve sinterlenme olduğu için 600 °C’de üretilen Mg daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bunun yanında 420 °C’de üretilen Mg’da %2.3 oranında gözenek bulunurken, bu oran 600 °C’de üretilen Mg için %0.17’ye düşmüştür. 600 °C’de üretilen numune hem tam yoğunluğa ulaşmış hem de çok daha iyi sinterlenmiş olduğundan akma mukavemeti (56 MPa), basma mukavemeti (130 MPa) ve kırılma birim şekil değişimi (%18.6) daha yüksek çıkmıştır.

Öte yandan, alaşım elementleri içeren AZ91D alaşımında gerek  $\alpha$  katı çözeltisinin gerekse de sert  $\beta$  çökeltilerinin bulunması nedeniyle Mg’a göre çok daha yüksek mukavemet değerleri gözlenmiştir. Özellikle AZ91D (A) ve AZ91D (B) numunelerinin akma mukavemeti (A:183, B:147 MPa) 600 °C’de üretilen Mg

numunesinin akma mukavemeti (56 MPa) ile kıyaslandığında yaklaşık olarak 3 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Sert ve kırılğan  $\beta$  çökeltileri AZ91D alaşımının sünekliğini önemli ölçüde düşürmüştür. Mg (600 °C) ile AZ91D (A) alaşımının kırılmadaki birim şekil değişimleri karşılaştırıldığında aralarında 3 kat fark olduğu görülmektedir. Mg (600 °C) ile AZ91D (A) alaşımının basma mukavemetleri birbirine yakındır. AZ91D (B) alaşımının basma mukavemeti ise Mg (600 °C)'dan daha düşük çıkmıştır. AZ91D (B) alaşımının mekanik özelliklerinin düşük olmasının sebebi soğutma sırasında basınç uygulanmamış olmasıdır. Numuneler 1 saatlik sıcak presleme işlemi sonrasında buldukları sıcaklıktan 180 °C'ye kadar sıcak presin haznesi içinde soğutulduktan sonra alınmaktadırlar. Bu soğuma işlemi 420 °C için 3 saat civarındadır. Bu esnada numuneler hala sıcaklığa maruz kaldıkları için sinterlenmeye devam etmektedirler. Bu esnada uygulanan basınç tozlar arasında oluşan tane sınırlarının daha güçlü olmasına neden olmaktadır. Çünkü basınç, hem plastik akmaya hem de difüzyon mesafelerinin azalmasına yardım ettiği için çok daha güçlü tane sınırları elde edilmektedir. AZ91D (B) alaşımının sertliği AZ91D (A) alaşımından yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni gerek XRD desenleri gerekse SEM görüntülerinden görüldüğü üzere daha fazla  $\beta$  fazı içermesidir. Fakat yukarıda açıklandığı şekilde sinterlenmesinin yetersiz olması nedeniyle oluşan tane sınırları arasındaki bağlar zayıf olmuş bu da düşük dayanım ve aynı zamanda düşük süneklik değerlerini beraberinde getirmiştir.



Şekil 3. 16. Üretilen numunelerin oda sıcaklığında basma testleri.

Çizelge 3. 3. Üretilen numunelerin oda sıcaklığında yapılan basma testlerin sonuçları

Numune	Akma mukavemeti (MPa)	Basma mukavemeti (MPa)	Kırılma birim şekil değişimi (%)
Mg (420 °C)	38	130	18.6
Mg (600 °C)	56	220	29.7
AZ91D (420 °C, A)	183	241	10.1
AZ91D (420 °C, B)	147	197	7.2

Oda sıcaklığı testleri sonucunda en iyi mekanik özellikleri Mg (600 °C) ve AZ91D (A) numuneleri sergilediği için yüksek sıcaklık deneyleri sadece bu iki malzeme için yapılmıştır. Şekil 3.17a 'da Mg (600 °C) numunesinin 25 °C, 100 °C, 150 °C ve 200 °C sıcaklıklarındaki basma gerilme-birim şekil değişimi grafiği verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde, artan sıcaklıklar ile gerilme değerlerinde azalma görülmüş, birim şekil değişiminde ise yükselmeler gözlenmiştir. 100 °C, 150 °C ve 200 °C sıcaklıklarda Mg (600 °C) numunesinin birim şekil değiştirme miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

