T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZ91D MAGNEZYUM ALAŞIMININ ENDÜSTRİYEL ÖLÇEKTE ÜRETİMİNDE ALAŞIM MODİFİKASYONU

Yusuf TURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Danışman

Doç. Dr. Rıdvan GECÜ

Eş Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Ali Serdar VANLI

Kasım, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZ91D MAGNEZYUM ALAŞIMININ ENDÜSTRİYEL ÖLÇEKTE ÜRETİMİNDE ALAŞIM MODİFİKASYONU

Yusuf TURAN tarafından hazırlanan tez çalışması 12.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Rıdvan GECÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Ali Serdar VANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Rıdvan GECÜ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Burak BİROL, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yakup YÜREKTÜRK, Üye

Bursa Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Rıdvan GECÜ ve eş danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Ali Serdar VANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "AZ91D Magnezyum Alaşımının Endüstriyel Ölçekte Üretiminde Alaşım Modifikasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yusuf TURAN

İmza

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini ve rehberliğini bizlerle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı derin anlamı asla unutmayacağım saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Rıdvan GECÜ'ye, çalışmalarım boyunca bana her an yardımını esirgemeyen eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar VANLI'ya sonsuz minnet ve saygılarımı sunarım.

Deney numunelerinin dökümü için tüm imkânlarını seferber eden Torun Metal A.Ş. firmasına, mekanik testlerin gerçekleştirilmesi için numunelerin işlenmesinde desteklerini sunan Netmould firmasına ve mikroyapı incelemelerinin yanı sıra mekanik testlerin yapılmasında laboratuvarlarını kullanmama olanak tanıyan Yıldız Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

İsim ayırt etmeksizin üzerimde emekleri olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca beni sabırla destekleyen değerli eşime ve oğluma şükranlarımı sunar, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen anne ve babama sonsuz sevgi ve saygılarımı iletirim.

Yusuf TURAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
2 MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI 2
2.1 Magnezyumun Tarihçesi ve Genel Özellikleri 2
2.2 Magnezyum Alaşımlarının Özellikleri 5
2.2.1 Magnezyumun Avantajları 5
2.2.2 Magnezyumun Dezavantajları 5
2.3 Magnezyum Alaşımlarına Etki Eden Alaşım Elementleri 7
2.3.1 Alüminyum 7
2.3.2 Silisyum 7
2.3.3 Çinko 7
2.3.4 Bakır 7
2.3.5 Mangan 8
2.3.6 Stronsiyum 8
2.3.7 Seryum 8
2.3.8 Bor 9
2.3.9 Demir 9
2.3.10 Toprak Alkali Metaller 9
2.4 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 9
2.5 AZ91(Mg-Al-Zn) Alaşımları 10

2.6 AZ91 Magnezyum Alaşımının Modifikasyonu Üzerine Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar 14

3 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ 24

3.1 Giriş 24

3.1.1 Basınçlı Dökümün Avantajları 24

3.1.2 Basınçlı Dökümün Dezavantajları 25

3.2 Basınçlı Döküm Yöntemleri 25

3.2.1 Soğuk Kamaralı Döküm 25

3.2.2 Sıcak Kamaralı Döküm 28

4 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜREKLİ KALIBA (KOKİL) DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ 30

4.1 Giriş 30

4.1.1 Sürekli (Kokil) Kalıba Dökümün Avantajları 30

4.1.2 Sürekli (Kokil) Kalıba Dökümün Dezavantajları 30

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 32

5.1 Çalışmanın Amacı 32

5.2 Çalışma Sistemi 32

5.3 Metalografik Çalışmalar 33

5.4 Mekanik Test Uygulamaları 34

5.4.1 Sertlik Testi 34

5.4.2 Çekme Testi Deneyi 35

5.4.3 Çentik Darbe Deneyi 37

6 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 38

6.1 X-Işınları Difraksiyon Analizleri 38

6.2 Alaşımların Mikro Yapıları 40

6.3 Çekme Mukavemeti Sonuçları 47

6.4 Çentik Darbe ve Sertlik Testi Sonuçları 49

7 SONUÇ 52

KAYNAKÇA 54

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 57

SİMGE LİSTESİ

A,c	Kafes Parametreleri
α	Magnezyum Matrisi
α+β	Ötektik Faz
β	İntermetalik Faz
μm	Mikron

KISALTMA LİSTESİ

Al	Alüminyum
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
B	Bor
BKK	Basit Kübik Kristal
Ce	Seryum
Cr	Krom
EDS	Enerji Dağılımı Spektroskopisi
Fe	Demir
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
Mg	Magnezyum
Re	Akma Mukavemeti
RE	Toprak Alkali Metal
Rm	Çekme Mukavemeti
Sb	Antimon
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Sr	Stronsiyum
Ti	Titanyum
YBD	Yüksek Basınçlı Döküm
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
Zn	Çinko
%e	Kopma Uzaması

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Saf Mg metal kafesindeki düzlem ve yönler [1]. **3**

Şekil 2. 2 Mg-Al-Zn alaşımının dökülebilirlik oransal dağılımı [19]. **11**

Şekil 2. 3 AZ91 üçlü faz diyagramı [19]. **11**

Şekil 2. 4 Magnezyum ve Alüminyum ikili faz diyagramı [20]. **13**

Şekil 2. 5 AZ91-RE-xSr alaşımlarının SEM görüntüleri [21]. **16**

Şekil 2. 6 İkincil aşamaların büyütülmüş SEM morfolojisi. (a) AZ91-0,5RE ve (b) AZ91-0,5RE-1.0Sr alaşımı, (d-g) EDS element haritaları (b), (h) Beyaz bloklu EDS sonuçları (b)'deki kırmızı okla işaretlenmiştir. (i) (b)'deki gri fazın mavi okla işaretlenmiştir [21]. **17**

Şekil 2. 7 İncelenen alaşımların mikro yapıları: (a) AZ91, (b) AZ91-%0,5Ce, (c) AZ91-%1Ce, (d) AZ91-%1,5Ce, (e) AZ91-%1Nd, (f) AZ91-%1Y [22]. **18**

Şekil 2. 8 Farklı Ce katkılı AZ91D alaşımlarının mikro yapıları: (a) AZ91, (b) %1Ce, (c) %2Ce [23]. **19**

Şekil 2. 9 Optik mikroskop görüntüleri. (a) AZ91, (b) AZ91-0,8Ce, (c) AZ91-0,8Ce-0,2Ca ve (d) AZ91-0,8Ce-0,2Sr [15]. **21**

Şekil 2. 10 Farklı Ce katkılı AZ91 alaşımlarının mikro yapıları: (a) AZ91, (b) %0,5Ce, (c) %1Ce [26]. **23**

Şekil 3. 1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesi [27]. **26**

Şekil 3. 2 Vakumlu soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinası [27]. **26**

Şekil 3. 3 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi [27]. **27**

Şekil 3. 4 Sıcak kamaralı döküm makinası [27]. **28**

Şekil 3. 5 Sıcak kamaralı döküm prosesinin çevrimi [27]. **29**

Şekil 4. 1 Menteşeli bir kokil kalıp örneği [12]. **31**

Şekil 5. 1 Spektrometre cihazı. **33**

Şekil 5. 2 Zımpara parlatma cihazı. **34**

Şekil 5. 3 Sertlik ölçüm cihazı. **35**

Şekil 5. 4 Çekme deneyi numunesi. **36**

Şekil 5. 5 Çekme testi cihazı ve uygulama örneği. **36**

Şekil 5. 6 Çentik darbe deneyi numunesi. **37**

Şekil 5. 7 Çentik darbe deneyi cihazı. **37**

Şekil 6. 1 AZ91D ve AZ91D'ye farklı oranlarda Sr içeriği ile XRD analizi **38**

Şekil 6. 2 a) α-Mg Piki, b) AZ91D alaşımında Sr ilavesi ile oluşan α-Mg fazının yakın görüntüsü. **39**

Şekil 6. 3 a) AZ91 alaşımın, b) AZ91+0,1Sr alaşımın, c) AZ91+0,2Sr alaşımın optik görüntüsü. **40**

Şekil 6. 4 Araştırılan alaşımların mikroyapısının SEM BS görüntüleri: a) AZ91D, b) AZ91D-0,1Sr, c) AZ91D-0,2Sr **41**

Şekil 6. 5 AZ91D alaşımı EDS görüntüleri. **42**

Şekil 6. 6 AZ91D+0,1 Sr alaşımı EDS görüntüleri. **43**

Şekil 6. 7 AZ91D+0,2 Sr alaşımı EDS görüntüleri. **44**

Şekil 6. 8 AZ91D + 0,2 Sr alaşımı haritalama görüntüsü. **46**

Şekil 6. 9 Stronsiyum miktarının çekme dayanımına etkisi. **48**

Şekil 6. 10 Stronsiyum miktarının çekme dayanımına etkisi. **49**

Şekil 6. 11 Stronsiyum miktarının sertliğe ve darbe tokluğuna etkisi **51**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Magnezyum elementinin saf haldeki fiziksel özellikleri [1]. **3**

Tablo 2. 2 Magnezyum ve Alüminyumun saf haldeki fiziksel özelliklerin karşılaştırılması [1]. **4**

Tablo 2. 3 Mg metalinin mekanik özellikleri [1]. **6**

Tablo 2. 4 ASTM standardına göre Magnezyum Alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimi [4]. **10**

Tablo 2. 5 Katı fazlar ve sembolleri [19]. **12**

Tablo 2. 6 AZ91 serisi Mg alaşımına RE ve Sr ilavesinin etkileri [21]. **16**

Tablo 2. 7 AZ91 serisi Mg alaşımına nadir toprak elementlerinin ilvasinin etkileri [22]. **18**

Tablo 2. 8 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce elementlerinin ilavesinin etkileri [23]. **19**

Tablo 2. 9 AZ91 serisi Mg alaşımına Sr elementlerinin ilavesinin etkileri [24]. **20**

Tablo 2. 10 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce, Ca ve Sr ilavelerinin tane boyutuna etkileri [15]. **20**

Tablo 2. 11 AZ91 serisi Mg alaşımına Sr ve Ti ilavelerinin tane boyutuna etkileri [25]. **22**

Tablo 2. 12 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce ilavelerinin tane boyutuna ve mekanik değerlere etkileri [26]. **23**

Tablo 5. 1 Kimyasal analiz sonuçları (%ağırlıkça). **33**

Tablo 6. 1 Çekme testi ortalama değerler. **48**

Tablo 6. 2 Sertlik değerlenin ortalaması. **50**

Tablo 6. 3 Çentik darbe testi ortalama değerler. **50**

ÖZET

AZ91D Magnezyum Alaşımının Endüstriyel Ölçekte Üretiminde Alaşım Modifikasyonu

Yusuf TURAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Rıdvan GECÜ

Eş-Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Ali Serdar VANLI

Elektrikli taşıtlara olan artan talep ve Türkiye'de savunma ile havacılık endüstrilerinin hafif malzemelere duyduğu ilginin artması, magnezyum alaşımlarını önemli bir malzeme haline getirmektedir. Ayrıca, magnezyum alaşımlarının yüksek işlenebilirlik, dökülebilirlik ve düşük yoğunluk gibi avantajları, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca sebeplerindendir.

Araçlarda yakıt tasarrufu, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir konu olmuştur. Bu bağlamda, yakıt verimliliğinin artırılması için hafif malzemelerin seçilmesi ön plana çıkmaktadır. Hafiflik açısından magnezyum, düşük yoğunluğu ile tercih edilen bir metal olup, bu özellikleri sayesinde taşıma sektöründe önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, saf magnezyum, istenilen mekanik özellikleri sağlamada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli üretim yöntemleri ve alaşımlama teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını doğrudan etkilediğinden, doğru alaşım elementlerinin seçimi ve üretim sürecinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, AZ91D magnezyum alaşımına kokil kalıba döküm yöntemiyle sırasıyla %0,1 ve %0,2 oranlarında stronsiyum ilave edilerek, alaşımların mekanik ve mikroyapısal özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Stronsiyum ilavesi, alaşımın mekanik özelliklerini ve mikroyapısını iyileştirmeyi hedefleyen bir strateji olarak kullanılmış ve bu bağlamda farklı stronsiyum oranlarının alaşım üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Stronsiyum ilavesi ile tane boyutunda belirgin bir küçülme gözlemlenmiştir. Hall-Petch yasasına göre, tane boyutundaki küçülme, malzemedeki tane sınırlarını artırarak dislokasyon hareketlerini engellemektedir, bu da çekme mukavemetinde artışa yol açmaktadır. Stronsiyum ilavesiyle oluşan Al_4Sr fazı, dislokasyon hareketlerini kısıtlayarak sertlikte önemli bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte, Al_4Sr fazının kırılgan özellikleri nedeniyle darbe tokluğunda bir azalma gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, stronsiyum ilavesi ile AZ91D magnezyum alaşımının mekanik dayanımı belirgin bir şekilde artarken, darbe tokluğunda olumsuz bir değişim gözlemlenmiştir. Bu bulgular, magnezyum alaşımlarının mühendislik uygulamalarındaki potansiyelinin artırılması için uygun alaşım elementlerinin ve üretim süreçlerinin optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, magnezyum alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olup, endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve dayanıklı malzeme üretimi için potansiyel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: AZ91D, stronsiyum, kokil döküm, mekanik dayanım

ABSTRACT

Alloy Modification in Industrial Scale Production of AZ91D Magnesium Alloy

Yusuf TURAN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master of Science

Supervisor: Assoc.Prof. Dr. Rıdvan GECÜ

Co-supervisor: Assist.Prof. Dr. Öğretim Üyesi Ali Serdar VANLI

The increasing demand for electric vehicles and the growing interest in lightweight materials in Turkey's defense and aerospace industries are making magnesium alloys an important material. Additionally, the advantages of magnesium alloys, such as high machinability, castability, and low density, are primary reasons for their preference in industrial applications.

Fuel efficiency has become a critical issue in terms of environmental and economic sustainability in vehicles. In this context, the selection of lightweight materials is emphasized to improve fuel efficiency. Magnesium, with its low density, is a preferred metal due to its lightness, playing a significant role in the transportation sector. However, pure magnesium fails to provide the desired mechanical properties. Therefore, various production methods and alloying techniques are employed to enhance the mechanical properties. These methods are crucial as they directly affect the mechanical properties and microstructure of magnesium alloys, making the selection of the right alloying elements and the optimization of the production process highly important.

In this study, AZ91D magnesium alloy was modified by adding strontium in amounts of 0.1% and 0.2% through the gravity casting method, and the mechanical

and microstructural properties of the alloys were examined in detail. Strontium addition was used as a strategy to improve the alloy's mechanical properties and microstructure, and the effects of different strontium contents on the alloy were thoroughly investigated. A significant reduction in grain size was observed with the addition of strontium. According to the Hall-Petch law, the reduction in grain size increases the grain boundary density, hindering dislocation movement, which leads to an increase in tensile strength. The Al_4Sr phase formed by strontium addition restricted dislocation movement and resulted in a significant increase in hardness. However, due to the brittle nature of the Al_4Sr phase, a decrease in impact toughness was observed.

As a result, while the mechanical strength of the AZ91D magnesium alloy increased significantly with the addition of strontium, a negative change in impact toughness was observed. These findings suggest that the potential of magnesium alloys in engineering applications can be enhanced by optimizing the selection of appropriate alloying elements and production processes. This study represents an important step in the development of magnesium alloys' properties, offering the potential for more efficient and durable material production in industrial applications.

Keywords: AZ91D, strontium, gravity casting, mechanical strength

1
GİRİŞ

Magnezyum, yapı malzemesi olarak bilinen en hafif metal olarak kabul edilmektedir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda kullanımı istenilen düzeyde değildir. Bunun başlıca sebeplerinden biri, mekanik özelliklerinin yeterli seviyeye ulaşmamasıdır [1]. Elektrikli araçlar, uçak ve uzay sanayii gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde, mukavemet/ağırlık ve mukavemet/yoğunluk oranlarının kritik olduğu uygulamalarda magnezyum alaşımlarının geliştirilmesine yönelik önemli ve sürekli araştırmalar yapılmaktadır. Bu sektörlerde, yalnızca hafiflik değil, aynı zamanda yüksek sıcaklık koşullarında mekanik özelliklerini stabil bir şekilde koruyabilen malzemelere de büyük bir ihtiyaç vardır. Bu gereksinimleri karşılamak adına, magnezyum alaşımları üzerine yapılan çalışmalar, malzemelerin yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığını artırmaya yönelik çeşitli iyileştirme ve geliştirme süreçlerini kapsamaktadır. Geliştirilen yeni alaşımlar, bu endüstrilerdeki verimlilik ve dayanıklılık taleplerine yanıt verirken, aynı zamanda daha çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

Magnezyum, hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısına sahip olduğu için, bazı döküm süreçlerinde kusurların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, magnezyum alaşımlarının alüminyum alaşımları kadar detaylı ve kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Alüminyum, hafifliği, yüksek dökülebilirliği ve mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle genellikle magnezyumla alaşım yapmak için tercih edilen bir metaldir. Ayrıca, magnezyumun geniş bir kullanım alanına sahip olmasının bir diğer önemli nedeni, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, düşük yoğunluğunun sunduğu avantajlar ve yüksek performans özellikleridir. Bu özellikler, magnezyumu hafif malzemeler ve enerji verimliliği gerektiren endüstrilerde vazgeçilmez kılar. Saf magnezyum, magnezit, bişofit, dolomit ve deniz suyu gibi cevherlerin kimyasal ve fiziksel işlemlerle metal formuna dönüştürülmesiyle elde edilir ve genellikle "ikincil magnezyum" olarak adlandırılır.

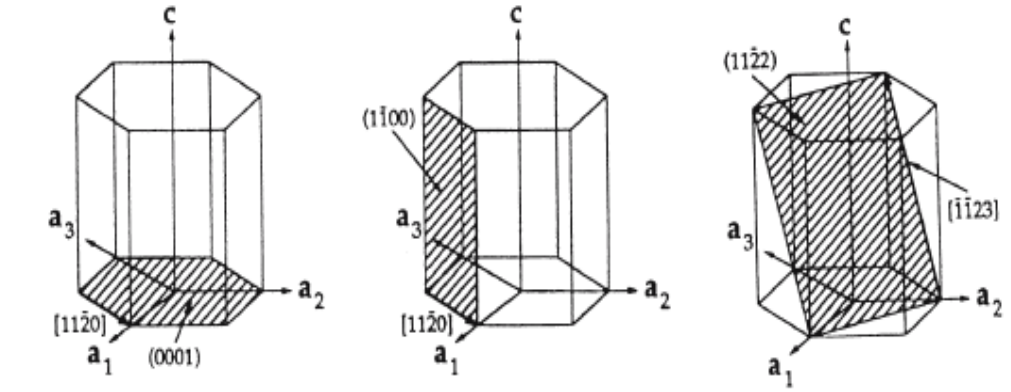
2
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1 Magnezyumun Tarihçesi ve Genel Özellikleri

Küresel anlamda elektrikli taşıtlarda artan talepler, ülkemizde savunma ve havacılık endüstrisinin hafif malzemelere artan ilgisi ve talebi gibi sebepler neticesinde magnezyum alaşımları büyük önem kazanmıştır. Yapılan çalışmalarda magnezyum 1.77 g/cm³ oldukça düşük yoğunluğu ile çelikten, %75'e yakın, alüminyum elementinden %33 daha hafif olması sebebiyle endüstride yoğun kullanım alanları vadetmektedir. Bu özellikleri de yakıt tüketimini azaltmakla birlikte parça sevkiyatının da diğer metallere göre daha düşük maliyetlerde gerçekleşmesini beraberinde getirmektedir [2]. Mg elementinin ilk keşfi 1755 yılında Joseph Black tarafından keşfedilmiş olup Sir Humphrey Davey tarafından 1808 yılında ilk saflaştırma işlemi uygulanmıştır. Doğada sık bulunan elementlerden birisi olan Mg yerkabuğunun %2'sini oluşturmaktadır. Magnezyum Mg sembolü ile gösterilmektedir. Atom numarası 12, elektronları $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ gibi dizilmiştir. 24,3050 g/mol atom ağırlığına sahiptir. Atom hacmi 14,0 cm^3/mol dür. 25 °C de yapılan deneylerde kafes parametre hesabı a=0,3202 nm ve c=0,52105 nm olup c/a oranı 1,627 hesaplanarak olması gereken (1,633) değerine yakınlığı sebebi ile çok iyi (HSP) yapıya sahip bir metal olarak kabul edilebilir. Kristal yapısı (HSP) hegzagonal sıkı pakettir. Şekil 2.1'de saf Mg metalinin birim hücredeki konum ve düzlemleri gösterilmektedir [2,3].

