

**OTOMOTİV SEKTÖRÜ İÇİN YENİLİKÇİ MAGNEZYUM
ALAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASLI ÖNÜR

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
MAYIS- 2021**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜ İÇİN YENİLİKÇİ MAGNEZYUM
ALAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASLI ÖNÜR

(ORCID ID: 0000-0003-3728-4409)

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Danışman

DOÇ. DR. HÜSEYİN ŞEVİK

(ORCID ID: 0000-0002-2065-412X)

**MERSİN
MAYIS- 2021**

ÖZET

OTOMOTİV SEKTÖRÜ İÇİN YENİLİKÇİ MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu yüksek lisans çalışmasında Mg-5Sn-2Al alaşımına farklı ağırlık oranlarında seryum ilavesi gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi indüksiyon ergitme fırınında SF₆ ve CO₂ karışım gazı kullanılarak kontrollü atmosfer altında silisyum karbür (SiC) potalar içerisinde yapılmıştır. Üretimler 100 tonluk 76 kN kapatma kuvvetine sahip endüstriyel soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretilen alaşımlardan elde edilen numunelere sertlik, oda ve yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme testleri uygulanmıştır. Üretim ve deneyler sonrası her bir alaşımdan elde edilen sonuçlar X-ışınları analizleri, alan taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve EDS analizleri ile desteklenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda; Mg-5Sn-2Al alaşımının mikro yapısının α -Mg ve Mg₂Sn intermetalik fazlardan oluştuğu, Seryum ilavesi ile Mg-5Sn-2Al alaşımının dane boyutunun azaltılarak Ce₅Sn₄ intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Seryum ilavesi Mg-5Sn-2Al alaşımının mikro sertliğini 51 HV'den 60 HV'ye yükseltmiştir. Mg-5Sn-2Al alaşımının mekanik özellikleri oda sıcaklığında çok fazla değişmese de, yüksek sıcaklıkta iyileşme gözlenmiştir. Deneysel alaşımların sürünme test sonuçlarına göre Mg-5Sn-2Al alaşımının sürünme direnci seryum ilavesi ile geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mg-5Sn-2Al alaşımı, seryum ilavesi, mikroyapı, mekanik özellikler, otomotiv sektörü, yenilikçi alaşım.

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ŞEVİK, Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF INNOVATIVE MAGNESIUM ALLOYS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

In this master's study, cerium was added to Mg-5Sn-2Al alloy in different weight ratios. The melting process was carried out in silicon carbide (SiC) crucibles under controlled atmosphere using SF₆ and CO₂ mixed gas in an induction melting furnace. The productions were carried out in an industrial cold chamber pressure casting machine with a 100 tons of 76 kN closing force. Hardness, room and high temperature tensile and creep tests were applied to the samples obtained from the produced alloys. The results obtained from each alloy after production and experiments were supported by X-ray analyzes, field scanning electron microscopy (FE-SEM) and EDS analysis.

As a result of the work done; It was determined that the microstructure of the Mg-5Sn-2Al alloy consisted of α -Mg and Mg₂Sn intermetallic phases, and the grain size of the Mg-5Sn-2Al alloy was reduced and the Ce₅Sn₄ intermetallic phase was formed with addition of cerium. The addition of cerium increased the micro hardness of the Mg-5Sn-2Al alloy from 51 HV to 60 HV. The test results observed that Ce addition has no notable effect on the tensile properties at room temperature but has a positive effect at elevated temperatures. Furthermore, creep properties of the Mg-5Sn-2Al alloy was obviously improved by adding Ce. The values of stress exponents and activation energy indicated that the dominant creep mechanisms of the alloys were identified dislocation climb controlled creep.

Keywords: Mg-5Sn-2Al alloy, cerium addition, microstructure, mechanical properties, automotive industry, innovative alloy.

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ŞEVİK, Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bana her konuda destek olan, tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren sayın hocalarım Doç. Dr. Hüseyin ŞEVİK ve Dr. Öğretim Üyesi Güven YARKADAŐ'a sonsuz teşekkür ederim.

Eğitim ve çalışma hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen başta annem H. Gül ÖNÜR'e, babam S. Dođan ÖNÜR'e, ağabeyim Okan ÖNÜR'e yanımda oldukları için teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK.....	i
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR	vii
TABLOLAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER.....	xi
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMALARI	2
2.1. Magnezyum.....	2
2.1.1. Magnezyum Alaşımının Sınıflandırılması	6
2.1.2. Magnezyum Alaşımaları	8
2.1.3. Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkileri	10
2.1.4. Magnezyum-Alüminyum (Mg-Al) Alaşımaları.....	12
2.1.5. Magnezyum-Alüminyum-Silisyum (Mg-Al-Si) Alaşımaları	14
2.1.6. Magnezyum-Alüminyum-Stronsiyum (Mg-Al-Sr) Alaşımaları	14
2.1.7. Magnezyum-Kalay (Mg-Sn) Alaşımaları	16
2.2. Magnezyum Alaşımının Kullanım Alanları.....	17
2.2.1. Magnezyum Alaşımının Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamaları	20
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	25
3.1. Alaşımın Üretilmesi	25
3.2. Mikroyapı İncelemesi.....	26
3.3. Mekanik Testler	27
3.3.1. Çekme Testi	27
3.3.2. Sürünme Testi	28
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	29
4.1. Mikroyapı ve Karakterizasyon.....	29
4.2. Çekme Testleri.....	35
4.3. Sürünme Davranışı	36
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR.....	41
ÖZGEÇMİŞ	46