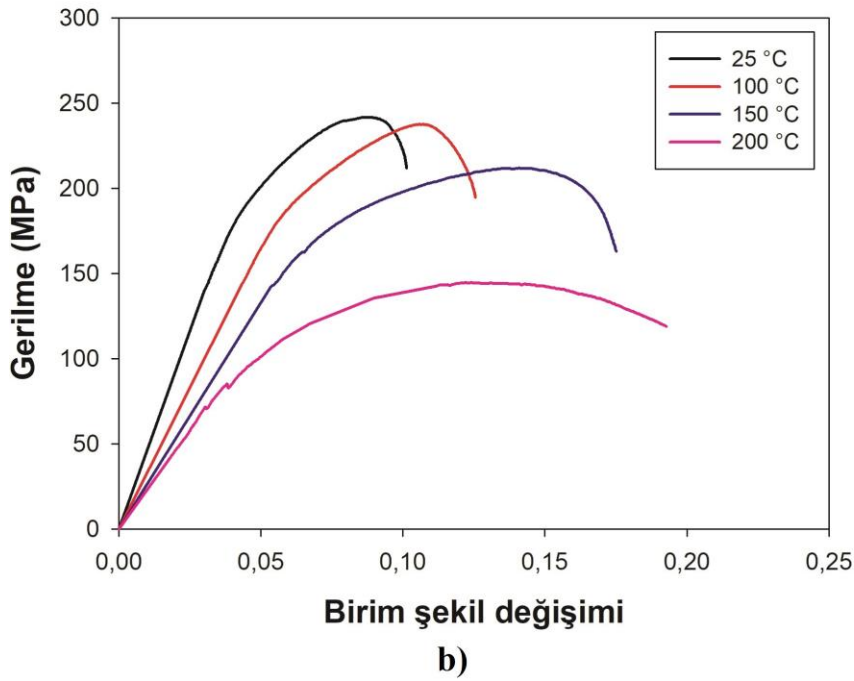
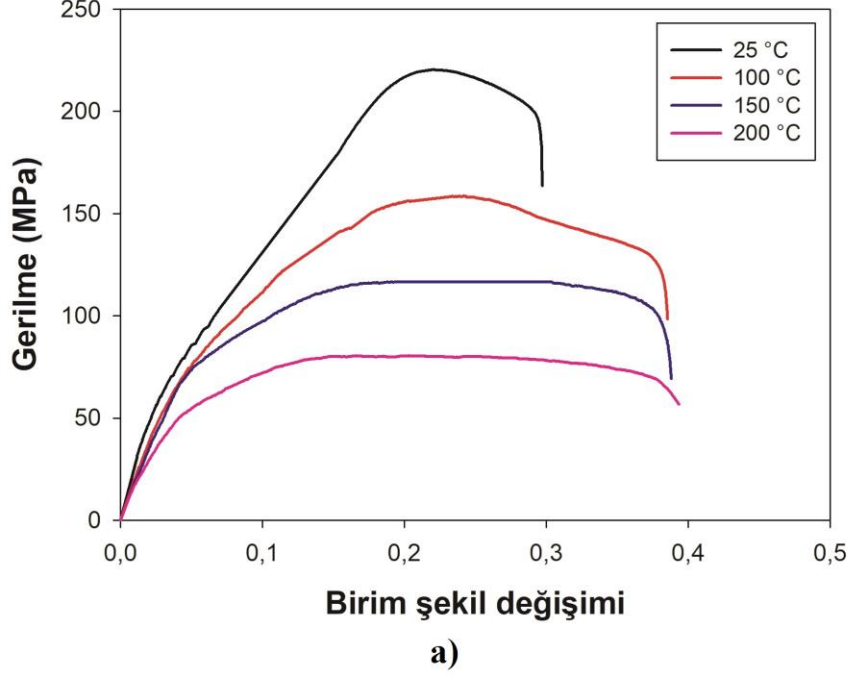
Şekil 3.17b'de ise AZ91D (A) alaşım numunesinin 25 °C, 100 °C, 150 °C ve 200 °C sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değişimi grafiği verilmiştir. AZ91D (A) alaşımının 25 °C ve 100 °C sıcaklığındaki basma mukavemetleri birbirine çok yakınken 150 °C ve 200 °C 'deki basma mukavemetleri arasındaki fark artmıştır. Birim şekil değişimleri ise sıcaklık ile orantılı olarak artmıştır.

Mg (600 °C) ve AZ91D (A) numunelerinin artan sıcaklık ile akma dayanımı, basma dayanımlarında azalma görülürken, sünekliklerinde ise artış gözlenmiştir. Mg (600 °C) ve AZ91D (A) alaşım numunelerine ait akma dayanımı, basma dayanımı ve süneklik değerleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