Yakıt tasarrufu sağlamak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla taşıma sektöründe, özellikle otomobil, uçak ve uzay sanayilerinde kullanılan parçaların ağırlığının minimize edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, magnezyum (Mg) metali, sağladığı olağanüstü fiziksel özellikler ile dikkat çekmektedir. Magnezyum, plastiğin hafifliğiyle karşılaştırılabilecek kadar düşük bir yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra, yüksek mekanik özellikler ve dayanıklılık sunarak endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu benzersiz özellikler, magnezyumu

otomobil parçaları, uçak gövdeleri ve uzay araçları gibi yüksek performans gereksinimlerine sahip yapıların üretiminde son derece cazip bir seçenek haline getirmektedir. Magnezyumun düşük yoğunluğu, taşıma sektöründe daha verimli yakıt kullanımını mümkün kılarken, yüksek mekanik dayanıklılığı ve sertliği, güvenlik, uzun ömür ve yapı dayanıklılığı açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, magnezyumun bu özellikleri, modern mühendislik tasarımlarında kritik bir rol oynamaktadır, çünkü hem taşıma maliyetlerini azaltmakta hem de yapıların mekanik performansını artırarak daha dayanıklı ve sağlam hale gelmelerine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, magnezyum alaşımlarının kullanımı, hafifletme, verimlilik ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından önemlidir..



Şekil 2. 1 Saf Mg metal kafesindeki düzlem ve yönler [1].

Her ne kadar magnezyum elementi hafiflik ve buharlaşma yönünden plastiklere benzemesi de mekanik özellikler bakımından metallere benzemektedir. Saf magnezyum metalinin fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2. 1 Magnezyum elementinin saf haldeki fiziksel özellikleri [1].

Özellikler	**Değerler**
Kaynama Sıcaklığı (°C)	**1107**
Buharlaşma Gizli Isısı (MJ/kg)	**5,25**

Tablo 2. 1 Magnezyum elementinin saf haldeki fiziksel özellikleri [1]. (devamı)

Özellikler	Değerler
Elektriksel Direnci 20°C'de (Ω)	**4,45**
Isıl İletkenliği 25°C'de (W/(kgK))	**155**
Yoğunluk (g/cm³)	**1,739**
Katılaşma Esnasındaki Hacmin Değişim Oranı (%)	**4,5**
Isıl Genleşme 25°C'de (µm/(m·K))	**24.8**
Ergime Sıcaklığı (°C)	**650**

Magnezyumun metaller arasından hafifliği bakımından en büyük rakibi alüminyumdur. Magnezyum metali, alüminyum ile karşılaştırıldığında yakın özellikler gösterse de yoğunluğunun daha düşük olması gibi üstün fiziksek özelliklere sahip bir metaldir. Tablo 2.2'de magnezyum ve alüminyum metalinin saf haldeki fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 2. 2 Magnezyum ve Alüminyumun saf haldeki fiziksel özelliklerin karşılaştırılması [1].

Özellikler	Magnezyum	Alüminyum
Atom ağırlığı	**24,3**	**26,98**
Kafes tipi	**SDH**	**YMK**
Kaynama noktası (°C)	**1103 ± 8**	**2447**

Tablo 2. 2 Magnezyum ve Alüminyumun saf haldeki fiziksel özelliklerin karşılaştırılması [1]. (devamı)

Özellikler	Magnezyum	Alüminyum
Termal iletkenlik (W/m.K)	**154**	**222**
Hacimsel ısı kapasitesi ($J/m^3.K$)	**1783**	**2430**
Elastite modülü (10^3 MPa)	**45**	**69,6**
Ergime noktası (°C)	**650**	**659**
Atom numarası	**12**	**13**
Yoğunluk (g/cm^3)	**1,738**	**2,699**

2.2 Magnezyum Alaşımlarının Özellikleri

Magnezyum metalinin mekanik davranışlarının iyileştirilmesi adına alaşımlandırma girişimi ilk kez 1930 yılında Almanya tarafından gerçekleşmiştir. Magnezyum alaşımının işlenebilirliğinin çok iyi olması gibi birçok avantajı varken tam olarak istenen mekanik özelliklere ulaşamaması ve maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajları sebebiyle üzerinde çalışılmasını gerektiren bir durum ortaya çıkarmıştır. Magnezyumun avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [4].

2.2.1 Magnezyumun Avantajları

- Metaller arasından yoğunluğu en düşük olanıdır.
- Erişilmesi kolaydır.
- İşlemesi kolaydır.
- Kolay dökülmektedir.
- Korozyon dayanımı yüksektir.

2.2.2 Magnezyumun Dezavantajları

- Düşük elastisite modülüne sahiptir.

- Mukavemet direnci sınırlıdır
- Katılaşma sırasında çekme oranının yüksek olması
- Korozyon direncinin düşük olması

Magnezyum metalinin mekanik özellikleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2. 3 Mg metalinin mekanik özellikleri [1].

	Birim	**Kum Kalıba Döküm**	**Ekstrüzyon Çekme**	**Haddelenmiş Levha**	**Tavlanış Levha**
Çekme Mukavemeti	**MPa**	**90**	**165-205**	**180-220**	**160-195**
Çekme Akma mukavemeti	**MPa**	**21**	**69-105**	**115-140**	**90-105**
Brinell HB Sertlik	**500 kp/10 mm**	**30**	**35**	**45-47**	**40-41**
% Uzama Oranı	**-**	**2-6**	**5-8**	**2-10**	**3-15**
Basma Akma Mukavemeti	**MPa**	**21**	**34-55**	**105-115**	**69-83**

Mg metali bir element ile alaşım oluşturabilmesi için o elementin HSP kafes yapısına sahip olması ve atom çapları arasındaki fark ±%15 olmalıdır [4].

Magnezyum alaşımları çeşitli uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Bu alanlar kendi içerisinde yapısal ve yapısal olmayan olarak iki kısma ayrılmaktadır. Yapısal uygulamalar uçak ve uzay sanayi parçalarını, elektrikli araçları, makine imalat sektörünü kapsamaktadır. Çeşitli uygulamalarda ise alaşımlama elementi olarak, genellikle oksijen tutucu olarak ve titanyum, zirkonyum ve uranyum üretiminde indirgeyici eleman olarak kullanılmaktadır [5].

2.3 Magnezyum Alaşımlarına Etki Eden Alaşım Elementleri

Alaşım elementlerinin (alüminyum, silisyum, çinko, bakır, mangan, stronsiyum, seryum, bor ve demir ve toprak alkali elementler (RE) gibi elementlerin magnezyum alaşımlarına etkisi bulunmaktadır. Elementlerin etkileri aşağıda özetlenmiştir.

2.3.1 Alüminyum

En çok kullanılan alaşım elementi alüminyumdur. Dökülebilirliği artırmakla birlikte alaşımın sertlik değerini de artırır, süneklilik ve darbe dayanımını azaltmaktadır. Ağırlıkça %6'nın üzerine çıkan alüminyum elementi alaşıma ilave edilmesi durumunda ısıl işlem kabiliyetini artmaktadır. Mg ile reaksiyona girerek $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği oluşturur ve 120°C sıcaklıklarda alaşımın dayanımını artırmaktadır [6].

2.3.2 Silisyum

Alaşımın yüksek sıcaklıklara dayanımını artırmak için silisyum elementi ilave edilmektedir. Demir elementinin bulunduğu alaşıma silisyum ilavesi sonucunda ise alaşımın korozyon direncini düşürmesi gibi dezavantaj oluşturmaktadır [7,8].

2.3.3 Çinko

Alaşımın mukavemet değerlerini artırmaktadır. En fazla alaşıma katılan elementlerden birisidir. Genellikle Al elementi ile alaşıma katılır. Dökülebilirliği zorlaştıran Ni ve Fe elementlerinin etkisini azaltarak avantaj sağlar [6].

2.3.4 Bakır

Alaşımın dökülebilirliğini iyileştirdiği gibi %0,05'i geçtiğinde korozyon direnci azalmaktadır. Alaşımın sıcaklık direncini iyileştirmektedir [9].

2.3.5 Mangan

Demir elementinin zararlı etkilerini azaltmak için alaşıma mangan elementi eklenmektedir [6]. Alaşımda %1,5 oranını geçmez. Korozyona karşı dayanımı ve akma dayanımını artırır [9].

2.3.6 Stronsiyum

Mg alaşımlarında tane inceltici olarak görev yapmaktadır. RE (toprak alkali metaller) elemanlarına benzer özellikler daha düşük maliyetle elde edilir [10]. Mekanik özellikleri ve korozyon direncini artırmak için magnezyum alaşımına ilave edilmektedir [8]. Stronsiyum elementi Sr sembolü ile gösterilmektedir. Atom numarası 38'dir. 2,6 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Hegzagonal kristal yapıda bir elementtir. Elementin ilk keşfi 1790 yılında Adair Crawford ve William Cruickshank tarafından ilk başta havada taşınan barit (baryum karbonat ile) olduğu düşünülse de İskoçya minarelinden oluşan bir Strontian'ı incelediklerinde keşfedildi. Stronsiyum genellikle havacılık, otomotiv, uçak ve uzay sanayinde kullanılan dökümlerin mukavemetini ve sünekliliğini artırmak için magnezyum ve alüminyum alaşımlarına ilave edilmektedir. 2A grubu olup toprak alkali bir metaldir [11]. Stronsiyumun magnezyum alaşımlarında gözeneklerin dağılmasına etkisi bulunmaktadır ve mikro gözenekleri dağıtmada etkisi büyüktür. %0,02 ile %3 arasında alaşıma katılabilir ve 675-700°C'de dökülebilmektedir. Magnezyumun mikroyapısında tane inceltici özelliği bulunmaktadır [12].

2.3.7 Seryum

Mg alaşımının sünekliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Alaşımda tane boyutlarının iyileşmesinde rol oynamaktadır. Tane sınırlarında oluşan $Mg_{12}Ce$ tane büyümesini engeller. Bu durum da mekanik özelliklerin iyileşmesinde önemli rol oynamaktadır [13]. Tane büyümesini engelleyerek tane sınırlarında oluşan kaba $Mg_{12}Ce$ yüksek sıcaklık fazı olumlu etkilerinin yanı sıra çatlak oluşumuna ve kopmalara sebep olma gibi olumsuz yönleri de mevcuttur [14]. Yapılan deneysel çalışmada 107µ tane boyutuna sahip AZ91 alaşımına %0,8 Ce katkısıyla tane boyutu 37µ mertebesine kadar düşürülmüştür [15].

2.3.8 Bor

Al, içeren Mg alaşımlarında bor elementi ucuz ve etkili bir tane incelticidir. Magnezyum alaşımına bor ilavesi ile tanelerin incelmesinde ve incelmeye bağlı olarak mekanik dayanımının artırılmasında etkisi gözlenmiştir. Tanelerdeki incelme AlB_2 varlığından kaynaklanmaktadır [16].

2.3.9 Demir

Magnezyum alaşımlarında demir, korozyon özelliklerini azaltmaktadır. Bu sebeple ağırlıkça %0,005'i geçmemelidir [4].

2.3.10 Toprak Alkali Metaller

Magnezyum alaşımlarından yapılan dökümlerin belirli gereksinimleri vardır, bunlardan biri de düşük maliyetli olmalarıdır. Toprak alkali elementlerin maliyeti genellikle düşüktür. Bu elementler, magnezyum alaşımlarının oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda katı eriyik ve çökelme sertleşmesini sağlar. Ayrıca, ısı direncini artırarak mekanik özellikleri geliştirir, dökülebilirliği artırır ve mikro porozitenin azalmasına yardımcı olur [17].

2.4 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Magnezyum alaşımları, döküm ve dövme alaşımları olarak iki ana sınıfta incelenmektedir. Döküm alaşımları, basınçlı döküm, kum kalıba döküm ve kalıcı kalıba döküm gibi alt kategorilere ayrılabilir. Dövme alaşımları ise, sac, levha ve ekstrüzyon gibi farklı işleme yöntemleriyle sınıflandırılmaktadır. Alaşım bileşenlerinin daha iyi anlaşılması için AZ91 alaşımı örnek olarak verilebilir. Bu alaşımda, "A" harfi alüminyum elementini, "Z" harfi ise çinko elementini temsil etmektedir. "9" sayısı, alaşımda bulunan alüminyum oranının ağırlıkça %9 olduğunu, "1" sayısı ise çinko oranının ağırlıkça %1 olduğunu göstermektedir. Tablo 2.4'te, ASTM standardına göre magnezyum alaşımlarının alaşım bileşenleri ve menevişleme gösterimi yer almaktadır [4].

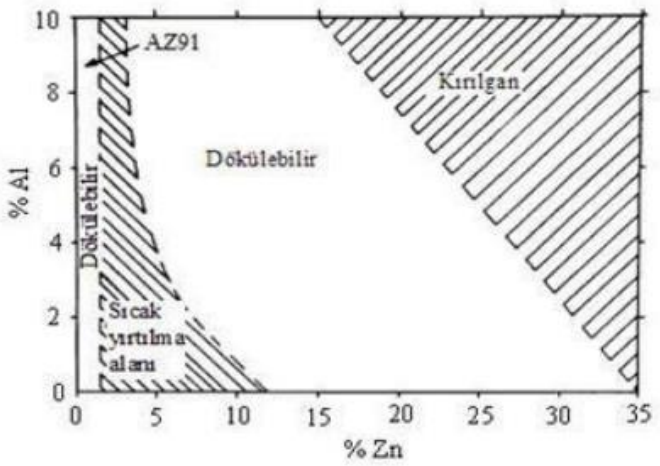
Tablo 2. 4 ASTM standardına göre Magnezyum Alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimi [4].

Birinci Bölge	İkinci bölge	Üçüncü Bölge	Dördüncü Bölge
Alaşım elementlerini ifade eder	**Alaşım elementlerinin oranlarını belirtir**	**Alaşım elementlerinin bileşimini belirten harflerdir**	**Isıl işlem (Menevişleme) şartlarını belirtir.**
Birinci Bölge	**İkinci bölge**	**Üçüncü Bölge**	**Dördüncü Bölge**
Yüzde ağırlıkça azalan iki ana alaşım elementini belirtir	**Alaşım elementinin yuvarlatılmış yüzdelerini gösteren iki rakamdan meydana gelmiştir**	**Alfabetik harften oluşan ASTM standart değeridir (I ve O hariç)** **A: Birinci bileşim** **B: İkinci bileşim** **C: Üçüncü bileşim** **D: Yüksek saflıkta (HP)** **E: Yüksek korozyon direnci**	**Bir harfi izleyen bir numaradan meydana gelir (üçüncü kısımdan tire işaretiyle ayrılmıştır)**

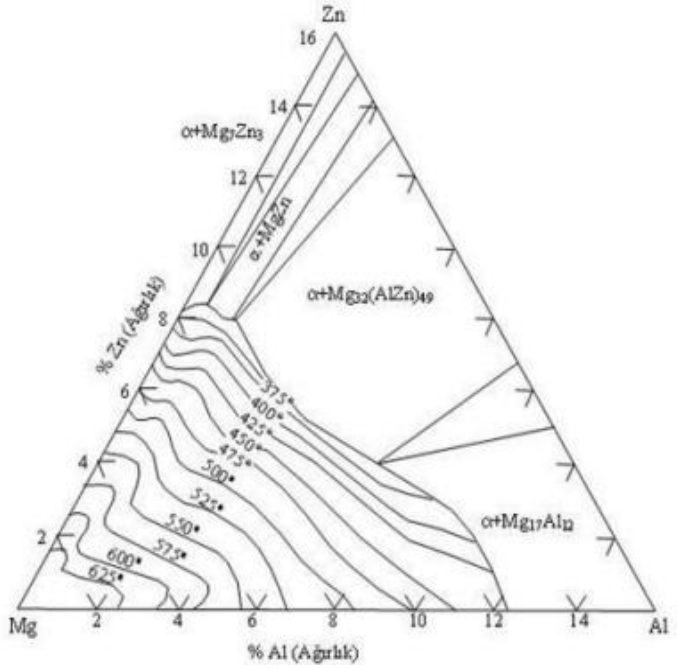
2.5 AZ91(Mg-Al-Zn) Alaşımları

Magnezyum alaşımları arasında, özellikle Mg-Al-Zn üçlü alaşımı, endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu alaşım, hafifliği, yüksek dayanıklılığı ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve diğer mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Mg-Al-Zn döküm sistemi, çinko

oranına bağlı olarak dört farklı bölgeden oluşmaktadır: düşük çinkoda dökülebilir bölge, sıcak yırtılma bölgesi, yüksek çinkoda dökülebilir bölge ve kırılgan bölge. Bu dört bölge, alaşımın döküm ve katılaşma süreçlerinde farklı termal ve mekanik özellikler sergileyerek, malzemenin nihai mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve kullanım alanını belirlemektedir. Bu bölgelerin her biri, alaşımın davranışını ve performansını etkileyen kritik faktörler olup, şematik gösterimi Şekil 2.2'de sunulmuştur.



Şekil 2. 2 Mg-Al-Zn alaşımının dökülebilirlik oransal dağılımı [19].



Şekil 2. 3 AZ91 üçlü faz diyagramı [19].

AZ91 alaşımının üçlü faz diyagramı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Alüminyumca zengin bölge incelendiğinde, MgZn, $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ve $Mg_{17}Al_{12}$ olmak üzere üç temel metalik faz görüntülenmektedir. $Al_2Mg_5Zn_2$ fazı bazı zamanlarda 393°C'den yüksek sıcaklıklarda kaybolabilir. $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ intermetalik fazı 535°C sıcaklıkta oluşur. Aşağıda bu katı fazlar sembolleri ile Tablo 2.5'te gösterilmiştir [19].

Tablo 2. 5 Katı fazlar ve sembolleri [19].

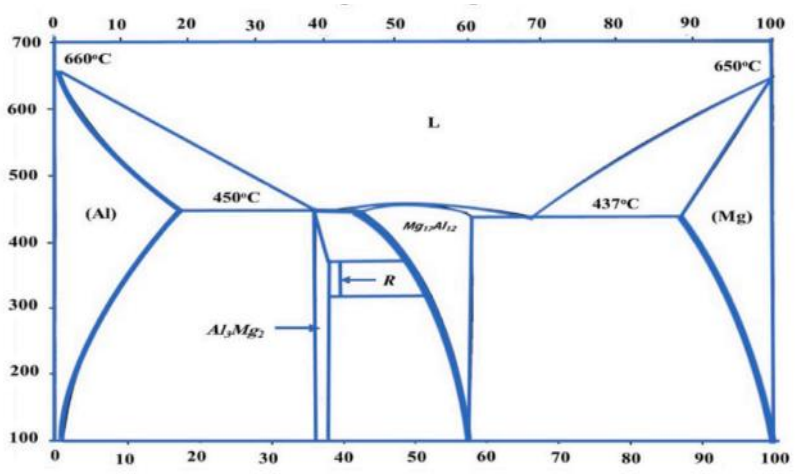
Faz	**Sembol**	**Sıcaklık Aralığı (°C)**	**Faz**	**Sembol**	**Sıcaklık Aralığı (°C)**
(Al)	**-**	**<660.5**	**Mg_7Al_3**	**δ**	**342-325**
(Mg)	**-**	**<650**	**MgZn**	**ε**	**<347**
Zn	**-**	**<419.6**	**Mg_3Al_3**	**ζ**	**<416**
Mg_2Al_3	**β**	**<453**	**$MgZn_2$**	**η**	**<590**
$Mg_{23}Al_{30}$	**x**	**450-428**	**Mg_2Zn_{11}**	**θ**	**<381**
$Mg_{18}Al_{52}$	**y**	**-**	**$Mg_{32}(AlZn)_{49}$**	**τ**	**<535**

Tablo 2. 5 Katı fazlar ve sembolleri [19]. (devamı)

Faz	Sembol	Sıcaklık Aralığı (°C)	Faz	Sembol	Sıcaklık Aralığı (°C)
$Mg_{17}Al_{12}$	ɣ	<460	$Al_2Mg_5Zn_2$	φ	393-?