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Alüminyum, magnezyum ve çeliğin bazı özelliklerinin kıyaslanması	2
Tablo 2.2. Bazı metallerin yer kabuğundaki oranı	3
Tablo 2.3. Magnezyum metalinin genel özellikleri	4
Tablo 2.4. Magnezyum elementine ilave edilen alaşım elementlerinin ASTM sisteminde tanımlanması	6
Tablo 2.5. Malzemenin saflık derecesini temsil eden harfler ve tanımlama ifadeleri	6
Tablo 2.6. Magnezyum alaşımları için menevişleme gösterimi	7
Tablo 2.7. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94)	8
Tablo 2.8. Magnezyum alaşımlarının avantajları ve dezavantajları	9
Tablo 4.1. Alaşım elementinin Mg-5Sn-2Al alaşımının tane büyüklüğü üzerindeki etkisi	29
Tablo 4.2. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran	36
Tablo 4.3. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran	37
Tablo 0.4. Farklı Seryum konsantrasyonlu Mg-5Sn-2Al'nin oda sıcaklığı ve yükseltilmiş sıcaklıkta gerilme özellikleri ve mikro sertliği	36
Tablo 0.5. Deneysel alaşımların 180°C ve 210°C 'de sürünme özellikleri	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. a) Magnezyumda alt tane oluşumu b) magnezyumda bazal kayma ve ikizlenme c) yüksek sıcaklıkta tane sınırı kayması	5
Şekil 2.2. Başlangıç düzeninde Piramidal düzlemler; a) Prizma, b) Piramidal	5
Şekil 2.3. Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı	13
Şekil 2.4. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü	14
Şekil 2.5. Si'li Mg alaşımının mikro yapısı	14
Şekil 2.6. Magnezyum-Stronsiyum ikili denge diyagramı	15
Şekil 2.7. Basınçlı döküm alaşımların mikro yapısı a) AJ51(Mg-5Al-1Sr) b) AJ62L (Mg-6Sr-1.6Sr) alaşımları ile Sr/Al oranı 0,3 den düşük, Al ₄ Sr ikincil faz, c) AJ52(Mg-5Al-2Sr) ve d) AJ62L (Mg6Al-2Sr) alaşımları ile Sr/Al oranı 0,3 den yüksek ve iki tür ikincil faz mevcut, Al ₄ Sr ve Mg-Al-Sr üçlü bileşeni	16
Şekil 2.8. Magnezyum-Kalay ikili denge diyagramı	17
Şekil 2.9. Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki	21
Şekil 2.10. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar	21
Şekil 2.11. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler	22
Şekil 2.12. a) Şanzıman VW, b) Yakıt deposu kapağı	22
Şekil 2.13. a) Direksiyon mili tutucusu ve braketleri, b) kontrol paneli	23
Şekil 2.14. a) Koltuk kasası, b) bagaj kapağı	23
Şekil 2.15. Hafif tasarımlı araba kabin kapısı	24
Şekil 3.1. İndüksiyon ergitme fırını	26
Şekil 3.2. Soğuk hazneli yüksek basınçlı döküm cihazı (HPDC)	26
Şekil 3.3. Ce ilavesi ile elde edilen Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşım numuneleri.....	27
Şekil 3.4. Çekme test cihazı	27
Şekil 3.5. Sürünme test cihazı	28
Şekil 4.1. Alaşımların XRD modeli	29
Şekil 4.2.1. Mg-5Sn-2Al alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı	30
Şekil 4.2.2. Mg-5Sn-2Al alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı	30
Şekil 4.2.3. Mg-5Sn-2Al-1Ce alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı.....	30
Şekil 4.2.4. Mg-5Sn-2Al-1Ce alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı.....	30
Şekil 4.2.5. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı.....	30
Şekil 4.2.6. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı.....	30
Şekil 4.3.1. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizi (1).....	33
Şekil 4.3.2. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizi (2).....	33
Şekil 4.4.1. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizi (3)	34
Şekil 4.4.2. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizi (4)	34
Şekil 4.5. Oda sıcaklığında farklı Ce ilavesiyle Mg-5Sn-2Al alaşımının çekme testi eğrileri.....	35
Şekil 4.6. 180°C'de Mg-5Sn-2Al, Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımlarının geleneksel sürünme eğrileri; a) 40 MPa, b) 50 MPa.	38
Şekil 4.7. 180°C'de deneysel alaşımlar için gerilme üslerinin belirlenmesi için $\ln \epsilon$ ile $\ln \sigma'$ arasındaki eğimin grafiği.....	39
Şekil 4.8. 50MPa uygulanan stres altında deneysel alaşımlar için ikincil sünme hızlarının sıcaklığa bağımlılığı	39