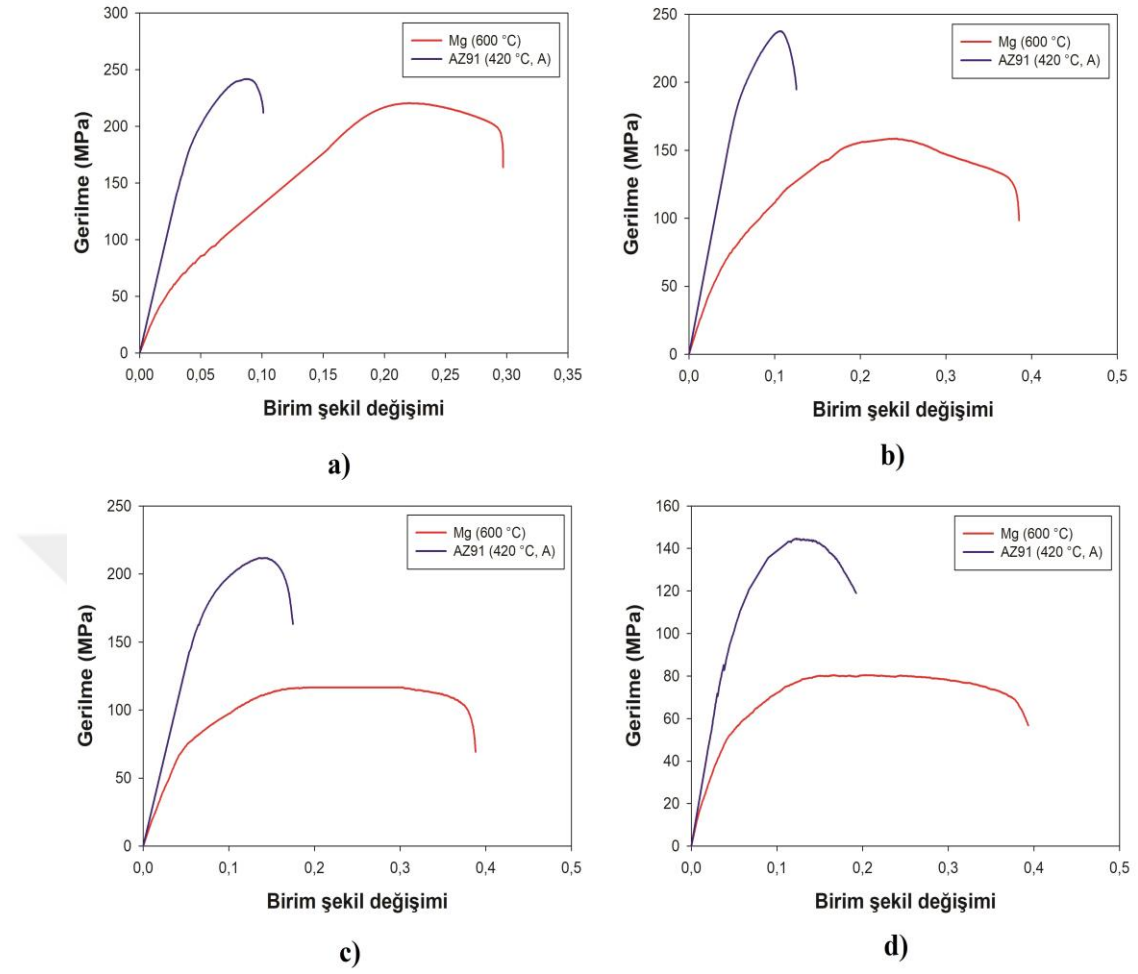
Şekil 3.18'de Mg (600 °C) ve AZ91D (A) alaşımlarının farklı sıcaklıkta yapılan basma testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri kıyaslama amacıyla yeniden çizilmiştir. Şekilden görüleceği üzere Mg (600 °C) ve AZ91D (A) numunelerine yükün uygulanması ile önce elastik deformasyon gözlenmiş ve akma gerilimine ulaşıldığında ise plastik deformasyon başlamıştır. Artan gerilme ile orantılı olarak dislokasyon yoğunluğu artmış ve oda sıcaklığında yapılan testlerde numunelerde belirli oranda sertleşmeler (pekleşme) gözlenmiştir. Sonrasında yükün uygulanmaya devam edilmesiyle maksimum gerilme değerine yani basma mukavemetine ulaşılmıştır. Basma gerilimine ulaşan numunelerde çatlak oluşumu artmış ve yükü taşıyamadıkları



için kırılmışlardır. Yüksek sıcaklıkta yapılan testlerde ise pekleşme azalmış, bu nedenle de mukavemet düşerken, süneklilikte artış gözlenmiştir.



Şekil 3. 17. a) Mg (600 °C) ve b) AZ91D (A) numunesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.