Mg-Al-Zn alaşım sisteminde sıvı bölgedeki en yüksek sıcaklık alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C'dir. Ötektik reaksiyon sıcaklığı 338°C'dir (sıvı↔ ε+(Mg)+τ). İntermetalik fazlardan en yüksek çözünme sıcaklığına $Mg_{32}(AlZn)_{49}$ (τ) 535°C sıcaklığa sahiptir, $MgZn_2$ (η) 590°C sıcaklığa sahiptir [19].

Alüminyum elementinin düşük maliyetli olması, mukavemetinin yüksek olması ve dökülebilirliğinin iyi olması tercih sebepleri arasında bulunmaktadır. Ağırlıkça %2 ile %9 arasında alüminyum tercih edilmektedir. Alüminyum miktarı %2'nin altında olur ise döküm zorlaşır, %9'un üzerinde olur ise alüminyum sertleşir ve yapı kırılganlaşır. Alüminyumun katı çözünürlüğü en fazla 437°C sıcaklıkta, %12,7 ağırlığında gerçekleşmektedir. Şekil 2.4'te gösterilmiştir [20].



Şekil 2. 4 Magnezyum ve Alüminyum ikili faz diyagramı [20].

Alüminyum miktarı arttıkça dökülebilirlik ve çekme mukavemeti artar. Fakat yüzde uzama ve darbe dayanımı azalmaktadır. İyi dökülebilirlik sağlaması sebebiyle ve

karmaşık parçaların dökümünü kolaylaştırma sebebiyle AZ91 sıklıkla tercih edilmektedir. AM20, AM50 ve AM60 daha çok uzamanın ve darbe enerji emiliminin olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Mg-Al alaşımlarına akışkanlıklarını artırmak, oda sıcaklığındaki dayanımlarını artırmak, demir ve nikelin aşındırıcı etkilerini azaltmak için çinko eklenmektedir. Ancak yüksek miktarda çinko kullanıldığında sıcak çatlama meydana gelmektedir. Ağırlıkça sıcak çatlama meydana gelmektedir. Ağırlıkça %7-10 alüminyum içeren magnezyum alaşımlarına ağırlıkça %1-1,5 çinko eklenmelidir. Demir ve nikel Mg-Al bazlı alaşımların korozyon direncini olumsuz etkilemektedir. Yapılan araştırmalarda AZ91D alaşımı için belirtilen demirin maksimum oranı ağırlıkça %0,005, nikelin %0,002, bakırın ise %0.030 olması gerekmektedir. Genellikle olumsuz korozyon etkilerini azaltmak amacıyla %0,2 ile 0,4 arasında mangan elementi katılmalıdır [20].

2.6 AZ91 Magnezyum Alaşımının Modifikasyonu Üzerine Son Yıllarda Yapılan Çalışmalar

İmalatta kullanılan metaller içerisinde karşılaştırma yapacak olursak magnezyum metali en hafif metaldir. Basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde ekonomik faydalar sağlamaktadır. Çeşitli metallere göre magnezyum alaşımlarının hacimsel özgül ısı düşüklüğü eriğin daha hızlı katılaşması gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra daha yüksek çalışma hızına sahip olmasına ve kalıbın erozyona uğraması gibi durumların daha az olması avantajlarını sağlar. Magnezyumun basınçlı dökümünde ticari olarak dört farklı alaşım sistemi kullanılmaktadır. Bunlar; (AZ) serisi, (AM) serisi, (AS) serisi ve (AE) serisidir. Alüminyum elementinin maliyet açısından uygun olması ve alaşımın özelliklerine yapmış olduğu katkılardan dolayı Mg-Al alaşımı daha fazla tercih edilmektedir. Mg-Al alaşımı 437°C gibi düşük sıcaklıklarda ötektik bölgedeki reaksiyonu göstermektedir. Ötektik bölgedeki reaksiyon L ↔ $Mg_{17}Al_{12}$ + a(Mg) 437°C'de oluşur. Alüminyumun çözünürlüğü ötektik çizgide %12,7 iken sıcaklık azaldıkça alüminyumun çözünürlüğü de azalmaktadır ve %2'den fazla Al içeren magnezyum alaşımlarında mikroyapıda $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği görülmektedir. %8'in üzerinde alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında ise $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği tane sınırları boyunca

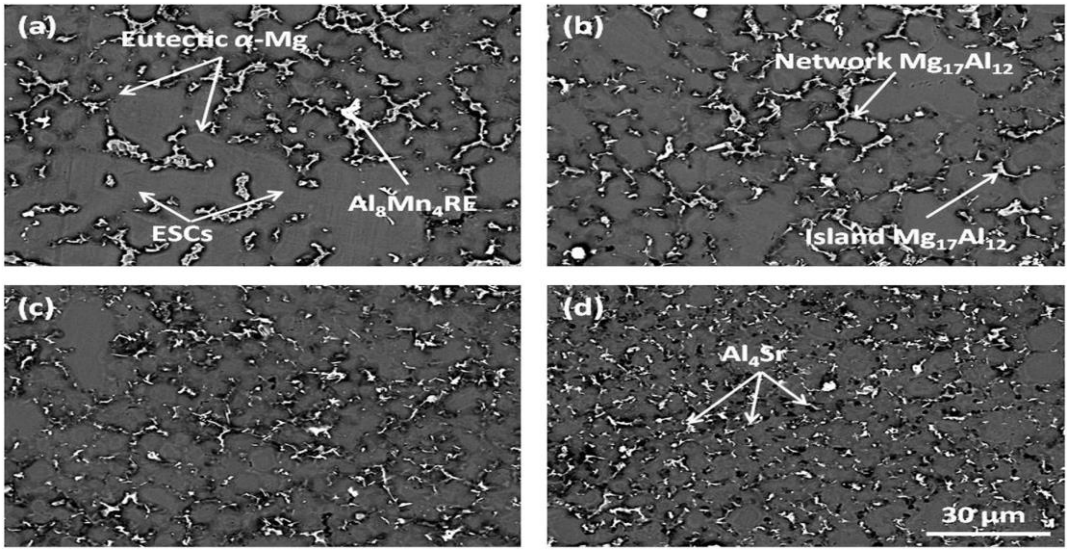
dağılmaktadır ve sünekliliğin azalmasına sebep olmaktadır. 420°C'de çözeltiye alma işlemi ile $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğinin çözünmesiyle katı eriyik sertleşmesi meydana gelir, çekme mukavemeti ve sünekliği artar [18].

Zhang ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmalarda, yüksek basınçlı döküm (YBD) yöntemiyle üretilmiş AZ91-0,5RE alaşımına %0,2, %0,6 ve %1 oranlarında stronsiyum (Sr) ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, YBD yöntemiyle üretilen AZ91-0,5RE bazlı alaşımlara Sr ilavesi yapıldığında mikroyapının iyileştiği ve mekanik özelliklerin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, özellikle Sr içeriği arttıkça mikro yapının daha homojen hale gelmesiyle ilişkilidir. AZ91 alaşımının mekanik özelliklerine dair elde edilen veriler, Tablo 2.6'da detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan SEM-EDS analizlerinde, iç yapıda α-Mg matrisinin yanı sıra, tane sınırlarında uzanan ötektik bileşik β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazı ile birlikte, Sr içeriği %1'e ulaştığında Al_4Sr fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu faz, mikroyapıdaki dayanımı artıran önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, yapılan çalışmalarda, stronsiyum (Sr) ilavesi ile alaşımın mekanik dayanımında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle, %0,2 Sr içeren alaşım, en yüksek mekanik özellikleri sergileyen örnek olarak belirlenmiş ve bu seviyede stronsiyum ilavesinin, alaşımın performansını önemli ölçüde iyileştirdiği ortaya konmuştur. Bu iyileşme, Sr'nin mikroyapı üzerindeki etkileri ile ilişkilidir ve mekanik dayanımda sağlanan artış, daha homojen bir yapının ve daha güçlü tane sınırlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, alaşımın mikroyapısının detaylı bir şekilde incelenmesine imkan sağlayacak şekilde Şekil 2.5'te sunulmuş olup, bunun yanı sıra elementlerin dağılımını gösteren enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analiz sonuçlarına ait görüntüler ise Şekil 2.6'da yer almaktadır. Bu görseller, alaşımın mikro yapısındaki ince değişimleri ve stronsiyum ilavesinin bu değişimler üzerindeki etkilerini derinlemesine gözlemlememize olanak tanımakta, böylece alaşımın yapısal, kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında kapsamlı bir anlayış geliştirmemizi sağlamakta ve malzemenin davranışlarını daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır..

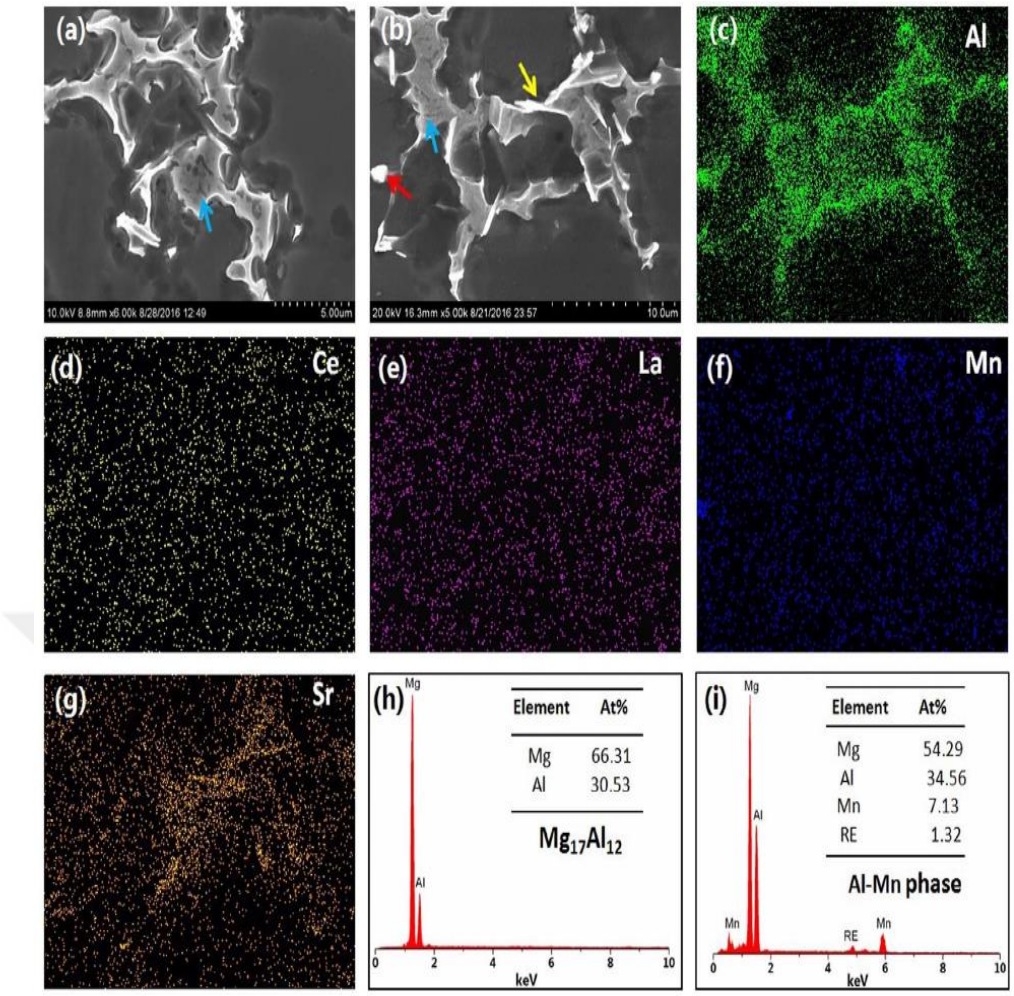
En iyi mekanik özellikleri %0,2 Sr ilavesinin en iyi mekanik özellikler sergilediği görülmüştür [21].

Tablo 2. 6 AZ91 serisi Mg alaşımına RE ve Sr ilavesinin etkileri [21].

Ref.	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Kopma Uzaması (%)
[21]	Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi	AZ91+0,5 RE	208 MPa	149 MPa	4,3%
		%0,2 Sr+0,5 RE	263 MPa	165 MPa	7,6%
		%0,6 Sr+0,5 RE	250 MPa	162 MPa	7,4%
		%1 Sr+0,5 RE	223 MPa	158 MPa	5,7%



Şekil 2. 5 AZ91-RE-xSr alaşımlarının SEM görüntüleri [21].

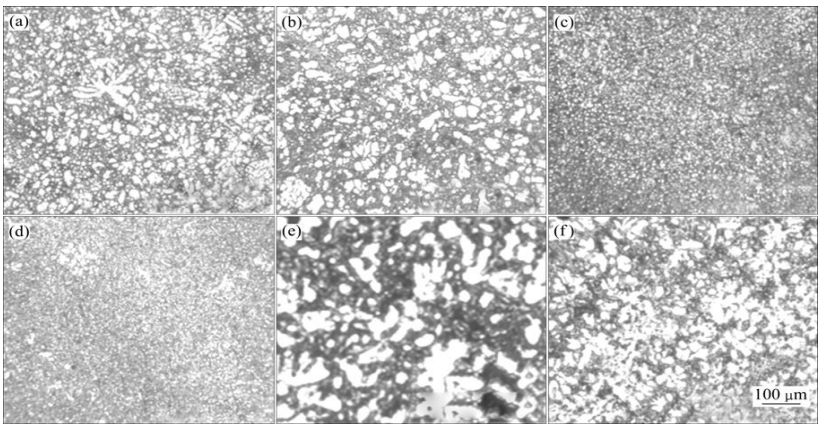


Şekil 2. 6 İkincil aşamaların büyütülmüş SEM morfolojisi. (a) AZ91-0,5RE ve (b) AZ91-0,5RE-1.0Sr alaşımı, (d-g) EDS element haritaları (b), (h) Beyaz bloklu EDS sonuçları (b)'deki kırmızı okla işaretlenmiştir. (i) (b)'deki gri fazın mavi okla işaretlenmiştir [21].

Tong vd. (2010) yapmış oldukları çalışmalarda yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 alaşımına %0,5-1-1,5 Ce, %1 Nd ve %1 Y elementlerinin ilavesinin mikroyapıya ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen değerler Tablo 2.7'de gösterilmiştir. Mekanik değerlerde artış gözlenmiştir. Nd ve Y elementlerinin ilavesi ile tanelerde incelmeye sebep olurken, Ce elementinin ilavesi incelmiş tanelerin küreselleştirerek modifikasyonu sağlanmıştır. Şekil 2.7'de optik mikroskop görüntüsü verilmiştir [22].

Tablo 2. 7 AZ91 serisi Mg alaşımına nadir toprak elementlerinin ilvasinin etkileri [22].

Ref.	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
[22]	Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi	AZ91	220 MPa	163 MPa
		%0,5 Ce	238 MPa	172 MPa
		%1 Ce	235 MPa	174 MPa
		%1,5 Ce	275 MPa	187 MPa
		%1 Nd	264 MPa	182 MPa
		%1 Y	272 MPa	184 MPa



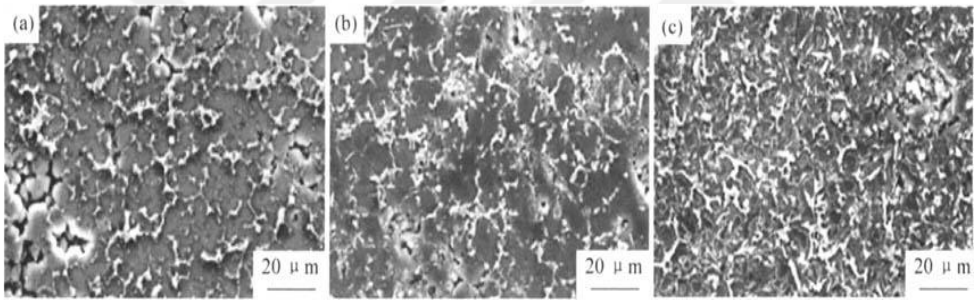
Şekil 2. 7 İncelenen alaşımların mikro yapıları: (a) AZ91, (b) AZ91-%0,5Ce, (c) AZ91-%1Ce, (d) AZ91-%1,5Ce, (e) AZ91-%1Nd, (f) AZ91-%1Y [22].

Yang vd. (2006) yapmış oldukları çalışmalarda yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 alaşımına %1-2 Ce elementlerinin ilavesinin mikroyapıya ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen değerler Tablo 2.8'de

gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kayda değer tane incelmesi ve mekanik dayınım elde edilmiştir. Şekil 2.8'de mikroyapı görüntüleri eklenmiştir [23].

Tablo 2. 8 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce elementlerinin ilavesinin etkileri [23].

Ref.	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
[23]	Yüksek Basınçlı Döküm Yöntemi	AZ91D	210 MPa	136 MPa	5,4%
		%1 Ce	248 MPa	158 MPa	6,8%
		%2 Ce	227 MPa	144 MPa	6,1%



Şekil 2. 8 Farklı Ce katkılı AZ91D alaşımlarının mikro yapıları: (a) AZ91, (b) %1Ce, (c) %2Ce [23].

AZ91D alaşımının mikro yapısı α-Mg matrisi ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazının tane sınırları boyunca çökeldiği şekil (a)'da görülmektedir. Ce elementi eklenmesiyle tane sınırlarında iğnemsi şekilde dentritik yapının oluşumu ise şekil (b) ve şekil (c) 'de görülmektedir. Bu sayede tanede küçülme meydana gelmiştir.

Yine başka bir çalışmada S. Liu vd. (2008) yapmış oldukları çalışmalarda kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 serisi magnezyum alaşımına %0,1-0,2-0,3 Sr ilave ederek kokil kalıba döküm yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir.

S. Liu vd. (2008) yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, Sr elementinin tane incelmede etkisinin olduğu görülmüştür. AZ91 alaşımının elde edilen değerleri Tablo 2.9'da gösterilmiştir [24].

Tablo 2. 9 AZ91 serisi Mg alaşımına Sr elementlerinin ilavesinin etkileri [24].

Referans	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Tane Boyutu (µm)
[24]	**Kokil Döküm**	**AZ91**	**113**
		0,1Sr%	**77**
		0,2Sr%	**67**
		0,3Sr%	**72**

Liu vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada AZ91 serisi Mg alaşımının tane inceltme mekanizmasını incelemek amacıyla AZ91 alaşımına sırasıyla %0,8 Ce, %0,8 Ce+0,2 Ca, %0,8 Ce+0,2 Sr ilave ederek kokil kalıba döküm yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir.

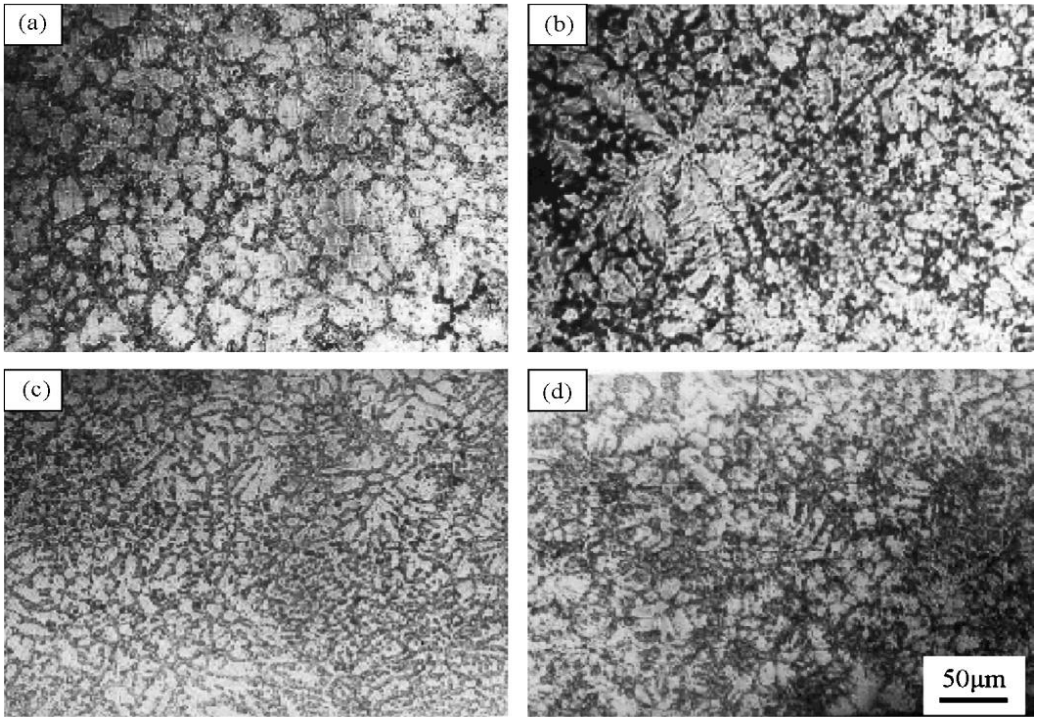
Çalışmalar neticesinde AZ91 alaşımının elde edilen değerler Tablo 2.10'da gösterilmiştir. AZ91-0,8Ce alaşımı dendritik yapıda olduğu ve tane boyutunun oldukça küçülmesine sebep olduğu görülmüştür. AZ91-0,8Ce-0,2Ca alaşımının daha fazla dendritik yapıda ve tekdüz halde olduğu gözlemlenmiştir. AZ91-0,8Ce-0,2Sr alaşımı ile AZ91-0,8Ce-0,2Ca alaşımı benzer özellikler göstermiştir. Ancak tane inceltme etkisinin biraz daha düşük olduğu gözlenmiştir. Alaşımların optik mikroskop görüntüleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir [15].