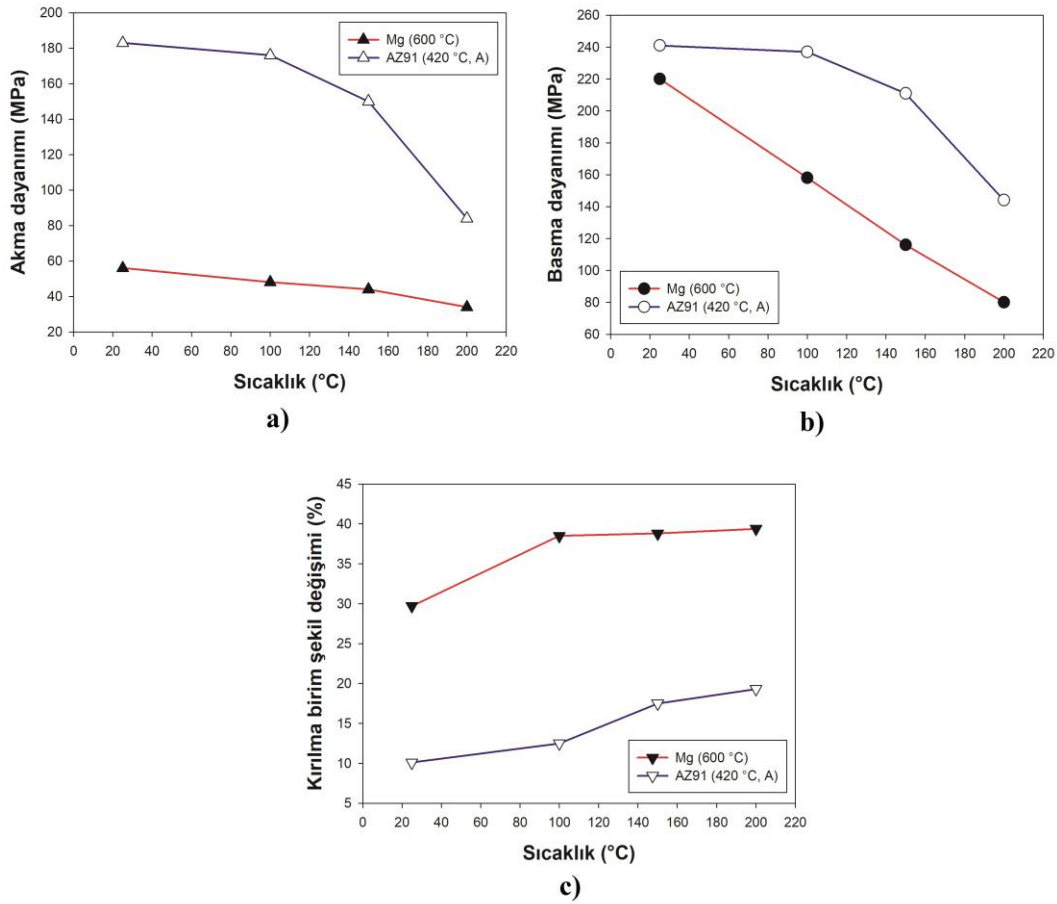


Şekil 3. 18. a) 25 °C, b) 100 °C, c) 150 °C, d) 200 °C sıcaklıklarında basma testlerine tabi tutulmuş Mg ve AZ91D alaşımlarının gerilme-birim şekil değişimi diyagramları.

Çizelge 3. 4. Mg (600 °C) ve AZ91D (A) alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri

Sıcaklık (°C)	Akma mukavemeti (MPa)		Basma mukavemeti (MPa)		Kırılma birim şekil değişimi (%)	
	Mg	AZ91D	Mg	AZ91D	Mg	AZ91D
25	56	183	220	241	29.7	10.1
100	48	176	158	237	38.5	12.5
150	44	150	116	211	38.8	17.5
200	34	84	80	144	39.4	19.3

Şekil 3.19a’da görüldüğü gibi Mg (600 °C) numunesinin akma dayanımında sıcaklığın artışı ile doğrusal bir şekilde azalma meydana gelmiştir. Fakat bu doğrunun eğimi azdır. Oda sıcaklığında 56 MPa olan akma mukavemetinin değeri 200 °C’de 34 MPa düşmüştür. Diğer taraftan AZ91D (A) numunesinde 100 °C’ye kadar önemli bir düşüş yaşanmazken (183’den 176MPa’ya düşmüş) sıcaklığın daha da artırılmasıyla akma dayanımındaki düşüşler daha da fazla olmuştur. 200 °C’de akma mukavemeti 84 MPa olarak ölçülmüştür. Oda sıcaklığı ile en yüksek test sıcaklığında ölçülen akma mukavemeti değerleri arasında 2 kattan fazla bir değişim vardır.



Şekil 3. 19. Üretilen Mg (600 °C) ve AZ91D (A) numunelerinde a) akma dayanımı, b) basma dayanımı ve c) kırılma birim şekil değişiminin sıcaklıkla olan ilişkisi.

Basma mukavemetlerinde (Şekil 3.19b) de benzer bir eğilim görülmüştür. Mg’un oda sıcaklığındaki basma dayanımı (220 MPa), 200 °C sıcaklıkta yaklaşık olarak üçte birine (80 MPa) düşmüştür. Zaten Mg’un basma mukavemetinin sıcaklıkla değişimini gösteren doğrunun eğimi oldukça fazladır. AZ91D alaşımında ise 241 MPa

olan oda sıcaklığındaki basma dayanımı 200 °C’de 144 MPa’a kadar azalmıştır. Birim şekil değişimi (Şekil 3.19c) Mg için 100 °C’ye kadar hızla artmış sonrasında ise doğrusal olarak çok küçük artışlar gözlenmiştir. AZ91D alaşımında ise Mg’un tersine 100 °C’den sonra süneklikte büyük artışlar gözlemlenmiştir.

Literatüre baktığımızda Mg, kum döküm, ekstrüzyon, haddeleme gibi yöntemler ile üretilmiş ve mekanik değerleri Çizelge 1.3’de verilmiştir. Bu çalışmada ise Mg (420 °C ve 600 °C) sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Bu çizelgeler incelendiğinde sıcak presleme yöntemi ile üretilen Mg (600 °C) numunesinin basma akma mukavemeti 56 MPa iken kum döküm yönteminde 21 MPa, ekstrüzyon yönteminde 34-55 MPa, haddelemede ise 105-115 MPa olduğu (Westengen ve Aune, 2006) görülmektedir. Bu sonuçlara göre sıcak presleme yönteminin haddeleme dışındaki diğer üretim yöntemlerinden daha üstün mekanik özellikler sağladığı görülmüştür.

AZ91D alaşımı ise başta basınçlı döküm olmak üzere, tikso döküm, tikso kalıplama, reo-konteyner ve yarı-katı yöntemleri ile üretilmiştir. Bu yöntemler arasında en iyi sonucu veren basınçlı döküm olmasına rağmen sıcak presleme yöntemi daha iyi sonuçlar vermiştir. Basınçlı döküm yöntemi ile üretilen AZ91D alaşımının akma mukavemeti 140-159 MPa iken (Du ve Zhang, 2007) sıcak presleme yöntemi ile üretilen AZ91D alaşımının akma mukavemeti ise 147-183 MPa olduğu görülmüştür (Çizelge 1.6 ve Çizelge 3.3). Basınçlı döküm yöntemi ile üretilen AZ91D alaşımları ısıl işlem yapılmadan kullanılırlar. Mevcut çalışmada ise sıcak presleme sonrasında soğuma sırasında  $\beta$  çökeltileri oluşmuştur. Bu yüzden dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. En az 24 saat süre ile 400 °C civarında yapılan çözeltiye alma (T4) ve akabinde uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi (T6: 200 °C civarında en az 16 saat) sonucunda da benzer miktarda  $\beta$  çökeltilerinin oluşacağı düşünülürse, sıcak presleme işlemi sonrasında bu ısıl işlemlerin yapılmasına gerek olmadığı kanaatine varılabilir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi kullanılarak saf Mg ve AZ91D alaşımları başarıyla üretilmişlerdir. 50 MPa basınç altında 1 saat süre ile yapılan sıcak presleme işleminde proses sıcaklığı saf Mg için 600 °C, AZ91D alaşımı için ise 420 °C olarak optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Optimum sıcaklıkta üretilen Mg ve AZ91D alaşımlarının tam yoğunluğa ulaştığı ve gözeneksiz bir mikroyapı elde edildiği görülmüştür.
- Üretilen numunelerin XRD analizleri yapılmış, Mg numunesinde sadece Mg, AZ91D alaşım numunesinde ise  $\alpha$  ve  $Mg_{17}Al_{12}$  fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Başlangıç tozlarında bulunan fazlar dışında herhangi bir fazın (oksit, karbür vb.) oluşmadığı gözlenmiştir.
- AZ91D alaşımında döküm yöntemlerinin aksine  $Mg_{17}Al_{12}$  çökelti fazlarının hem tane sınırında hem de tane içinde oluştuğu belirlenmiştir.
- Mikro-Vickers sertlik ölçümleri sonuçlarına göre saf Mg numunesinin artan presleme sıcaklığı sonrasında sertliğinin de arttığı tespit edilmiştir.
- Soğuma sırasında AZ91D alaşımına yük uygulanmasının  $\beta$  fazının büyümesini yavaşlattığı bu nedenle de daha düşük bir sertlik sergilemesine neden olduğu tespit edilmiştir. Fakat soğuma sırasında sinterlenmenin devam etmesi nedeniyle basınç uygulanması daha yüksek dayanç ve sünekliğe neden olmuştur.
- Literatür taramalarına göre bu çalışma ilk olma özelliği taşımaktadır. Sıcak presleme ile üretilen Mg ve AZ91D alaşımları bütün döküm yöntemlerinden daha iyi mekanik özellikler (akma dayanımı, basma dayanımı ve süneklik) sergilemiştir.
- Yapılan basma testlerinde, test sıcaklığı arttıkça akma mukavemeti, basma mukavemeti değerlerinde azalma görülürken, süneklik değerinde ise artış görülmüştür.
- Sıcak presleme işlemi ile üretilen AZ91D alaşımlarında, soğuma esnasında eşzamanlı olarak yaşlandırma ısıl işlemi uygulandığı için, çok uzun süren ve fazla miktarda enerji gerektiren T4 ve T6 ısıl işlemlerinin uygulanmasına gerek olmadığı ortaya konulmuştur.