Tablo 2. 10 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce, Ca ve Sr ilavelerinin tane boyutuna etkileri [15].

Referans	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Tane Boyutu (µm)
[15]	**Kokil Döküm**	**AZ91**	**107**
		%0,8Ce	**36**

Tablo 2. 10 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce, Ca ve Sr ilavelerinin tane boyutuna etkileri [15]. (devamı)

Referans	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Tane Boyutu (µm)
[15]	Kokil Döküm	%0,8Ce+0,2Ca	23
		%0,8Ce+0,2Sr	26



Şekil 2. 9 Optik mikroskop görüntüleri. (a) AZ91, (b) AZ91-0,8Ce, (c) AZ91-0,8Ce-0,2Ca ve (d) AZ91-0,8Ce-0,2Sr [15].

Afsharnaderi vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada AZ91 serisi Mg alaşımının mekanik dayanımı ve mikroyapıya etkilerini incelemek amacıyla AZ91 alaşımına %0,05-0,5-1 Sr, %0,1-0,3-0,5 Ti ilave ederek kokil kalıba döküm yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, AZ91 alaşımının elde edilen değerleri Tablo 2.11'de gösterilmiştir [25]. Sonuçlara göre, ağırlıkça Sr oranı arttıkça, tane boyutunda belirgin bir küçülme gözlemlenmiştir. Ayrıca, Sr ilavesinin alaşımın mikroyapısal homojenliğini artırarak mekanik özelliklerde iyileşmeye yol açtığı tespit edilmiştir.

Tablo 2. 11 AZ91 serisi Mg alaşımına Sr ve Ti ilavelerinin tane boyutuna etkileri [25].

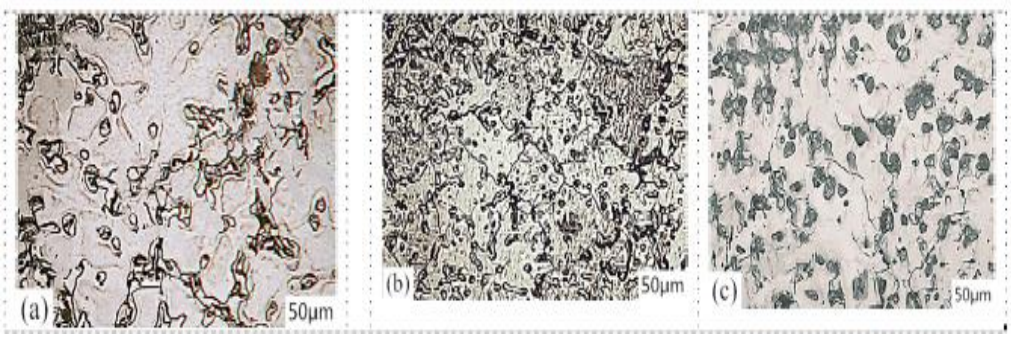
Referans	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Tane Boyutu (µm)
[25]	Kokil Döküm	AZ91	121
		0,05 Sr %	112
		0,5 Sr %	57
		1 Sr %	43
		0,1 Ti %	53
		0,3 Ti %	57
		0,5 Ti %	60

Feng vd. (2021), yapmış oldukları kapsamlı çalışmalar neticesinde, %0,5 Ce (serium) elementinin AZ91 alaşımına eklenmesinin, tane boyutunun en ideal seviyeye ulaşmasını sağladığını ve mekanik değerlerin de en yüksek seviyelere çıkarak büyük bir iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu optimizasyonun, Ce elementinin alaşımdaki kristal büyümesini kontrol etme yeteneği ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Ce'nin bu miktarı, alaşımın mikro yapısını dengeleyerek, daha homojen ve daha güçlü bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, Ce miktarının %0,5'i geçtiğinde, tane boyutunda belirgin bir büyüme yaşanmış ve bu büyüme mekanik değerlerde anlamlı bir düşüşe neden olmuştur. Bu gözlemler, Ce elementinin daha yüksek oranlarda ilavesinin, alaşımın yapısal bütünlüğünü ve mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir. AZ91 alaşımına ilave edilen farklı Ce miktarlarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri ve tane boyutundaki değişiklikler, detaylı bir şekilde

Tablo 2.12'de sunulmuş olup, mikroyapısal değişiklikler ise Şekil 2.10'da görsel olarak gösterilmiştir [26]. Elde edilen bu bulgular, Ce elementinin alaşım özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve belirli bir oranı aşmaması gerektiğini ortaya koymakta ve Ce ilavesinin optimum seviyelerle sınırlı tutulması gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 2. 12 AZ91 serisi Mg alaşımına Ce ilavelerinin tane boyutuna ve mekanik değerlere etkileri [26].

Ref.	Üretim Yöntemi	Alaşım Elementi	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Tane Boyutu (µm)
[26]	kokil	AZ91	130 MPa	90 MPa	125
		% 0,3 Ce	145 MPa	98 MPa	65
		% 0,5 Ce	168 MPa	115 MPa	37
		% 0,7 Ce	138 MPa	120 MPa	46
		% 1 Ce	145 MPa	109 MPa	54



Şekil 2. 10 Farklı Ce katkılı AZ91 alaşımlarının mikro yapıları: (a) AZ91, (b) %0,5Ce, (c) %1Ce [26].

3
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ

3.1 Giriş

Parça adetinin yüksek oranda dökülmesi, yüzey kalitesinin yüksek olması ve kalıp ömrünün uzun olması gibi avantajların araştırılması sonucu yüksek basınçlı döküm yöntemi ortaya çıkmıştır. 1849 yılında Sturges, 1852 yılında Barr, 1856 yılında Helize ve 1877 yılında ise patent çalışması Dusanbury tarafından geliştirilen el tipi döküm makinaları ile yapılmış ve alınmıştır. Daha sonrasında Ottmar Mergenthaler tarafından Linotip makinesini geliştirmiştir. Bu makinenin çalışma prensibi, ergimiş metalin kovan içerisine akmasıyla bir piston vasıtasıyla kalıp içerisine enjekte edilmekteydi. İlk yüksek basınçlı döküm makinesinin patenti H.H. Doehler tarafından alınmıştır. Mergenthaler'in Linotip makinesinin çalışma prensibine dayanan bir tasarım ile ilk basınçlı döküm makinesi yapılmıştır. İlk deneme kurşun ve kalay alaşımlarının dökümü olmuştur. Ardından çinko alaşımları dökülmüştür. 1915 yılında Doehler Pres Döküm Şirketi, ilk defa alüminyum alaşımları dökümü gerçekleştirmiştir. Alüminyumun basınçlı döküm yöntemi metal işleme yöntemlerinden en önemli yöntemlerden biridir. Magnezyumun alüminyum ile alaşımları üzerinde gelişmeler oldukça kayda değerdir [27]. Geçtiğimiz yaklaşık 40 yıl içerisinde enjeksiyon döküm yöntemi üzerinde büyük gelişmeler olmuştur.

Basınçlı döküm yöntemiyle genel olarak alüminyum, çinko, magnezyum ve bakır bazlı alaşımlar dökülebilmektedir [28].

Basınçlı dökümün avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır;

3.1.1 Basınçlı Dökümün Avantajları

- Karmaşık şekilli parçaların dökümü için uygundur.
- Üretim adeti diğer üretim yöntemlerine göre fazladır

- Yolluk ve çıkıcılar hariç diğer yüzeylerin işlemeye ihtiyaç duymayacak şekilde yüzey kalitesi iyidir.
- Basınçlı dökümde üretilen parçaların mekanik özellikleri oldukça yüksektir.

3.1.2 Basınçlı Dökümün Dezavantajları

- Parça boyutu sınırlı boyutlarda dökülebilir. Parça ağırlığı maksimum 23 kg'ı geçmez ve genellikle min. 4 kg ağırlığa kadar olan parçaların dökümü mümkündür.
- Basınçlı döküm makineleri oldukça maliyetlidir. Bu sebeple az sayıda parça dökümü ekonomik değildir.

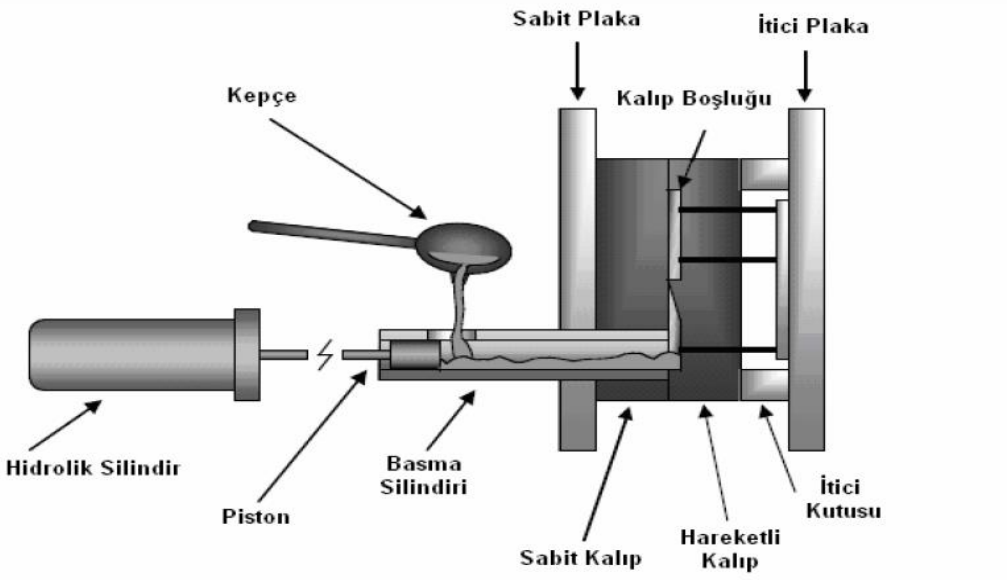
3.2 Basınçlı Döküm Yöntemleri

Basınçlı döküm yöntemleri, farklı özellikleri ve uygulama alanları göz önünde bulundurularak çeşitlenmiştir. Genel olarak, basınçlı döküm yöntemleri, iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır: soğuk kamaralı döküm ve sıcak kamaralı döküm. Soğuk kamaralı döküm yöntemi, ergimiş metalin sabit bir kalıp ile bağlantılı hazneye aktarılması ve daha sonra yüksek basınç altında enjekte edilmesiyle gerçekleşirken, sıcak kamaralı dökümde ise metal, sıvı formda olan bir kalıp içerisinden enjekte edilerek şekil alır. Her iki yöntem de, yüksek hassasiyet ve dayanıklılık gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve her birinin avantajları, belirli üretim ihtiyaçlarına göre farklılık göstermektedir.

3.2.1 Soğuk Kamaralı Döküm

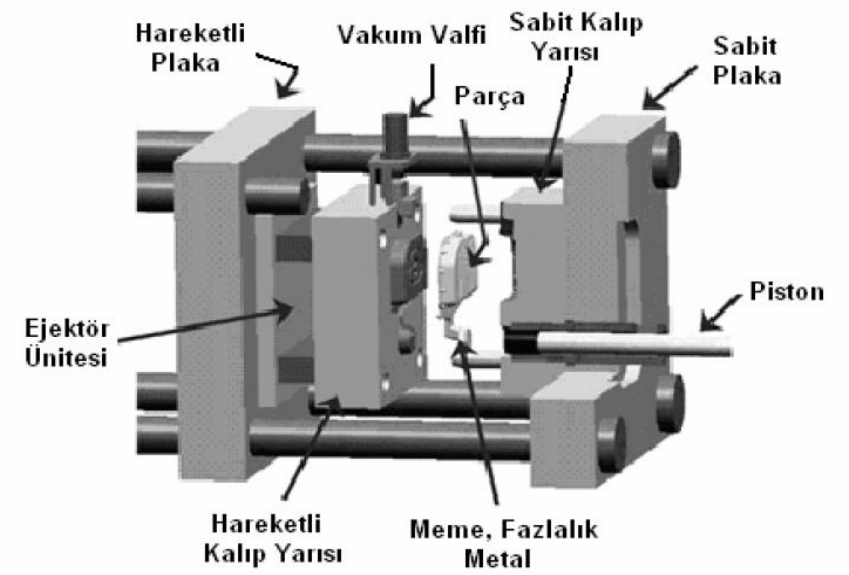
Soğuk kamaralı basınçlı dökümde, ergimiş metal sabit kalıptaki hazneye aktarılır ve hidrolik piston, döküm deliğini kapatarak sıvı metalin kalıba enjekte edilmesini sağlar. Sıvı metal, yüksek hız ve basınç altında kalıp içerisine enjekte edilir. Kalıp içerisine enjekte edilen sıvı metal, genellikle gerekli miktardan fazla olarak döküm ağzına aktarılır. Fazlalık olan ergimiş metal, kalıp içerisindeki alaşımın katılaşmaya başlamadan önce basınç altında tutulmasına yardımcı olur ve böylece metalin düzgün bir şekilde şekil alması sağlanır. Metalin katılaşma süreci tamamlandıktan sonra, kalıp içerisindeki döküm parçası sertleşir ve son olarak çıkarılmaya hazır hale gelir. Bu süreç, yüksek basınçlı soğuk kamaralı makineler için uygulanan

döküm yöntemini daha iyi bir şekilde temsil etmektedir. Uygulanan prosesin adım adım gösterimi, Şekil 3.1'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir [27].

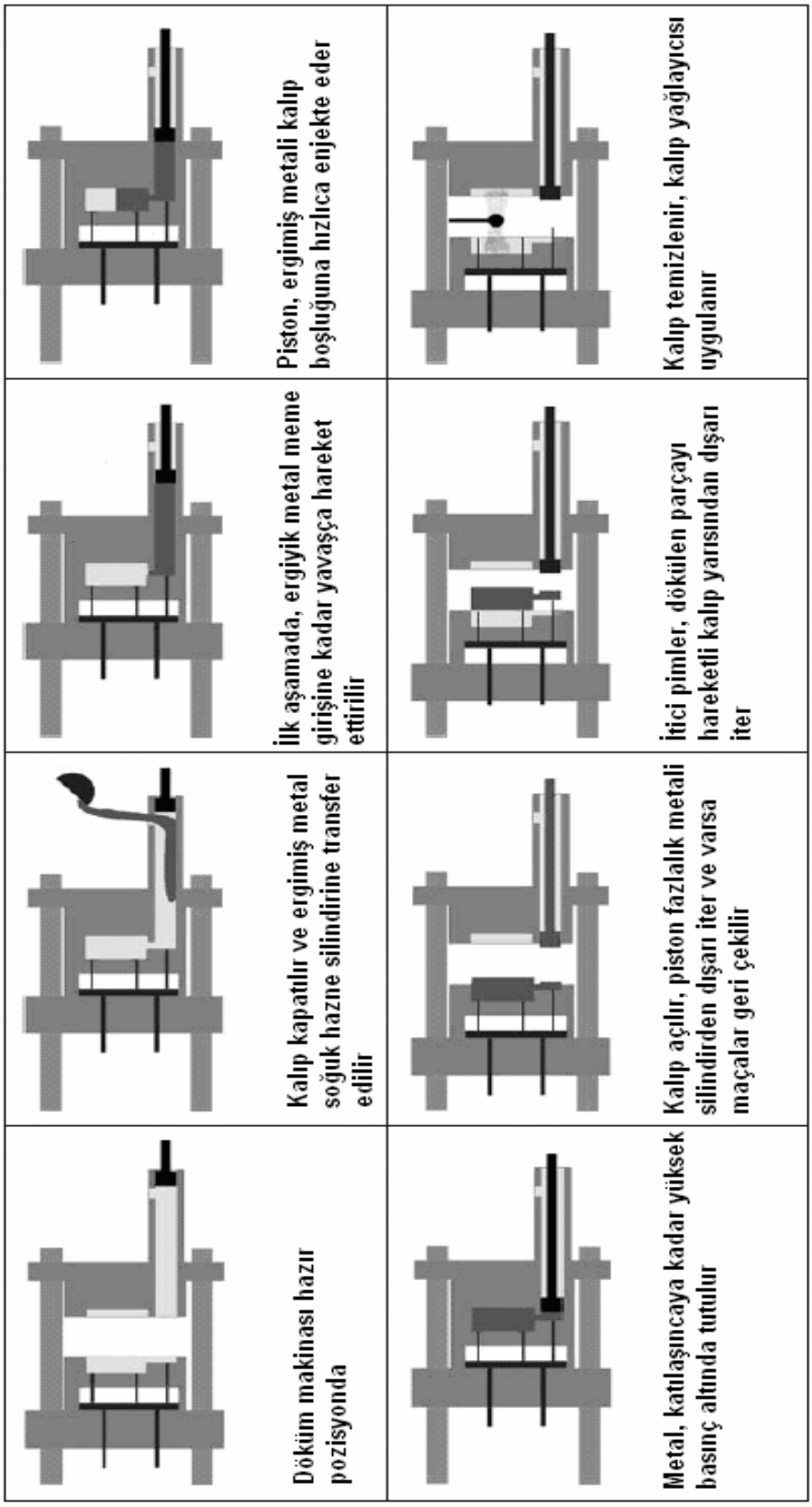


Şekil 3. 1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesi [27].

Vakumlu basınçlı döküm yönteminde, kalıp boşluğundaki hava, sıvı metal enjekte edilmeden önce boşaltılır.



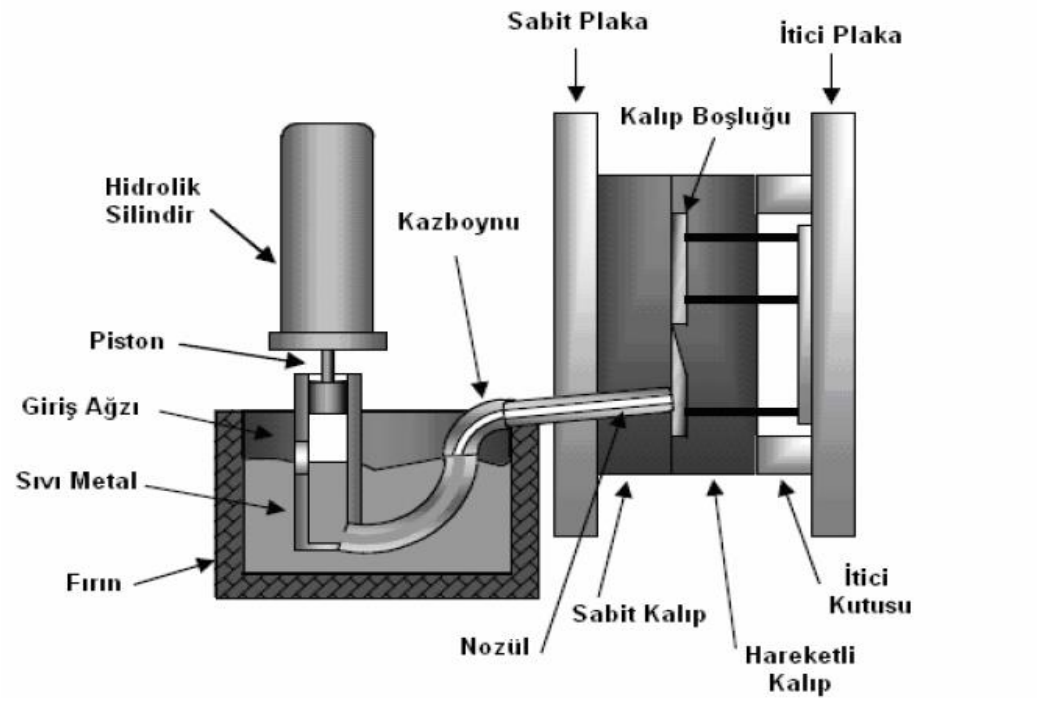
Şekil 3. 2 Vakumlu soğuk kamaralı yüksek basınçlı döküm makinası [27].