## KAYNAKLAR

- Aghion, E., Golub, G., 2006. *Magnesium Technology*. Editörler: Friedrich, H. E., Mordike, B. L. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. Sayfa 29-62.
- Akbulut, H., 1994. *Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı Özellik İlişkilerinin İncelenmesi* (doktora tezi, basılmamış), İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akın, İ., 2010. *ZrB<sub>2</sub> Esaslı Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. (doktora tezi, basılmamış). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Angelo, C. P., Subramanian, R., 2008. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*, ISBN – 978 – 81 – 203 – 3281 – 2.
- ASM Handbook Cast Metal-Matrix Composites Vol:8 Casting p:840-853.
- ASM Handbook Volume 2 1996. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASM Specialty Handbook 1999. *Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International Handbook Committee, United States of America.
- ASTM HANDBOOK Vol. 2 Chapter 1., S.8.
- Avedesian, M.M., Baker, H., 1999. *Magnesium and Magnesium Alloys*, First Edition, ASM International, Ohio.
- Aybers, M. T. 1999. Sinterleme ve birinci safha sinterleme kinetiği, in *1. Ulusal Nükleer Yakıt Teknolojisi Sempozyumu*. 3-5 Eylül 1997, İstanbul.
- Barber L.P., 2004. *Characterization Of The Solidification Behavior And Resultant Microstructures Of Magnesium-aluminum Alloys*, (yüksek lisans tezi, basılmamış). Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA .
- Beffort O. and Hausmann C., 1999. Das leichtmetall magnesium und seine egierungen, *EMPA Mg Seminar*, Thun, Switzerland 15-22.
- Blawert C., Hort N. and Kainer K. U., 2004. Automotive applications of magnesium and Its alloys, *Trans. Indian Inst. Met*, (57): 397-408.
- Bolstad J., 2000. Magnesium alloy development for intelligent magnesium designs, *SinoMaG Seminar*, Beijing-China, 8-4.
- Brown, R. E. 2006. *Magnesium Technology*. Editörler: Friedrich, H. E., Mordike, B. L. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Sayfa 12-28.
- Brown, R., 2004. Magnesium, Mining Journal Annual Review for 2004, *International Magnesium Statistics*, 1-14 2004.
- Candan, Ş., Çelik, M., Candan, E., 2014. AZ91 magnezyum alaşımında soğuma hızlarının mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(2): 17-28.
- Chen Z.W., Jahendi M.Z., 1999. Die erosion and its effect on soldering formation in high pressure die casting of aluminium alloys, *Materials and Design* 20: 303-309.
- Czerwinski, F., 2008. *Magnesium Injection Molding*, First Edition, Springer Science LLC., New York.

- Çıtak K., 2004. Magnezyum alaşımları seçim ve kullanım kriterleri, *Metal Dünyası Dergisi*, Eylül.
- Doehler, H.H., Çeviren Bayvas, M.Ş. 1974. *Basınçlı Döküm*, Erkek teknik yüksek okulu matbaası, Ankara.
- Du, X., Zhang, E., 2007. Microstructure and mechanical behaviour of semi-solid die-casting AZ91D magnesium alloy, *Materials Letters*, **61**:2333-2337.
- Eksi, A. K., Bircan, D. A., 2006. Mechanical properties of cold and warm compacted aluminum alloys (Al7XXX), *Proceedings of 11th International Materials Symposium*, Denizli/Türkiye.
- Friedrich, H., Schumann, S. 2001. Research for a new age of magnesium in the automotive industry, *Journal of Materials Processing Technology*, **117**, 276-281.
- Friedrich, H.E. Mordike, B.L., 2006. *Magnesium Technology*, First Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Würzburg.
- Froes, F. H., Eliezer, D., Aghion, E. 2006. *Magnesium Technology*. Editörler: Friedrich, H. E., Mordike, B. L. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Sayfa 603-620.
- Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu S., 1996. Potential automotive uses of wrought magnesium alloys, *Automotive Technology Development*, Detroit, Michigan, 1-7 .
- Ghomashchi, M., R., Vikrov, A., 2000. Squeeze Casting: An Overview, *Journal Of Materials Processing Technology* **101**: 1-9.
- Groover M.P., 2016. *Principles Of Modern Manufacturing* 1002s.
- Gupta, M. Sharon, N.M.L., 2011. *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*, First Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Günay, M., 2009. *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi Al – Si/SiCp Kompozitlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*, (doktora tezi, basılmamış), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, , Ankara.
- Harbott, K. 2006. *Magnesium Technology*. Editörler: Friedrich, H. E., Mordike, B. L. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. Sayfa 1-11.
- Ho, K.F., Gupta, M., Srivatsan, T.S., 2004, The mechanical behavior of magnesium alloy az91 reinforced with fine copper particulates, *Materials Science and Engineering*, **369**: 302-308.
- Housh S., Mikucki B. and Stevenson A., 1998. Selection and application of magnesium and magnesium alloys, *ASM Handbook*, **10** (2): 455-479
- İnternet, 2015. ([http://www.msetec.net/sicak\\_pres.asp](http://www.msetec.net/sicak_pres.asp)) 11.06.2015
- Jain, C.C., 2007. Creep and corrosion properties of extruded magnesium alloy containing rare earth, *Material Transactions*, **48**, 265-272.
- Kaçar, İ. Öztürk, F., 2006. Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde son gelişmeler, *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, 26-28 Balıkesir.
- Kainer K.U., Vuch, F.B., 2006. *The Current State Of Technology And Potential For Further Development Of Magnesium Applications* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany 3-20.
- Kainer, K.U., 2003. *Magnesium-Alloys and Technology*, First Edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Kaufman, J.G., 2011. *Magnesium Alloy Database*, First Edition, Knovel, New York.