Şekil 3. 3 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesinin çevrimi [27].

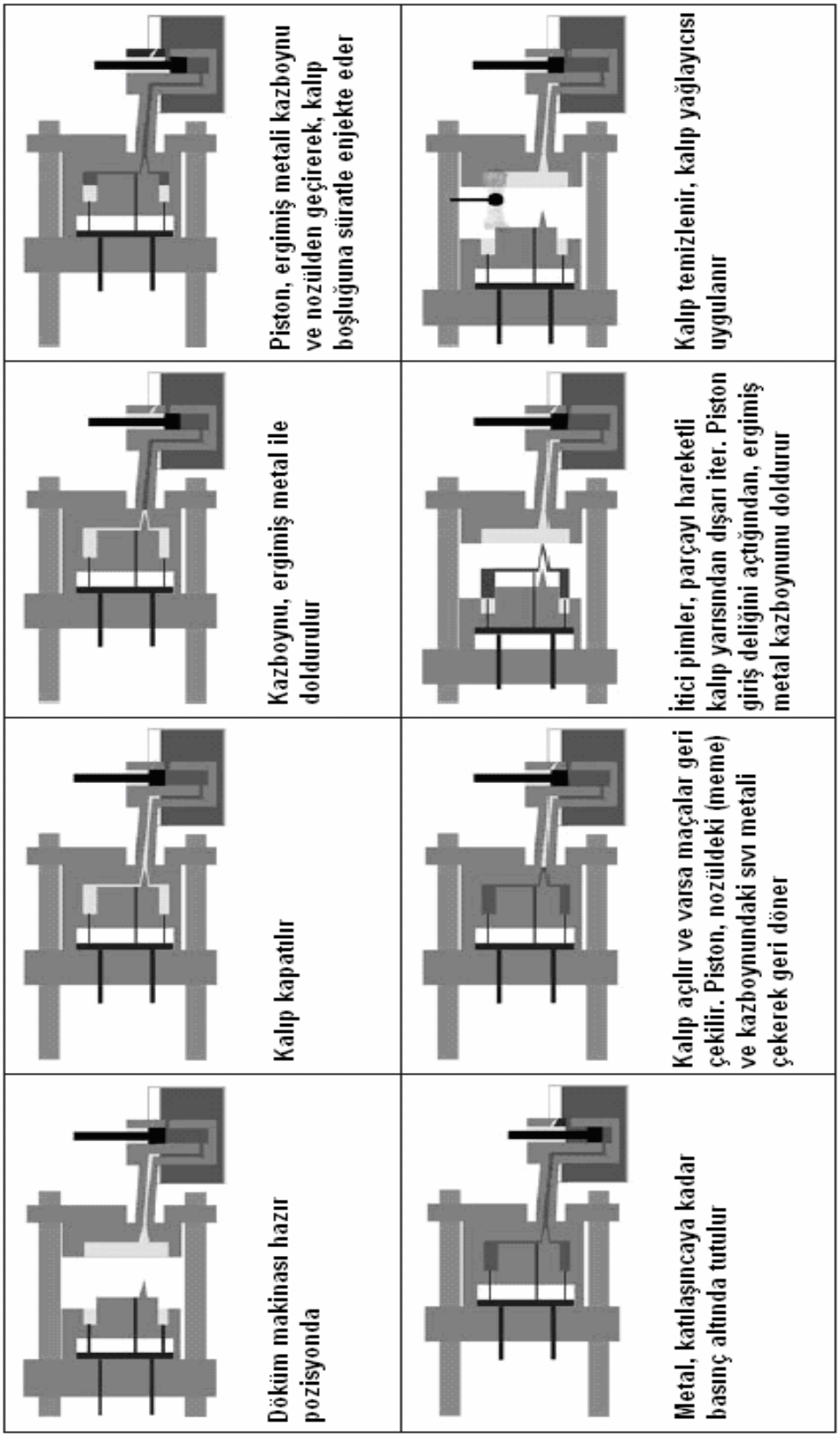
3.2.2 Sıcak Kamaralı Döküm

Sıcak kamaralı basınçlı dökümde enjeksiyon mekanizması, fırın içerisindeki ergimiş metal ile temas halindedir. Dik pozisyonda bulunan piston hareketiyle ergimiş metalin silindire dolmasına izin verilmiştir. Silindir içerisinden nozülden (memeden) geçerek kalıp doldurulur. Kalıp içerisindeki metalin katılaşmasından sonra kalıp açılarak parça dışarı alınır. Şekil 3.4'te sıcak kamaralı döküm makinası gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Sıcak kamaralı döküm makinası [27].

Sıcak kamaralı basınçlı döküm, soğuk kamaralı basınçlı döküme göre üretim süresi açısından daha hızlıdır. Bunun başlıca sebeplerinden biri, sıcak kamaralı basınçlı dökümde, soğuk kamaralı basınçlı dökümde olduğu gibi katılaşma sırasında ekstra bir sıkıştırma işleminin yapılmaması ve yolluktaki katılaşma süresinin daha kısa olmasıdır. Bu durum, döküm sürecinin daha verimli ve hızlı tamamlanmasını sağlar. Ayrıca, çevrim süresi, üretilen parçanın cidar kalınlığına göre değişkenlik gösterebilir; ince cidarlı parçalar daha hızlı soğuyarak daha kısa sürede dökülebilirken, kalın cidarlı parçalar daha uzun süre alabilir.



Şekil 3. 5 Sıcak kamaralı döküm prosesinin çevrimi [27].

4
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜREKLİ KALIBA (KOKİL) DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ

4.1 Giriş

Karmaşık biçimli, boyut toleransları dar ve çok sayıda üretilecek parçaların dökümü için tercih edilmektedir. Kalıp malzemesi olarak genellikle özel dökme demir veya çelik tercih edilmektedir. Sürekli kalıba döküm yönteminde katılaşma sırasındaki soğuma süresi, kum kalıba döküm yönteminden daha hızlı olduğu için iç yapı daha ince tanelidir. Boyut hassasiyeti 0,25mm olup, parça yüzeyleri temizleme işlemleri gerektirmeyecek kadar yüksek kalitededir. Metal kalıplarda kullanılan maçalar metal, kum veya alçıdan yapılabilir.

Sürekli kalıplar genellikle açılıp kapanan iki veya daha fazla parçadan oluşmaktadır. Kalıp kapandıktan sonra oluşan boşluğa erimiş metal dökülür ve katılaşma beklendikten sonra kalıp açılarak parça çıkarılır. Bu işlemler elle yapılabileceği gibi, bir tertibat yardımıyla veya mekanizasyona geçilmesi halinde makinalar tarafından da yapılabilir. Sürekli kalıp tasarımı büyük tecrübe istemektedir. Metal kalıplarının cidar kalınlığının belirlenmesinde ısı girdi ve çıktılarının dikkate alınması gerekmektedir. Kalıp cidar kalınlıkları genellikle 18-50 mm arasında seçilir. Gerektiğinde kalıp soğutulabilir [29].

4.1.1 Sürekli (Kokil) Kalıba Dökümün Avantajları

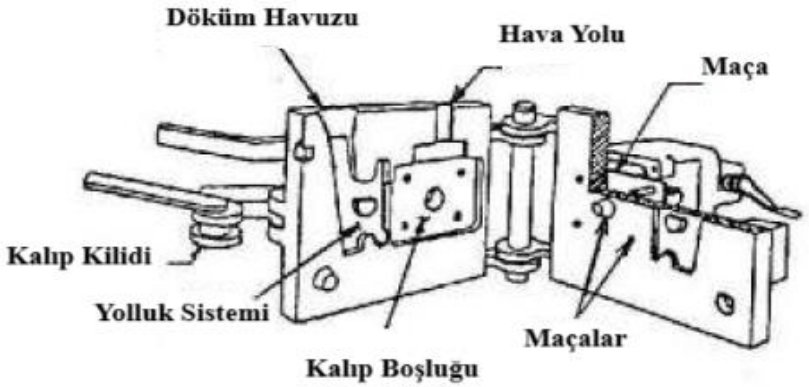
- İnce taneli iç yapı sayesinde mekanik özellikleri iyidir.
- Hassas boyut toleransları sağlar.
- Karmaşık parçların üretimi mümkündür.
- Parçanın yüzey kalitesi iyidir.
- Seri üretim için ekonomik bir uygulamadır.

4.1.2 Sürekli (Kokil) Kalıba Dökümün Dezavantajları

- Sürekli kalıp pahalı olduğundan yöntem ancak seri üretimde ekonomiktir.

- Bu yöntemle her malzeme dökülemez.
- Sadece küçük parçaların dökümü için uygundur.

Genellikle demir dışı metallerin dökümünde kullanılan sürekli döküm yöntemiyle üretilen parçalara örnek olarak soğutucu kompresör gövdeleri, hidrolik fren silindiri, biyel kolları, daktilo parçaları ve mutfak eşyaları gösterilebilir.



Şekil 4. 1 Menteşeli bir kokil kalıp örneği [12].

Daha yüksek sıcaklıklara dayanabilecek kalıpların kullanılması amacıyla, metal dışında refrakter özellikleri yüksek olan malzemeler tercih edilebilmektedir. Bu tür malzemeler, genellikle daha yüksek erime noktalarına sahip olup, döküm sırasında sıcaklıkların önemli ölçüde yükseldiği durumlarda kalıp ömrünü uzatarak döküm kalitesini artırmaktadır. Bu malzemeler, özellikle yüksek sıcaklık direnci gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sağlar. Buna örnek olarak grafit kalıplar verilebilir. Grafit, sahip olduğu yüksek termal iletkenlik ve refrakter özellikler sayesinde, özellikle az sayıda parça üretimi yapılacak alüminyum ve magnezyum alaşımlarında tercih edilmektedir. Bu alaşımlar, genellikle yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi gerektiren döküm işlemlerinde kullanıldığından, grafit kalıpların kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Kokil döküm yöntemi, bu tür kalıpların kullanıldığı ve genellikle yüksek hassasiyet, detaylı işçilik ve üstün yüzey kalitesi gerektiren döküm uygulamaları için son derece uygun bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilerin yüksek doğrulukla üretilmesi gereken durumlarda tercih edilen bir döküm tekniğidir. Grafit gibi malzemeler, kokil dökümde kullanılan kalıpların yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasını sağlayarak, döküm kalitesini artırır, üretim sürecini daha verimli hale getirir ve nihayetinde üretim maliyetlerini düşürür [12].

5
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Çalışmanın Amacı

Hafiflik, Magnezyum alaşımlarının hafifliği, üretim sırasında parça taşıma kolaylığı ve nihai ürünlerin daha düşük maliyetlerle sevk edilmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar, yakıt tüketiminin ve emisyonların azalmasına katkı sağlarken, çevresel sürdürülebilirlik açısından da faydalı olmaktadır [2-12]. Ancak, magnezyum alaşımlarının endüstriyel ölçekte yaygın kullanımı beklenen seviyelere ulaşmamıştır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, Mg alaşımlarının mekanik özelliklerinin istenilen düzeye çıkarılamamış olmasıdır. Bu sorunun çözülmesi amacıyla, çeşitli üretim yöntemleri ve alaşımlama teknikleriyle mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir [1-2]. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel hedeflerinden biri, AZ91D serisi magnezyum alaşımının mekanik özelliklerini çeşitli yöntemlerle geliştirmektir. Bu hedefe ulaşmak için, alaşıma belirli oranlarda stronsiyum (Sr) elementi ilave edilerek hem mekanik özelliklerin hem de malzemenin mikroyapısının detaylı bir şekilde incelenmesi sağlanacaktır.

5.2 Çalışma Sistemi

Yapılan çalışmada, ingot halde bulunan AZ91D alaşımı, 750 kg kapasiteli elektrikli ergitme ocağında, koruyucu gaz atmosferinde paslanmaz çelikten üretilmiş potada 650-680 °C sıcaklık aralığında ergitilmiştir. Ocağın sıcaklığı 670 °C'ye ulaştıktan sonra, ergiyin metalin homojen şekilde ısınması sağlanarak, 30 dakika beklenmiştir. İstenilen sıcaklık değerine ulaşıldıktan sonra, kepçe yardımıyla çelik kalıba numune dökümleri yapılmıştır. Ergitme ve döküm işlemleri sırasında koruyucu gaz olarak $SF_{6\ ve}\ N_2$ gazları kullanılmıştır. Elde edilen alaşımların ağırlıkça yüzdesel oranları, AMETEK marka SPECTRO MAX LMD07 model spektrometre cihazı ile belirlenmiş olup, sonuçlar Şekil 5.1'de sunulmuştur.

AZ91D alaşımına sırasıyla %0,1 ve %0,2 oranlarında stronsiyum (Sr) elementi ilave edilmiştir. Her bir bileşim için, 10'ar adet ingot numunesi dökülmüştür. Mikro yapılarının analiz edilmesi amacıyla SEM ve EDS yöntemleriyle incelemeler yapılmış, alaşımlarda oluşan fazlar ise XRD analizi ile belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi, sertlik testi ve çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatür çalışmaları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5. 1 Spektrometre cihazı.

Tablo 5. 1 Kimyasal analiz sonuçları (%ağırlıkça).

Alaşım No	Alaşım	Al	Zn	Mn	Sr	Mg
1	AZ91D	8,96	0,87	0,19	-	Kalan
2	AZ91D + 0,1 Sr	8,95	0,84	0,24	0,097	Kalan
3	AZ91D+ 0,2 Sr	8,94	0,86	0,33	0,205	Kalan

5.3 Metalografik Çalışmalar

Elde edilen alaşım numunelerinin mikroyapılarının incelenmesi amacıyla standart metalografik işlemler uygulanmıştır. Bu uygulamada alaşımlara sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 kalınlıklarına sahip meshler ile METKON marka Forcıpol

2V model zımparalama makinesinde zımparalanmış ve 0,05 µm'lik alümina pasta ile yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Zımpara makinesi görseli Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Ardından yüzeyler alkol ile temizlenmiştir. Zımparalanmış numuneler üzerine %2 Nital kullanarak dağlanmıştır. Hazır edilen numunelerin mikroyapı incelemeleri SEM ve EDS'de yapılmıştır.



Şekil 5. 2 Zımpara parlatma cihazı.

5.4 Mekanik Test Uygulamaları

5.4.1 Sertlik Testi

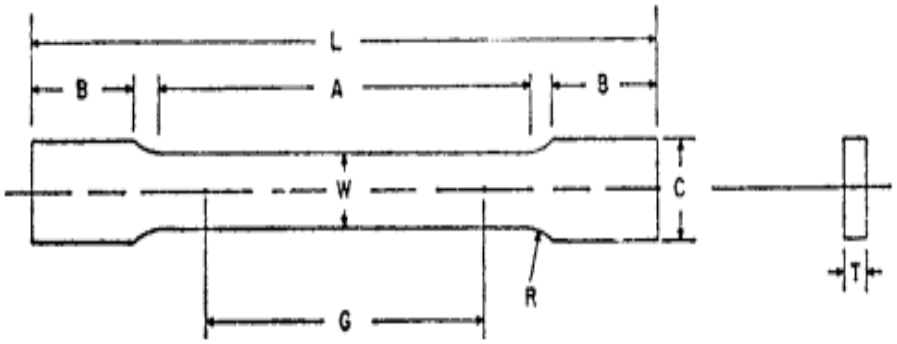
Elde edilen numunelerin sertlik testi deneyleri Brinell sertlik (HB) skalasında OMAG marka 206 EX model sertlik cihazında ölçülmüştür. Tüm alaşımlardan alınan numuneler üzerinden 10'ar ölçüm yapılıp ortalamaları alınarak ölçüm sonucu belirlenmiştir. Test oda sıcaklığında gerçekleşmiştir. Sertlik ölçüm testi cihazı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 3 Sertlik ölçüm cihazı.

5.4.2 Çekme Testi Deneyi

Elde edilen numunelerin çekme testi deneysel uygulamaları, BESMAK marka elektromekanik evrensel test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım için çekme testlerinin sonuçlarının daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, her biri 5 adet numune üzerinde yapılan deneylerle veriler toplanmıştır. Bu deneylerde, numunelere $5x10^{-1}$ mm/dk hızında uygulanan çekme işlemi ile çekme mukavemeti ölçülmüş ve bu şekilde gerekli veriler elde edilmiştir. Şekil 5.4'te, çekme mukavemeti deneylerinin ASTM E8/E8M-13a standardına uygun olarak hazırlanan numunenin şematik gösterimi detaylı bir şekilde yer almaktadır. Ayrıca, test cihazının çalışma prensibini ve uygulama örneklerini daha ayrıntılı şekilde yansıtan cihaz görüntüsü ve test uygulamaları Şekil 5.5'te sunulmuş olup, bu görseller test sürecini daha iyi anlamaya yardımcı olmaktadır.



Şekil 5. 4 Çekme deneyi numunesi.

A= 57mm test uygulanan kesitin uzunluğu

W= 2,5 ±0,2mm test uygulanan kesitin kalınlığı

G= 50 ±0,1mm ölçü uzunluğu

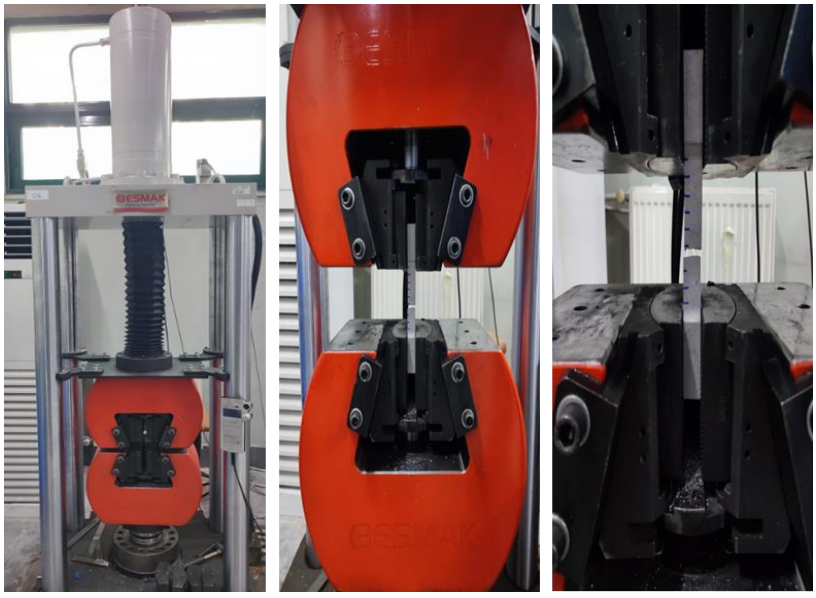
R= 12,5mm yarıçap

T= 18mm kalınlık

L= 200mm toplam uzunluk

B= 50mm tutma bölümünün uzunluğu

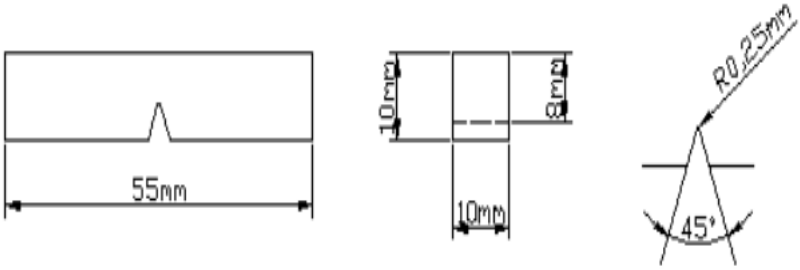
C= 20mm kavrama bölümünün genişliği



Şekil 5. 5 Çekme testi cihazı ve uygulama örneği.

5.4.3 Çentik Darbe Deneyi

Endüstride çeşitli uygulamalarda malzemelerin ortam sıcaklığına ve uygulanan yüke bağlı olarak hasara uğradığı görülmektedir. Üretilecek malzemenin seçimi yapılmadan hangi sıcaklıkta sünek mi, gevrek mi kırılacağını ve kırılırken de ne kadar bir enerji emebileceği veya kırılma enerji miktarının ne kadar olabileceği hakkında malzemenin davranışı ile ilgili bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bu bilgilere ulaşmak amacıyla malzemenin dinamik yüklere karşı ne kadarlık bir kırılma enerjisine sahip olduğunu belirlemek için çentik darbe testi yapılmaktadır. Bu deneyde Charpy darbe deney yöntemi ile yapılmıştır. Numuneler ASTM E23-07 standardına göre hazırlanmıştır. Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halinde iki mesnete yaslanmış numunenin ortasına bir sarkıcın ucundaki çekiçle yukarıdan serbest bırakılır ve çentik ucunda meydana gelen çok eksenli gerilmelerin etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tayin işlemidir.



Şekil 5. 6 Çentik darbe deneyi numunesi.

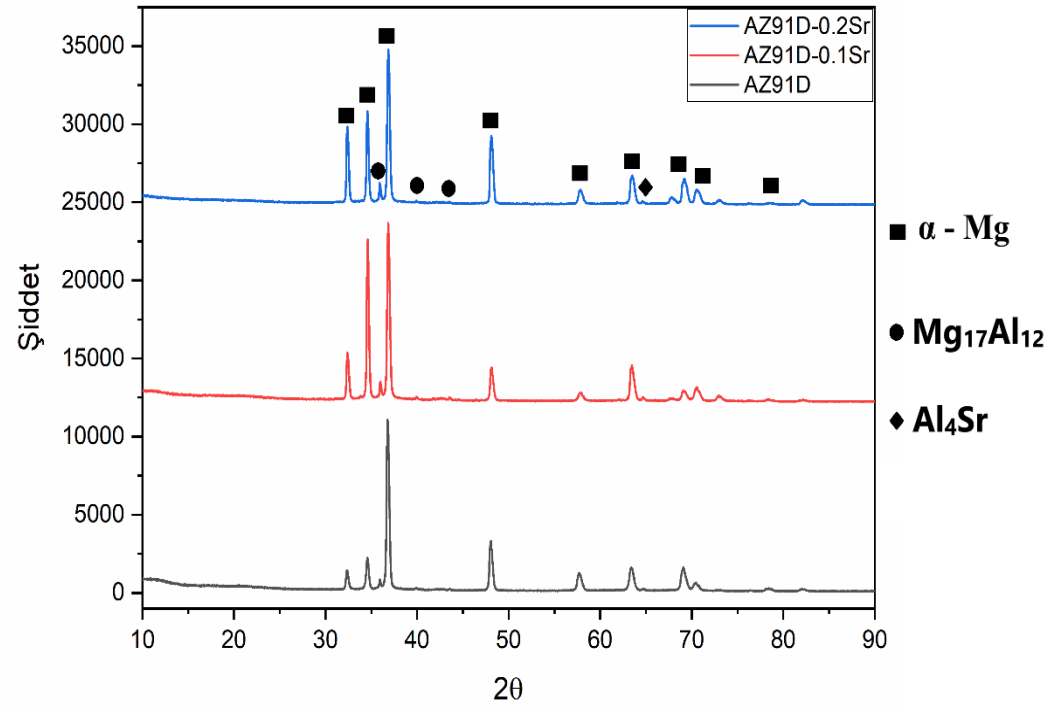


Şekil 5. 7 Çentik darbe deneyi cihazı.

6
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1 X-Işınları Difraksiyon Analizleri

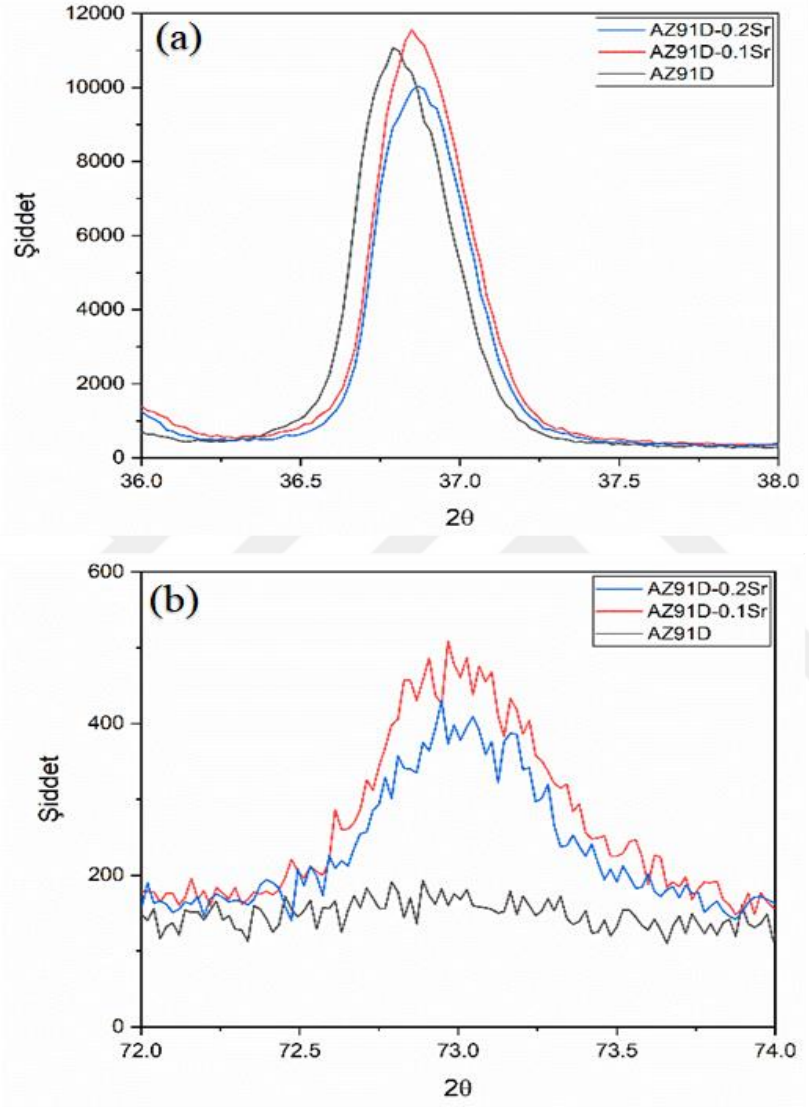
XRD, bir malzemeyi gelen X-ışınları ile ışınlayarak ve ardından malzemeyi terk eden X-ışınlarının yoğunluklarını ve saçılma açılarını ölçerek malzemenin kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi verir. AZ91D master alaşımına farklı oranlarda Sr ilavesiyle elde edilen XRD analizi Şekil 6.1'de görülmektedir. Piklerin çoğu literatür çalışmalarında, XRD analizi sonucunda ve denge diyagramında görülen $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğinin ve α-Mg fazının oluştuğu görülmektedir. Sr ilavesi arttıkça Al_4Sr fazı görülmüştür.



Şekil 6. 1 AZ91D ve AZ91D'ye farklı oranlarda Sr içeriği ile XRD analizi

Stronsiyum (Sr) ilavesinin etkisiyle, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının oluşumunun baskılandığı ve yerine Al_4Sr fazının oluştuğu gözlemlenmiştir. Al_4Sr fazı genellikle tane sınırlarında yoğunlaşır ve bu özellik, alaşımın ince taneli bir yapıya sahip olmasını sağlar. İnce taneli yapı, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir.

Örneğin, %0,1 Sr ilavesi ile Al_4Sr fazı düşük yoğunlukta gözlemlenmiş, ancak $Mg_{17}Al_{12}$ fazı hala baskın olmaya devam etmiştir. Ancak, Sr oranının %0,2'ye çıkarılmasıyla Al_4Sr fazı daha belirgin hale gelmiş ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazının miktarı belirgin bir şekilde azalmıştır. Bu değişiklikler, malzemenin mikroyapısındaki dönüşümün ve mekanik özelliklerindeki iyileşmenin önemli bir göstergesidir.



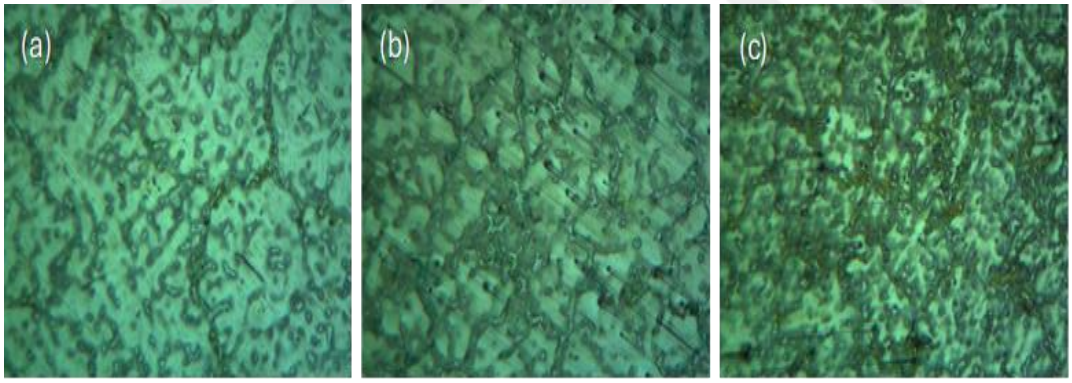
Şekil 6. 2 a) α-Mg Piki, b) AZ91D alaşımında Sr ilavesi ile oluşan α-Mg fazının yakın görüntüsü.

AZ91D alaşımına stronsiyum (Sr) ilavesi, malzemenin kristal yapısında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişiklikler, Bragg yasasına göre atomik düzlemler arasındaki mesafelerin değişmesine ve dolayısıyla kristal yapının iç gerilmeler nedeniyle piklerde kayma meydana gelmesine yol açmaktadır. Sr ilavesi, alaşımdaki atomik düzlemlerin düzenini etkileyerek kristal yapısının yeniden şekillenmesine neden olur. Bu süreç, malzemenin mikroyapısındaki değişikliklerle

paralel olarak mekanik özelliklerde de iyileşmelere veya farklılaşmalara yol açabilir. Sr'nin kristal yapıyı etkilemesi, özellikle tane sınırlarında ve faz geçişlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

6.2 Alaşımların Mikro Yapıları

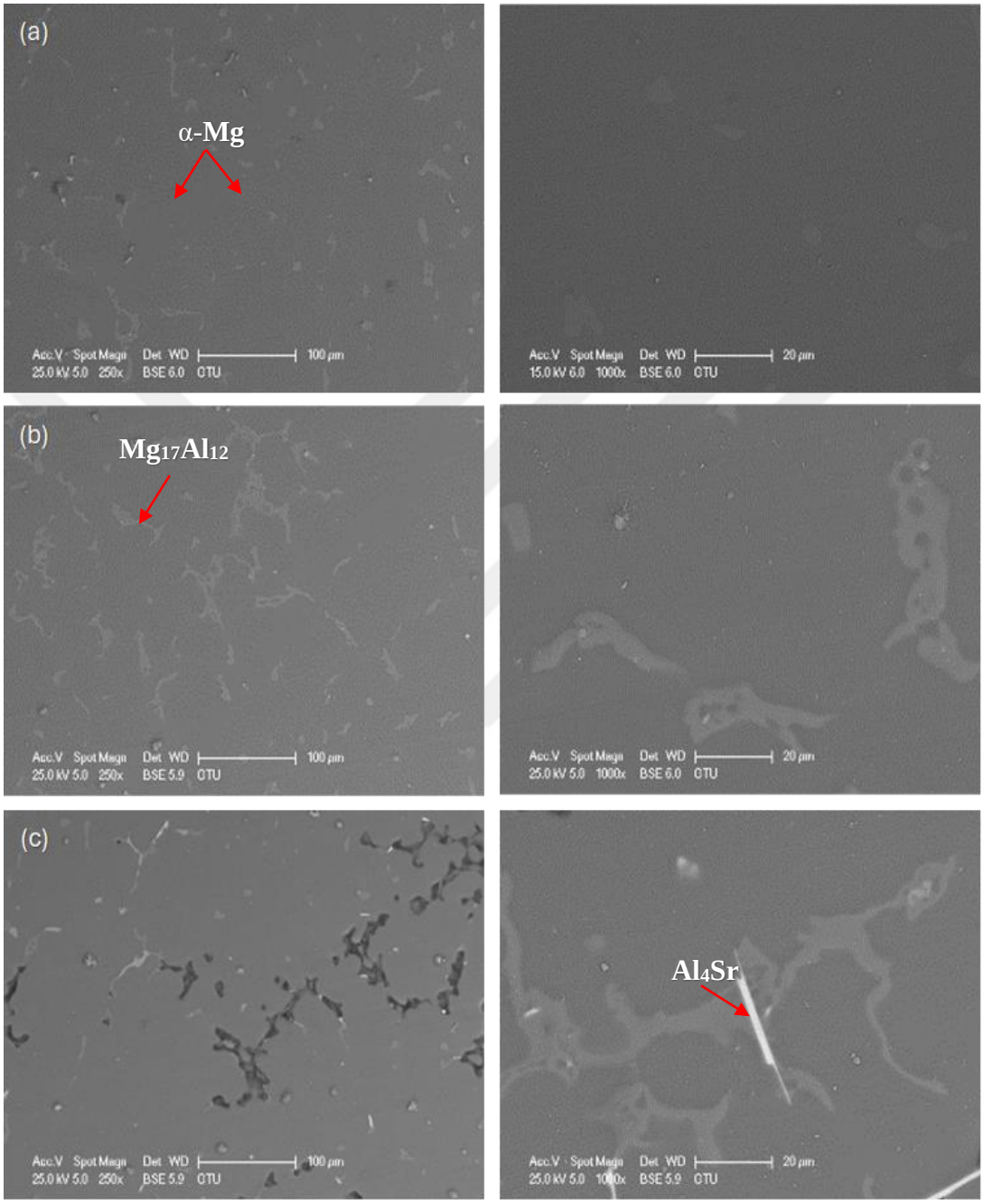
Şekil 6.3'te AZ91D, AZ91D + 0,1Sr ve AZ91D + 0,2Sr alaşımlarının optik görüntüleri verilmiştir. Literatürde AZ91D alaşımında α-Mg matrisinin yanı sıra β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği ve ötektik α (α+β ötektiği) oluştuğu rapor edilmektedir [1]. Ötektik yapıdaki hacim merkezli kübik yapıda olan β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği sert ve gevrek olarak bilinmekte ve düşük sıcaklıkta (437 °C)'de ergimektedir. Şekil 6.3a'daki AZ91D alaşımının ışık mikroskobunda yapılan incelemeleri sonucunda mikroyapısının dentritik α-Mg ve ötektik fazdan oluştuğu görülmüştür. Stronsiyum elementinin magnezyum alaşımları için tane inceltici etkiye sahip olduğu bilinmektedir [21, 24]. Şekil 6.3'teki ışık mikroskobu görüntüleri incelendiğinde tane boyutları arasında sırasıyla 116 µm'den 87 µm'ye, 87 µm'den 61 µm'ye kadar küçülme görülmektedir.



Şekil 6. 3 a) AZ91 alaşımın, b) AZ91+0,1Sr alaşımın, c) AZ91+0,2Sr alaşımın optik görüntüsü**.**

Yapılan bu çalışmada dökülmüş AZ91D, AZ91D + 0,1Sr, AZ91D + 0,2Sr alaşımlarının SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. AZ91D alaşımı temel olarak α-Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazlarından oluşmaktadır. Zhang ve arkadaşlarının AZ91D magnezyum alaşımına 0,2, 0,6 ve 1 Sr ilavesinin alaşımın mikroyapısına etkileri üzerine yapmış oldukları çalışmada [21] ise Sr elementi ilavesinin AZ91D alaşımının mikro yapı üzerine etkisi XRD analizi ile incelenmiş olup, Sr ilavesi %1'i Al_4Sr fazının oluştuğu görülmüş olup, yapılan bu alaşım elementi ilavesi ile $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının oluşumunun baskılandığı

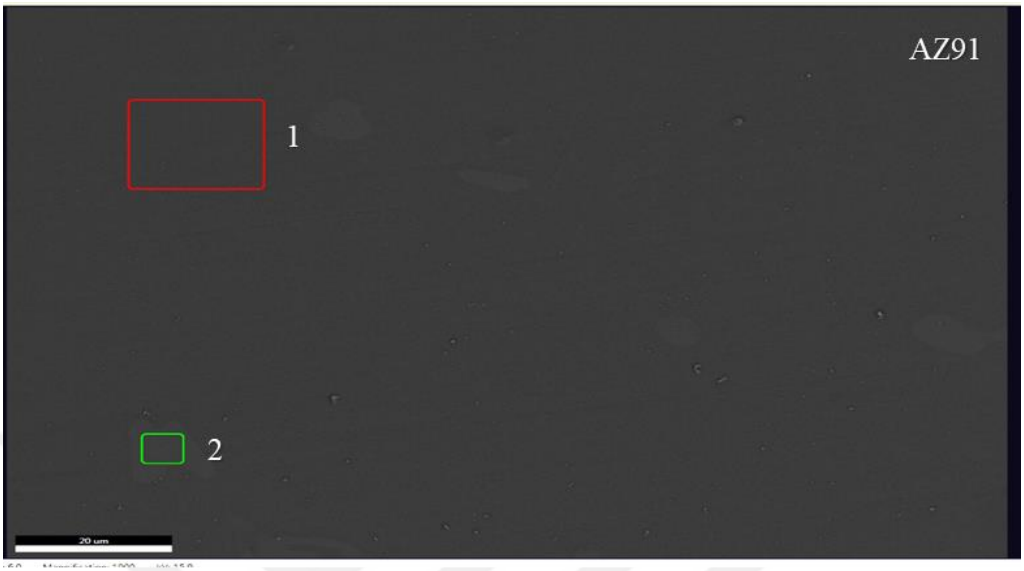
sonucuna ulaşılmıştır. Al_4Sr fazı genellikle β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının yanında oluştuğu ve artan Sr miktarı ile β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının hacim fraksiyonunun arttığı bilinmektedir [25]. Şekil 6.4'te yapmış olduğumuz çalışmanın SEM BS görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6. 4 Araştırılan alaşımların mikroyapısının SEM BS görüntüleri: a) AZ91D, b) AZ91D-0,1Sr, c) AZ91D-0,2Sr

Yapılan analizler sonucunda, Şekil 6.4c'de görüldüğü üzere AZ91D alaşımına ağırlıkça %0,2 Sr ilavesi ile Al_4Sr fazı oluştuğu ve tane boyutunda oldukça küçülme görülmüştür. Bu durumun da mukavemet artışı getirdiği düşünülmektedir. Alaşımın mukavemetinin, tane boyutuyla ters orantılı olduğunu ifade eden Hall-Petch

bağıntısından bilindiği üzere; tane boyutu küçüldükçe mukavemet artar. Bu ilişki, daha küçük tanelerin, dislokasyon hareketini zorlaştırarak malzemenin mekanik özelliklerini güçlendirmesi ilkesine dayanmaktadır.