- King J.F., 2006. Technology of magnesium and magnesium alloys, *Magnesium Technology*, 219-225.
- Koren, Z., Rosenson, H., Gutman, E.M., Unigovski, Y.B., Eliezer, A., 2002, Development of semisolid casting for AZ91 and AM50 magnesium alloys, *Journal of Light Metals*, 2:81–87.
- Kudret K., A. Çetin C., 2010. Otomotiv endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli (Basınçlı dökümde) *Politeknik Dergisi Journal*, 13(3): 165-176.
- Kumar, N.V., Blandin, J.J., Suery, M., Grosjean, E., 2003. Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys, *Scripta Materialia*, 49: 225-230.
- Kuşdemir, H., 2008. *AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi*, (yüksek lisans tezi basılmamış). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Landkof B., 2005. *Magnesium Alloys Applications*, Magnesium alloys science, technology and application, Aghion E., Eliezer D., Dead Sea Magnesium, Ben-Guron University, (8): 293-316.
- Li F., Wang Y., Chen L., Liu Z., Zhou J., 2005. Low-cycle fatigue behavior of two magnesium alloys, *Journal of Materials Science*, 40: 1529-1531.
- Li N., 2005. Magnesium advances and applications in north america industry., *Materials Science*, (488): 931-936.
- Luo A.A., 2013 Magnesium casting technology for structural applications, *Journal of Magnesium and Alloys* 1, 2-22.
- Lü Y. Z. Wang Q. D. Ding W. J., Zeng X. Q., Zhu Y. P., 2000. Fracture behavior of AZ91 magnesium alloy, *Materials Letters*, 44: 265-268.
- Maki S, Harada Y., Makino H., 2003. Mushy state forming of magnesium alloy making use of resistance heating , *Material Science Forums*, 419-422: 387-392.
- Mordike, B.L., Ebert, T., 2001. Magnesium properties-applications-potential, *Materials Science & Engineering A*, 302: 37-45.
- Orhan, A., Gür, K. A., ve Çalığülü U., 2007. Al matrisli B4C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4) 8 – 13.
- Orrù, R., Licheri, R., Locci, A.M., Cincotti, A., Cao, G., 2009. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(4-6): 127-287
- Paxton, D.M. , Carpenter, J.A. , Sklad, P.S. , Smith, M.T., 2009. Overview Of Light Weighting Materials Research Development In The United States Freedom Car And Fuel Partnership, *Material Science Forum*,. 618-619: 395-404.
- Peelen, J. G., 1979. Transparent hot-pressed alumina, I : *Hot Pressing of Alumina*, *Ceram.*, 5 (121): 70–75.
- Pitsaris, C., Abbott, T., Davies, C.H.J., Savage, G., 2003. Influence of process parameters on the microstructure and mechanical properties of magnesium die castings, *Magnesium-Alloys and Technologies Conference*, Germany, 694-699.
- Plano, Nanomag, 2002. *Sustainable Production, The Role of Nanotechnologies*, Copenhagen.
- Schwam D., Wallace J.F., Zhu Y., Viswanathan S. and Iskander S., 2000. Enhancements in magnesium die casting impact properties, *Final Report, Case Western Reserve University*, Ohio, 5-22.