1

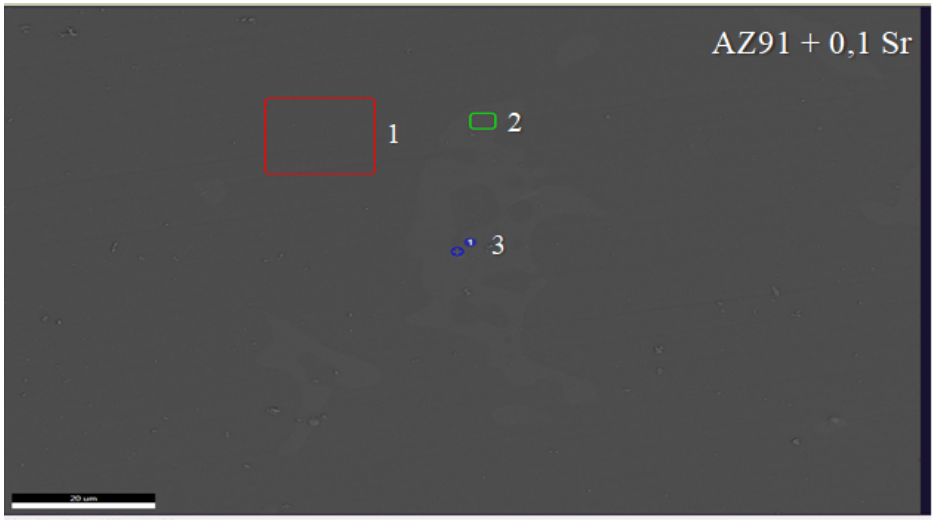
Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	90.87	92.59
AlK	7.39	6.78
SrL	0.55	0.16
MnK	0.26	0.12
ZnK	0.94	0.35

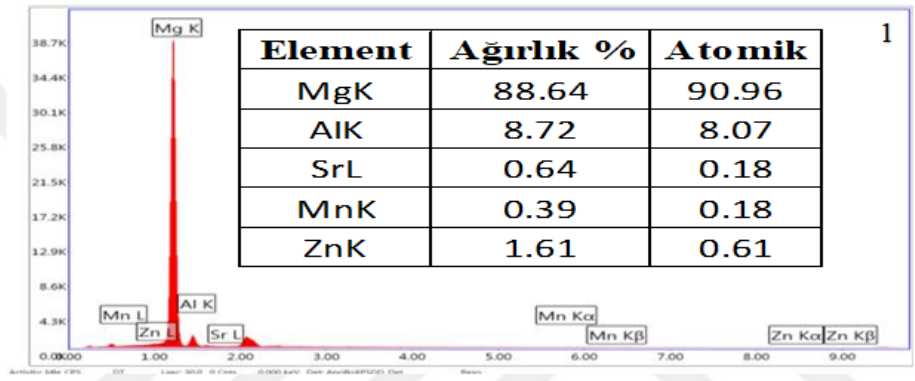


2

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	57.33	61.28
AlK	38.53	37.11
SrL	0.6	0.18
MnK	0.29	0.14
ZnK	3.26	1.29

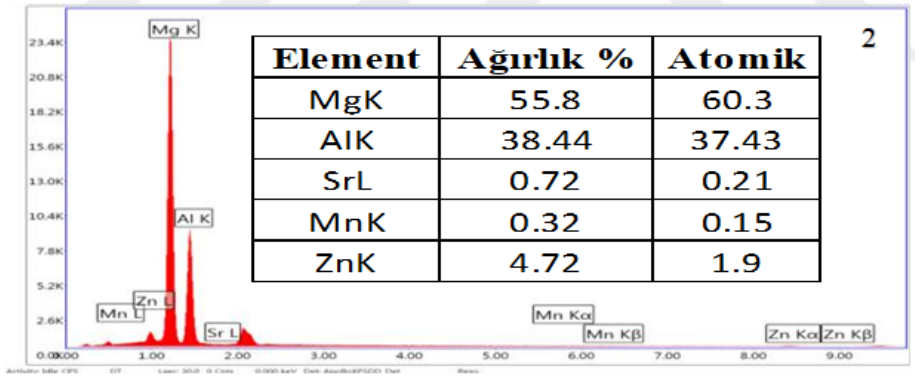
Şekil 6. 5 AZ91D alaşımı EDS görüntüleri.





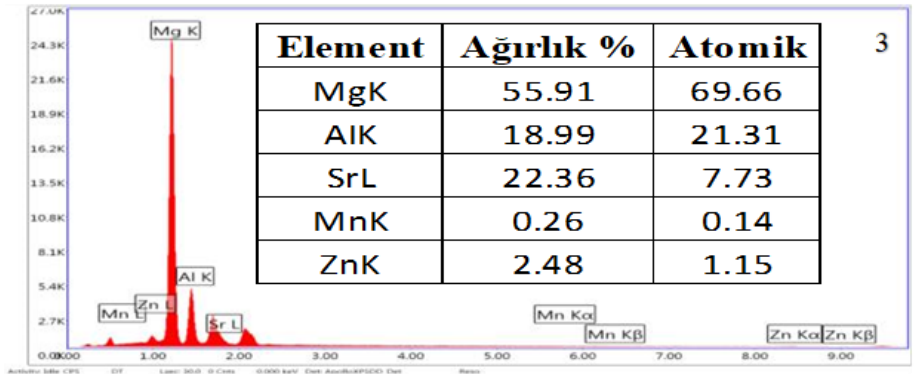
1

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	88.64	90.96
AlK	8.72	8.07
SrL	0.64	0.18
MnK	0.39	0.18
ZnK	1.61	0.61



2

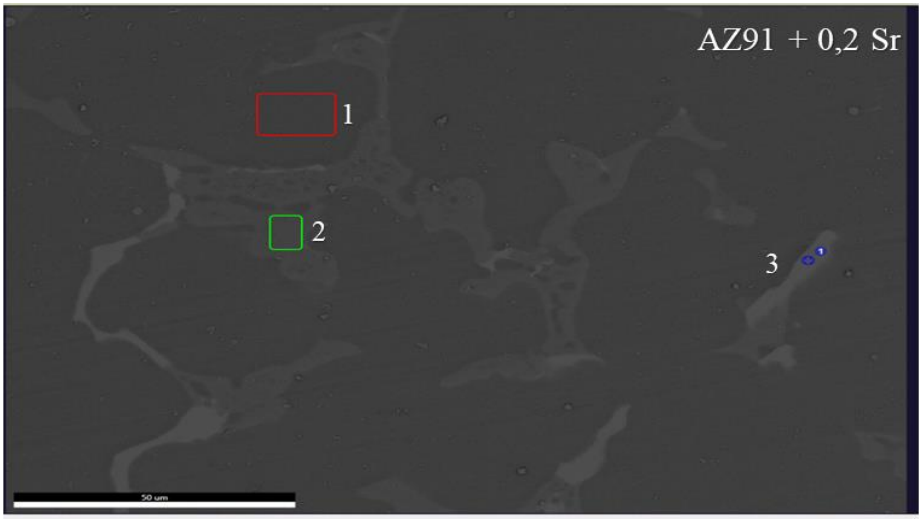
Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	55.8	60.3
AlK	38.44	37.43
SrL	0.72	0.21
MnK	0.32	0.15
ZnK	4.72	1.9

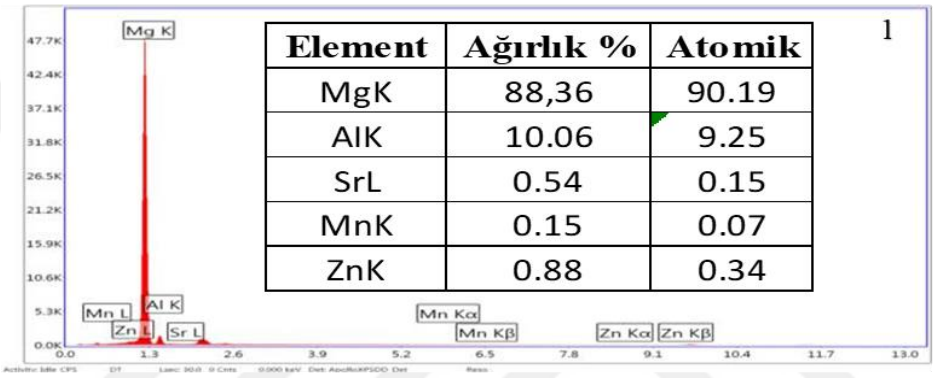


3

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	55.91	69.66
AlK	18.99	21.31
SrL	22.36	7.73
MnK	0.26	0.14
ZnK	2.48	1.15

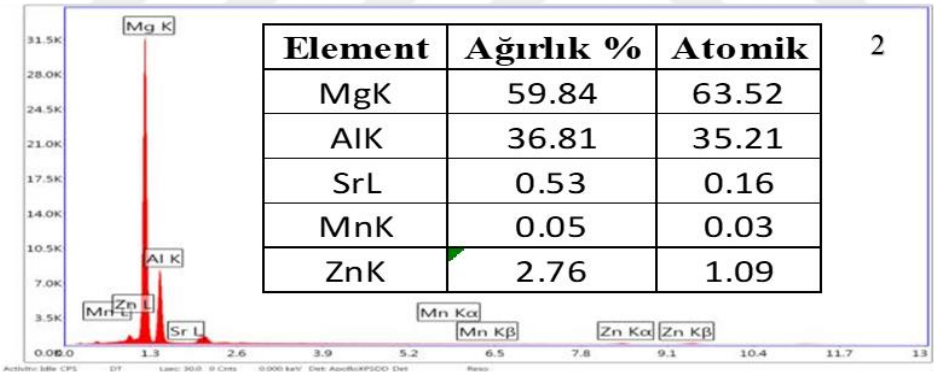
Şekil 6. 6 AZ91D+0,1 Sr alaşımı EDS görüntüleri.





1

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	88,36	90.19
AlK	10.06	9.25
SrL	0.54	0.15
MnK	0.15	0.07
ZnK	0.88	0.34



2

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	59.84	63.52
AlK	36.81	35.21
SrL	0.53	0.16
MnK	0.05	0.03
ZnK	2.76	1.09



3

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	38.39	49.5
AlK	35.16	40.84
SrL	24.87	8.89
MnK	0.12	0.07
ZnK	1.46	0.7

Şekil 6. 7 AZ91D+0,2 Sr alaşımı EDS görüntüleri.

Stronsiyum, magnezyum alaşımında çok düşük oranlarda bulunan bir alaşım elementidir. Bu nedenle, EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizi yöntemiyle alan taraması yapılmıştır. EDS analizinde, stronsiyumun özellikle tane sınırlarında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.5'te AZ91D alaşımının, Şekil 6.6'da AZ91D + 0,1 Sr alaşımının ve Şekil 6.7'de AZ91D + 0,2 Sr alaşımlarının EDS analizleri sunulmaktadır. EDS analiz sonuçlarına göre, α-Mg ve β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazlarının yanı sıra, stronsiyum eklemesiyle Al_4Sr fazının da oluştuğu tespit edilmiştir.

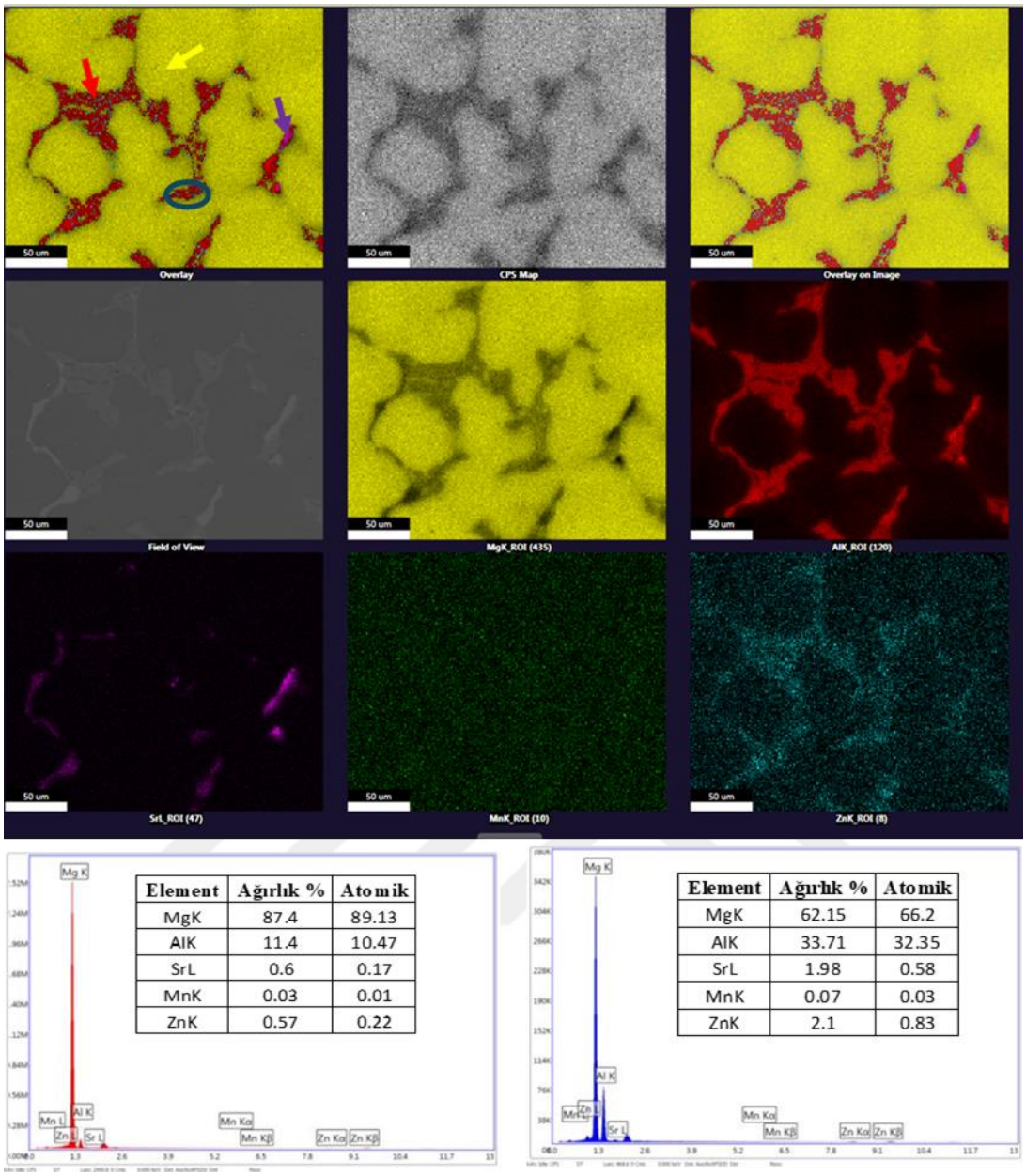
Şekil 6.5'te, 1 numaralı koyu renkli işaretli bölge α-Mg matrisini, 2 numaralı açık gri renkli bölge ise β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğini göstermektedir.

Şekil 6.6'da ise 1 numaralı koyu renkli işaretli bölge α-Mg matrisini, 2 numaralı açık gri renkli bölge β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğini ve 3 numaralı işaretli bölgeyi ise stronsiyumun yoğunlaştığı ve Al_4Sr fazının oluşmaya başladığı bölge olarak göstermektedir.

Şekil 6.7'de de 1 numaralı koyu renkli işaretli bölge α-Mg matrisini, 2 numaralı açık gri renkli bölge β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğini ve 3 numaralı işaretli bölgeyi ise Sr elementinin yoğunlaştığı ve Al_4Sr fazının oluştuğu bölge olarak gösterilmektedir.

Genel olarak stronsiyum ilavesiyle elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Düşük konsantrasyonda Sr ilavesi ile, genellikle tane sınırlarında Al-Sr zenginleşmesine neden olmuştur.
- Sr konsantrasyonunun artmasıyla birlikte daha geniş bir Sr dağılımı görülür. Al_4Sr fazları daha belirginleşmiştir.
- Stronsiyum (Sr), alaşımın yapısında alüminyum (Al) ile reaksiyona girerek Al_4Sr fazını oluşturur. Bu etkileşim, tane sınırlarında Al zenginliği bölgelerinin meydana gelmesine yol açar. Mg'nin dağılımında belirgin bir değişiklik gözlemlenmez, çünkü Mg genellikle matris fazı olan α-Mg içinde yoğun olarak bulunur. Ancak Sr'nin Al ile etkileşimi sonucunda, bazı bölgelerde Mg ve Al'nin yoğunluğu arasında farklılıklar meydana gelebilir. Bu durum, malzemenin mikroyapısında yerel yoğunluk değişimlerine yol açarak, alaşımın özelliklerini etkileyebilir.



Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	87.4	89.13
AlK	11.4	10.47
SrL	0.6	0.17
MnK	0.03	0.01
ZnK	0.57	0.22

Element	Ağırlık %	Atomik
MgK	62.15	66.2
AlK	33.71	32.35
SrL	1.98	0.58
MnK	0.07	0.03
ZnK	2.1	0.83

Şekil 6. 8 AZ91D + 0,2 Sr alaşımı haritalama görüntüsü.

Şekil 6.8'de, alaşımdaki farklı elementlerin dağılımı ve yoğunluğu, çeşitli renklerle ifade edilmiştir. İlk görselde, genel EDS haritalama tekniği kullanılarak, farklı elementlerin haritaları birleştirilerek oluşturulmuş bir genel görünüm sunulmuştur. Bu görselde, her element farklı bir renkle temsil edilmekte ve alaşım içerisindeki dağılımları detaylı bir şekilde görselleştirilmektedir.

Mg elementi, sarı renkli ok ile gösterilmiştir ve bu renk, matris malzemesini temsil etmektedir. AZ91D alaşımının ana bileşeni olan magnezyum, homojen ve yoğun bir dağılıma sahip olup, matris fazının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Mg elementinin bu yoğun dağılımı, alaşımın temel yapısını ve sağlamlığını sağlar.

Al elementi, kırmızı renkli ok ile ifade edilmiştir ve Mg matrisinde özellikle sınır bölgelerinde daha yoğun bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu, alüminyumun, özellikle ikinci faz oluşumunda aktif bir rol oynadığını ve Mg matrisinde önemli bir etkileşim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Al'nin bu yoğunluğu, alaşımın mikro yapısındaki faz dönüşüm süreçlerini etkilemektedir.

Sr elementi, mor renkli ok ile gösterilmiş ve belirli bölgelerde kümelenmeler şeklinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu, stronsiyumun spesifik fazların, özellikle Al_4Sr fazının oluşumuna katkı sağladığını işaret eder. Sr'nin bölgesel yoğunluğu, bu fazların gelişimini ve kristal yapılarındaki değişiklikleri etkilemektedir.

Mn ve Zn elementleri, mavi renkli daireler ile ifade edilmiştir ve yeşil ile mavi tonlarında gösterilmiştir. Bu elementler, alaşımdaki diğer katkıların ve mikro yapının gelişiminde belirli rol oynar, ancak görseldeki diğer elementlerle karşılaştırıldığında daha az yoğun bir dağılım sergiler.

Sonuç olarak, elde edilen haritalama sonuçları şu şekilde özetlenebilir.

- Al ve Sr elementleri özellikle tane sınırlarında yoğunlaşmaktadır. Al elementi, $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliğinin oluşumunda önemli bir rol oynar, bu da alaşımın mekanik özelliklerini iyileştiren bir fazın varlığını gösterir.
- Sr elementinin bölgesel yoğunluğu, Al_4Sr fazının oluşumunu etkileyerek, alaşımın mekanik dayanıklılığını ve mikro yapısını önemli ölçüde dönüştürmektedir.

Bu bulgular, magnezyum alaşımlarının geliştirilmesinde stronsiyum ve alüminyum gibi elementlerin kritik rolünü ve bunların mikro yapısal etkilerini ortaya koymaktadır.

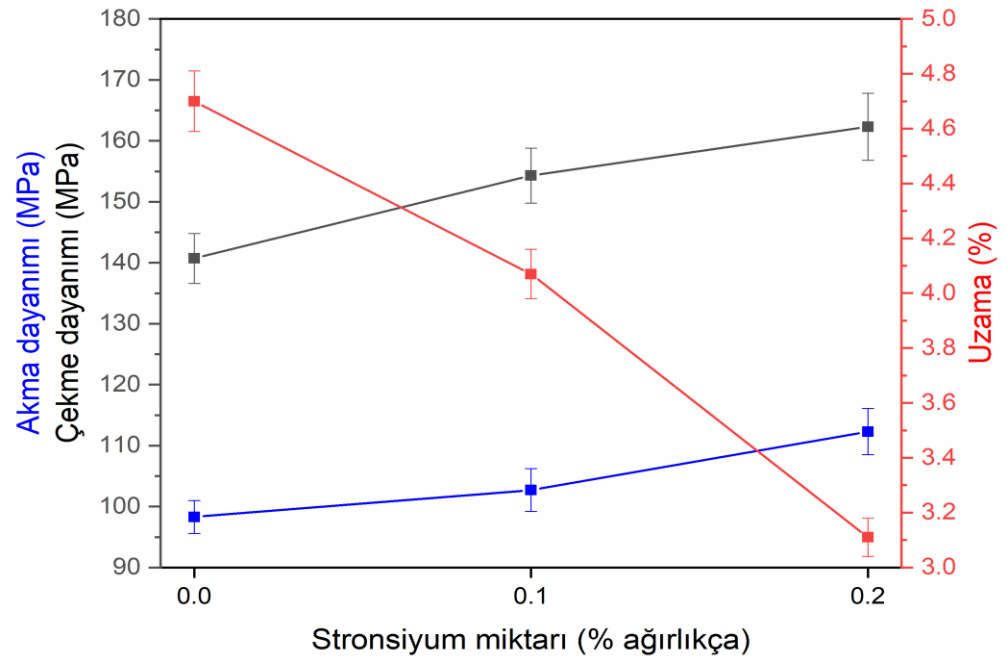
6.3 Çekme Mukavemeti Sonuçları

Her bir farklı elementten elde edilen alaşım numuneleri için, çekme testi yapılmadan önce her bir alaşımdan 5'er adet numune hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama değerler dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Yapılan testler, her bir alaşımın çekme özelliklerini daha doğru bir şekilde karşılaştırabilmek amacıyla dikkatle seçilen numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Stronsiyum elementi eklenmesiyle elde edilen en yüksek çekme mukavemeti, özellikle %0,2 oranında stronsiyum ilavesi yapılan alaşımda

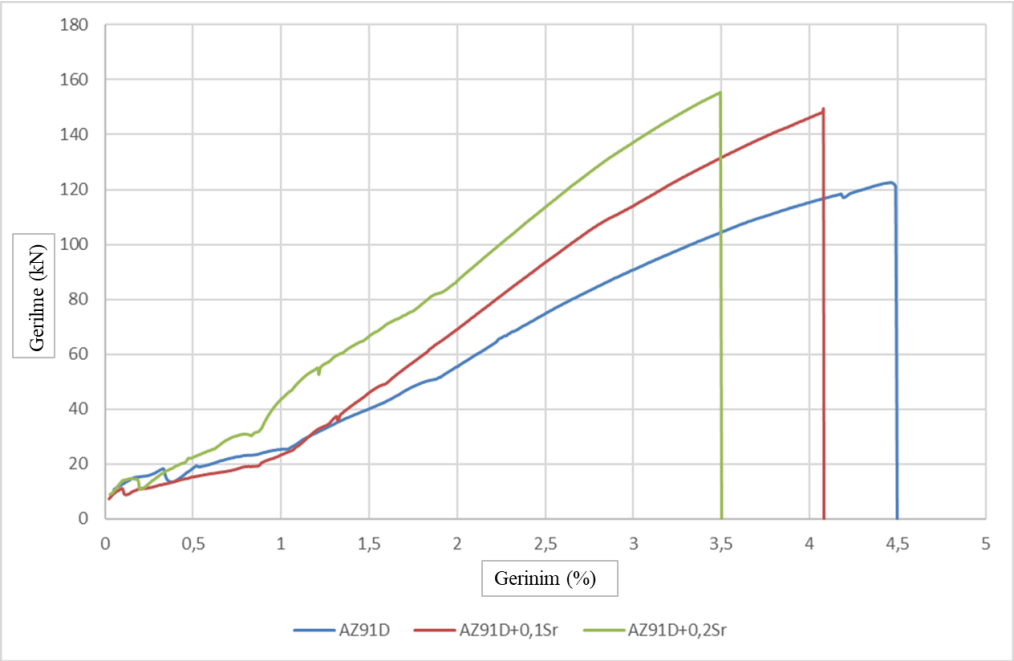
gözlemlenmiştir. Bu oran, çekme testi sonuçlarında en yüksek değerleri sağlayarak, stronsiyumun alaşımın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Çekme testinden elde edilen ortalama sonuçlar detaylı bir şekilde Tablo 6.1'de sunulmuş olup, bu verilerle birlikte çekme testlerinin grafiksel gösterimleri de Şekil 6.9 ve 6.10'da yer almaktadır. Bu görseller, farklı alaşımlar arasındaki mekanik performans farklarını daha net bir şekilde görselleştirmekte ve yapılan değişikliklerin çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 6. 1 Çekme testi ortalama değerler.

Numuneler	Ortalama Re	Ortalama Rm	Ortalama %e
AZ91D	**98,3**	**140,7**	**4,5**
AZ91D + 0,1Sr	**102,7**	**154,3**	**4,07**
AZ91D + 0,2Sr	**112,3**	**162,3**	**3,5**



Şekil 6. 9 Stronsiyum miktarının çekme dayanımına etkisi.



Şekil 6. 10 Stronsiyum miktarının çekme dayanımına etkisi.

Tablo 6.1'de yer alan çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde Stronsiyum elementi ilavesi 0.1 ve 0.2 olduğunda AZ91D numunesine göre çekme mukavemetinde ortalama sırasıyla 9.7% ve 15.5% artmaktadır, yüzde uzama değerleri ise ortalama sırasıyla 9,5% ve 22% azalmıştır. Stronsiyum ilavesi, mikro yapıda hem tane boyutunu küçülterek hem de faz oluşumlarıyla dislokasyon hareketini sınırlandırarak çekme dayanımını artırır. Ancak fazların artışı ve tane sınırlarında birikmesi, malzemenin süneklilik (uzama) özelliğinde azalmaya neden olmaktadır.

6.4 Çentik Darbe ve Sertlik Testi Sonuçları

Üretilen alaşımların ortalama sertlik değerleri, Tablo 6.2'de sunulmuştur. Şekil 6.11'de yer alan veriler, AZ91D alaşımına stronsiyum ilavesinin sertlik değerlerinde belirgin bir artışa yol açtığını, ancak darbe tokluğunda gözle görülür bir azalma meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Stronsiyum ilavesi ile, özellikle tane sınırlarında Al_4Sr fazı oluşumu tetiklenmiştir. Al_4Sr fazı, malzemenin mikro yapısındaki dislokasyon hareketlerini engelleyerek, metalin deformasyon direncini artırır ve sonuç olarak hem çekme dayanımını hem de sertliği önemli ölçüde iyileştirir. Bu mekanizma, stronsiyumun alaşıma katkısının, malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki önemli ve olumlu etkilerini açıkça göstermektedir. Ancak,

Al_4Sr fazının varlığı, sertlikteki artışa rağmen darbe tokluğunun düşmesine neden olabilmektedir. Bu durum, söz konusu fazın kırılgan özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

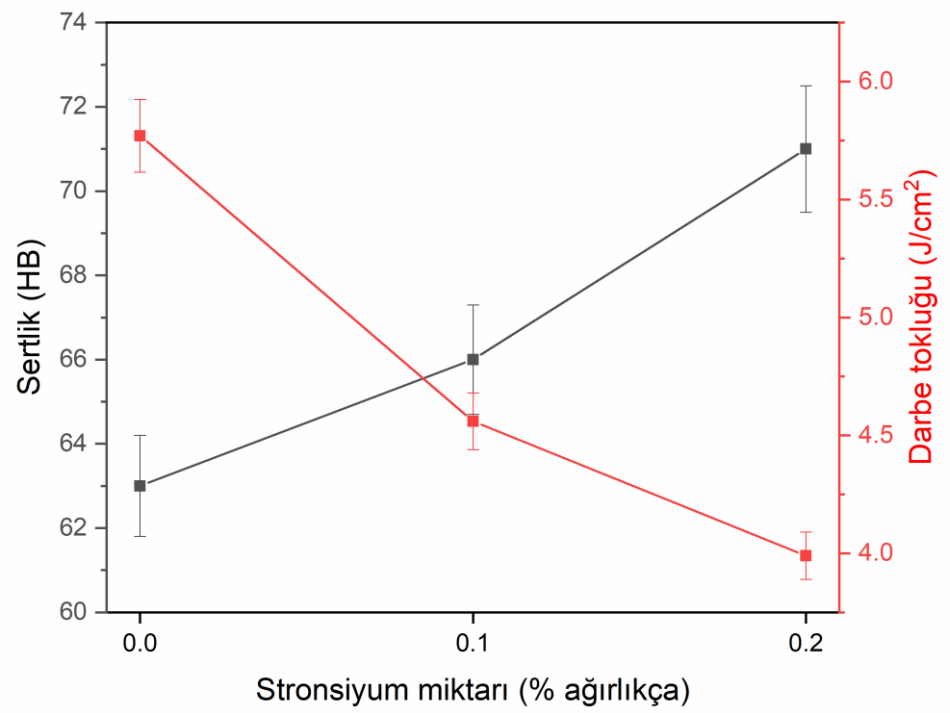
Tablo 6. 2 Sertlik değerlenin ortalaması.

Alaşım No	Numune Adı	Brinell Sertlik Değeri HB
1	**AZ91D**	**63**
2	**AZ91D + 0,1 Sr**	**66**
3	**AZ91D + 0,2 Sr**	**71**

Her bir farklı alaşım numunesinden 5'er adet numune alınarak çentik darbe testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, stronsiyum elementi ilavesinin darbe dayanımında gözle görülür bir azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, stronsiyumun Al_4Sr fazını oluşturması ve bu fazın kırılgan özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Çentik darbe testi sonuçları, malzemenin darbe tokluğunun, stronsiyum ilavesi ile negatif yönde etkilendiğini ve dolayısıyla alaşımın darbeye karşı daha kırılgan hale geldiğini ortaya koymaktadır. Testin ortalama sonuçları, Tablo 6.3'te ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 6. 3 Çentik darbe testi ortalama değerler.

Numune Adı	Ortalama J/cm^2
AZ91D	**5,70**
AZ91D + 0,1 Sr	**4,56**
AZ91D + 0,2 Sr	**3,99**



Şekil 6. 11 Stronsiyum miktarının sertliğe ve darbe tokluğuna etkisi

Stronsiyum ilavesi ile oluşan Al_4Sr fazı, alaşımda gevrekliği artırarak iç gerilmelerin meydana gelmesine yol açabilmektedir. Bu iç gerilmeler, malzemenin genel yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyerek darbe tokluğunun düşmesine neden olur. Al_4Sr fazının sert ve kırılgan yapısı, alaşımın sertliğini artırırken, aynı zamanda çentik tokluğu gibi darbeye karşı dirençli özelliklerini zayıflatır. Stronsiyum, alaşımın tane sınırlarında birikerek bu sınırların mukavemetini artırmakla birlikte, bu etki darbe tokluğunu olumsuz şekilde etkiler. Tane sınırlarının gevrekleşmesi, malzemenin darbe dayanımını ciddi şekilde düşürerek, genel mekanik performansını zayıflatır.

7
SONUÇ

Magnezyum alaşımlarının mekanik dayanımının artırılması, uygun üretim yöntemi seçimi ve alaşımlama işlemleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, AZ91D magnezyum alaşımına sırasıyla %0,1 ve %0,2 oranlarında stronsiyum elementi ilave edilerek tane modifikasyonu yapılmış ve bunun mikroyapı, mekanik dayanım ve korozyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen alaşımların çeşitli deneysel testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. AZ91D magnezyum alaşımının mikroyapısında α-Mg ve β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazlarının bulunduğu gözlemlenmiştir. AZ91D alaşımları dentritik bir yapıya sahip olup, %0,1 Sr ve %0,2 Sr ilavesiyle tane boyutunda sırasıyla 116 µm'den 87 µm'ye ve 87 µm'den 61 µm'ye kadar bir küçülme meydana gelmiştir. Bu küçülme, stronsiyum ilavesinin tane yapısı üzerinde belirgin bir etki oluşturarak, alaşımın mikro yapısındaki iyileşmelere işaret etmektedir.
2. Stronsiyum, AZ91D magnezyum alaşımında β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının hacim oranını azaltarak daha ince bir dentritik ağ yapısı oluşturur. Stronsiyum ilavesiyle bu dentritik yapılar daha fazla yüzey alanı sağlayarak, mekanik özelliklerin iyileşmesine ve dolayısıyla sertliğin artmasına katkı sağlar. Ayrıca, stronsiyum α-Mg matrisine katılarak dislokasyon hareketini engeller, bu engelleme ise sınırlı bir şekilde sertliğin artmasına yol açmıştır.
3. AZ91D magnezyum alaşımına ilave edilen stronsiyum oranı arttıkça, Al_4Sr fazının oluşumu da artmıştır. Hall-Petch bağıntısına göre, bu fazın tane sınırlarında dislokasyon hareketlerini kısıtlayıcı bir etkisi olduğu için mukavemet artışı sağladığı düşünülmektedir. AZ91D magnezyum alaşımına sırasıyla %0,1 ve %0,2 stronsiyum ilavesiyle çekme mukavemeti sırasıyla %9,7 ve %15,5 oranında artmıştır. Bununla birlikte, sertlikteki artışla birlikte, yüzde uzama değerleri ortalama olarak sırasıyla %9,5 ve %22 oranında azalmıştır.

4. AZ91D magnezyum alaşımına stronsiyum eklenmesiyle Al_4Sr fazı oluşur. Bu faz, kırılgan bir yapıya sahip olduğundan, stronsiyum ilavesiyle darbe tokluğunda azalma meydana gelir.
5. Literatürde yer alan çoğu çalışma genellikle laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilirken, bu çalışmamız endüstriyel ölçekte ve gerçek endüstriyel koşullarda yapılmıştır.
6. AZ91D magnezyum alaşımına stronsiyum ilavesi ile ortalama tane boyutunda gözlemlenen küçülme ve mekanik dayanımda meydana gelen artış, önceki araştırmalarda elde edilen bulgularla paralellik göstermektedir.
7. Stronsiyum ilavesinin yüzde uzama değerlerinde artışa yol açtığı literatürde bildirilmiş olsa da, bu durumun tersine de etkilerinin olabileceği belirtilmiştir. Ancak, bizim çalışmamızda stronsiyum ilavesi ile yüzde uzama değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, stronsiyumun alaşımın mikro yapısındaki değişiklikler ve tane sınırlarında oluşan Al_4Sr fazının etkisiyle ilişkilendirilebilir.

KAYNAKÇA

[1] G. Ünver, ‘‘AZ91 Magnezyum Alaşımına Ti ve Cr Alaşım Elementlerinin İlavesinin Özelliklere Etkisinin İncelenmesi,’’ Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakaya, Türkiye, 2011.

[2] M. Demirci, A. S. Vanlı and A. Akdoğan, ‘‘Savunma sanayinde kullanılan magnezyum alaşımları ve uygulama alanları,’’ Int. J. of Engineering Research and Development., vol. 7, no. 4, pp. 13-20, Dec. 2015.

[3] G. Eroğlu, ‘‘Dünyada ve Türkiye’de Magnezyum,’’ Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 2022.

[4] ASM Specialty Handbook, ‘‘Magnesium and Magnesium Alloys,’’ ASM Int. Handbook Committee, United States of America, pp. 305-415, 1999.

[5] F. Öztürk, ‘‘Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesindeki son gelişmeler,’’ Tasarım İmalat Analiz Kongresi, Balıkesir, 2006, pp. 354-361.

[6] Y. Ding, C. Wen, P. Hodgson and Y. Li, ‘‘Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable,’’ J. of Materials Chemistry B., 2014.

[7] L. Lihua, Z. Xiquin, L. Xianfeng, W. Haowei and M. Naiheng, ‘‘Effect of silicon on damping capacities of pure magnesium an magnesium alloys,’’ Materials Latters., vol. 61, no. 1, pp. 231-234, jan. 2007.

[8] J. P. Weiler, ‘‘The role of the $Mg_{17}Al_{12}$-phase in the high-pressure die cast magnesium-aluminum alloy system,’’ Journal of Magnesium and Alloys., vol. 11, no. 11, pp. 4235-4246, nov. 2023.

[9] D. Kapinos, B. Augustyn and M. Szymanek, ‘‘Methods of introducing alloying elements into liquid magnesium’’ Metallurgy and Foundry Eng., vol. 40, no. 3, pp. 141-160, july. 2015.

[10] K. Hazeli, A. Sadeghi, M.O. Pekguleryuz and A. Kontsos, ‘‘The effect of strontium in plasticity of magnesium alloys,’’ Materials Science and Eng., vol. 578, pp. 383-393, Aug. 2013.

[11] B. Ayvalı, ‘‘Stronsiyum Magnezyum Silikat Esaslı Fosforesans Malzemelerde Nadir Toprak Elementlerinin Fosforesan Özellikleri Etkileri,’’ Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.

[12] M. Öbekcan, ‘‘Mg-%33Sn Alaşımına Stronsiyum İlavesinin Özelliklere Etkisinin İncelenmesi,’’ Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2012.

[13] R. K. Mishra, A. K. Grupta, P. R. Rao, A. K. Sachdev, A. M. Kumar and A. A. Luo, ‘‘Influence of cerium on the texture and ductility of magnesium extrusions,’’ Scripta Materialia., vol. 59, pp. 562-565, Sept. 2008.

[14] Y. Türe, ‘‘Seryumlu Magnezyum Alaşımları Geliştirme ve Bunların Karakterizasyonu,’’ Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2016.

[15] S. F. Liu, B. Li, X. H. Wang, W Su and H. Han, ‘‘Refinement effect of cerium, calcium and strontium in AZ91 magnesium alloy,’’ Journal of Metarials Processing Technology, vol. 209, no. 8, pp. 3999-4004, Apr. 2009.

[16] M. Suresh, A. Srinivasan, K. R. Ravi, U. T. S. Pillai and B. C. Pai, ‘‘Influence of boron addition on the grain refinement and mechanical properties of AZ91 Mg alloy,’’ Metarials Science and Engineering, vol. 525, no. 1-2, pp. 207-210, Nov. 2009.

[17] V. Şalomeev, G. Tabunshchyk, V. Greshta, M. Nykiel and K. Korniejenko, ‘‘Influence of alkaline earth metals on structure formation and magnesium alloy properties,’’ Materials 15., no. 12, Jun. 2022.

[18] L. C. Kumruoğlu and K. İnce, ‘‘Investigation of the effect of addition of Ce (Cerium) to Mg-4Sb-2Al alloy produced by high pressure die casting method,’’ Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 37, no. 3, pp. 1373-1385, 2022.

[19] S. Keskin, ‘‘Kalay ve Çinko Elementlerinin Magnezyum Metaline İlavesi ve Özelliklerinin İncelenmesi,’’ Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Müh., Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2011.

[20] F. O. Edoziuno, A. A. Adediran, P. O. Emereje, R. O. Akaluzia and T. C. Jen, ‘‘Development of lightweight, creep resistant Mg-Zn-Al alloys for automotive applications: Influence of micro-additions of quaternary element,’’ Results in Eng., vol. 21, 2024.

[21] D. Zhang, D. Zhang, D. Bu, X. Li, K. Guan, Q. Yang, S. Liu, X. Liu and J. MENG, ‘‘Effects of minor Sr addition on the microstructure, mechanical properties and creep behavior of high pressure die casting AZ91-0.5RE based alloy,’’ Materials Science and Eng., vol. 693, pp. 51-59, May 2017.

[22] G. D. Tong, H. F. Liu and Y. H. Liu, ‘‘Effect of rare earth additions on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys,’’ Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 20, pp. 336-340, July 2010.

[23] Y. You, L. Youngbing, Q. Shuying and F. Yi, ‘‘High cycle fatigue properties of die-cast magnesium alloy AZ91D with addition of different concentrations of cerium,’’ Journal of Rare Earths, vol. 24, pp. 591-595, Oct. 2006.

[24] S. F. Liu, L. Y. Liu and L. G. Kang, ‘‘Refinement role of electromagnetic stirring and strontium in AZ91 magnesium alloy,’’ Journal of Alloys and Compounds, vol. 450, no. 1-2, pp. 546-550, Feb. 2008.

[25] A. Afshamaderi, M. Emamy, J. R. Ghani and M. Lotfpour, ‘‘Microstructure evolution and mechanical properties of the AZ91 magnesium alloy with Sr and Ti additions in the as-cast and as-aged conditions,’’ Journal of Materials Eng., vol. 28, pp. 6853-6863, Oct. 2019.

[26] Z. Feng, E. Wang, M. Zhang, X. Li and C. Su, ‘‘Effect of Ce on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy,’’ Journal of Physics Conference, 9th Int. Conf. on Advanced Manufaturing Tech. and Mat. Science, Pekin, Chinese, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2174/1/012060.

[27] A. S. Vanlı, ‘‘Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması,’’ Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.

[28] A. Uğur, ‘‘Basınçlı Döküm Yöntemi ile Üretilen Zn-Al Esaslı Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi,’’ Doktora Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.

[29] D. Dafan, A. Jiatuo, D. Anping and B. Sun, ‘‘A Review of The Progress and Challenges of Counter-Gravity Casting,’’ Journal of Materials Science and Technology., vol. 216, pp. 1-26, May. 2024.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Y. Turan, R. Gecü ve A. S. Vanlı, ‘‘AZ91 Serisi Magnezyum Alaşımlarının Soğuk Kamaralı Basınçlı Döküm Yöntemi ile Üretiminde Alaşım Modifikasyonu,’’ 3. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, İstanbul, 2024, s. 323.