- Simandl, G.J., Schultes, H., Simandl, J. ve Paradis, S., 2007. Magnesium-Raw materials, metal extraction and economics-global picture, *Proceedings Of The Ninth Biennial SGA Meeting*, 20-23 Dublin, 827-830.
- Sin, S.L., Dube, D., 2004. Influence of process parameters on fluidity of investment cast AZ91 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering*, **386**: 34-42
- Smith F. W., Çeviri: Erdoğan M., 2001. University Of Central Florida, *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri Demir Dışı Alaşımalar*, **2**, Nobel, ANKARA.
- Stubbington, C.A., 1988. Materials trends in military airframes, *Metals and Materials*, **424**.
- Tamburini, U.A, Munir, Z.A., 2005. Influence of synthesis temperature on the defect structure of boron carbide: *Experimental and modelling studies*, *Journal of the American Ceramic Society*, **88** (6), 1382-1387.
- Tong, K.K.S., Hu, B.H., Niu, X.P., Pinwill, I., 2002. Cavity pressure measurements and process monitoring for magnesium die casting of a thin-wall hand-phone component to improve quality , *Journal of Materials Processing Technology*, **127**:238–241
- Tokita, M., 2004. Mechanism of spark plasma sintering, in proceeding of NEDO *International Symposium on Functionally Graded Materials, Mmc*, (pp. 1–13).
- Trojanova Z., Lukac P., 2005. Compressive deformation behavior of magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **162-163**: 416-421.
- Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Gül, F., Candan, E., 2009. AZ91 Magnezyum alaşımının döküm ve mekanik özelliklerine silisyum ilavesinin etkisi **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, 13-15, Karabük, Türkiye
- Ünlü, M. D., 2014. *SiC Esaslı Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. (Doktora tezi, basılmamış) İTÜ, İstanbul.
- Vanlı, A.S., 2007. *Magnezyum Alaşımalarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi basılmamış). YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vinarcik, E.J. 2003. High Integrity Die Casting Processes, *John Wiley & Sons*, NewYork.
- Vogel M., 2002. *Mikrostruktur Und Kriechverhalten Von Magnesium Druckgusslegierungen Im System Mg-Zn-Al-Ca*, (Doktora tezi, basılmamış). Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, 6-20.
- Watari, H., Davey, K., Rasgado, M.T., Haga, T. and Izawa. 2004. S., Semi-solid manufacturing process of magnesium alloys by twin-roll casting, *Journal of Materials Processing Technology*, **155** (156): 1662-1667.
- Yang, Z., Li, J.P., Zhang, J.X. , Lorimer, G.W. ve Robson, J., 2008, Review on research and development of magnesium alloys, *Acta Metallurgica Sinica*, **21**:313-328.
- Žaludová N., 2005. Mg-RE alloys and their applications, *WDS'05 Proceedings of Contributed Papers*, (3): 643-648.
- Zeng R., 2013. *Precipitation Hardening in AZ91 Magnesium Alloy*, (Doktora tezi basılmamış). School of Metallurgy and Materials University of Birmingham, Birmingham, UK, 105.
- Zhang Z., 2000. *Development Of Magnesium-Based Alloys For Elevated Temperature Applications*, (doktora tezi basılmamış). Faculte Des Sciences Et De Genie Universite, Quebec-Canada, 2-75.
- Zhou, M., *An Experimental Study Of Die And Squeeze Cast Magnesium Alloy AM50*, (yüksek lisans tezi basılmamış). University Of Windsor, Ontar

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Van İli'nde doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Van'da tamamladı. 2013 yılında Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olarak yükseköğretimini tamamladı. 2014 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2013 yılında Pegi Teknik Enerji Sistemleri Müh. Müş. İnş. Taah. Ltd. Şti. şirketinde işe başlamış 2016 yılından beri Kontrol Müdürü olarak görev yapmaktadır.



**YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU**

**Tarih: 02/01/2018**

Tez Başlığı / Konusu: "AZ91 Alaşımının Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilmesi"

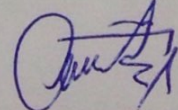
Yukarıda başlığı belirlenen tez çalışmamın Bulgular ve Tartışma ve Sonuçlar bölümlerinden oluşan toplam 26 sayfalık kısmına ilişkin, 02/01/2018 tarihinde Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

  
02/01/2018

Adı Soyadı: Erhan AYDEMİR

Öğrenci No: 139101152

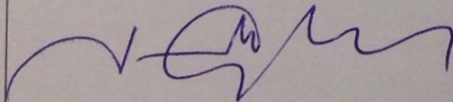
Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği ABD

Programı:

Statüsü: Y. Lisans

Doktora

**DANIŞMAN ONAYI**  
**UYGUNDUR**



Doç. Dr. Tarık AYDOĞMUŞ

**ENSTİTÜ ONAYI**  
**UYGUNDUR**



(Unvan, Ad Soyad, İmza)