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
°C	Santigrat derece
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
ϵ	Uzama
EDS	Enerji Dağılım Spektrofotometresi
HPDC	Yüksek Basıncılı Pres Döküm Makinesi
HV	Vickers sertlik birimi
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
km	Kilometre
kN	Kilonewton
kW	Kilowatt
max	Maksimum
min	Minimum
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
\emptyset	Çap
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TYS	Akma dayanımı
UTS	Maksimum çekme dayanımı
XRD	X Işınları Kırınımı Cihazı
μm	mikrometre

1.GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv sektöründe elektrikli araçların geliştirilmesine verilen önem öylesine artmıştır ki; uzun yıllardır çalışma konu başlıklarından biri olan araç ağırlığının düşürülmesi konusu daha da kritik hale gelmiştir. Ayrıca ağırlık azaltılması CO₂ emisyonunun azalmasına da önemli katkı sağlayarak daha çevre dostu bir ulaşımı mümkün kılmaktadır. Örneğin araçlarda %10'luk ağırlık azalması 100km'de 0,3-0,5 litre arasında daha az yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu demektir. Bu nedenle otomotiv sektöründe hafif metallik malzemeler önemini her gün arttırmaktadır. Magnezyum (Mg) alaşımları sahip oldukları düşük yoğunluk ve iyi mukavemet/ağırlık oranı ile otomotiv sektöründe kullanılan en hafif yapısal alaşımlardan biridir. Fakat magnezyum alaşımlarının düşük yoğunluğuna rağmen otomotiv sektöründe kullanımı istenenin oldukça altındadır. Bunun ana nedeni mevcut alüminyum alaşımlarından daha iyi mekaniksel özellik ve korozyon direnci sağlayan magnezyum alaşımlarının çeşitliliğinin çok az olmasıdır. En önemli rakibi olan alüminyum alaşımları ile rekabet gücünün artırılması ancak magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta özelliklerinin artırılması ile mümkündür. Bunu sağlamanın alaşım geliştirme, kompozit üretimi veya ısıl işlem gibi birçok farklı yolu mevcuttur. Bu yollardan en önemli olanı farklı alaşım elementlerinin ilavesi ile yenilikçi Mg alaşımı geliştirmektir.

Bu yüksek lisans çalışmasında Mg-5Sn-2Al alaşımına farklı ağırlık oranlarında seryum ilavesi gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi 15kw kapasiteli indüksiyon ergitme fırınında SF₆ ve CO₂ karışım gazı kullanılarak kontrollü atmosfer altında silisyum karbür (SiC) potalar içerisinde yapılmıştır. Üretimler 100 tonluk 76 kN kapatma kuvvetine sahip endüstriyel soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretilen alaşımlardan elde edilen numunelere sertlik, oda ve yüksek sıcaklıkta çekme ve sürünme testleri uygulanmıştır. Üretim ve deneyler sonrası her bir alaşımdan elde edilen sonuçlar X-ışınları analizleri, alan taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve EDS analizleri ile desteklenmiştir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Magnezyum

Magnezyum elementi yapı bileşenleri içerisinde oldukça düşük yoğunluğa sahip elementlerden biridir. Bu özelliği, onu ağırlık azaltmanın önemli olduğu uygulamalarda ön plana çıkararak çekici kılmaktadır, mühendislik uygulamaları için magnezyum alaşımları çok iyi bir tercih olmaktadır. Tablo 2.1.'de alüminyum, magnezyum ve çeliğin yoğunluklarının ve bazı özelliklerinin kıyaslandığı görülmektedir [1].

Magnezyum, doğada en yaygın elementlerden biri olup, sekizinci sırada yerini almaktadır. Deniz suyunun her 10 metreküpünde yaklaşık 1,3 kilogram magnezyum bulunmaktadır. Magnezyumun elde edilme yöntemleri termal ve elektrokimyasal yöntemlerle olmaktadır. Magnezyum metali; magnezit ($MgCO_3$), karnolit ($K_2MgCl_4 \cdot 6H_2O$) veya dolomit $MgCa(CO_3)_2$ cevherlerinden, deniz suyundan, yapay tuzlu sulardan, doğal yer altı sularından veya tuz depozitlerinden üretilir. Magnezyum üretimi iki şekilde gerçekleştirilir. Ergimiş Magnezyum klorürün ($MgCl_2$) indirgenme prensibine göre Magnezyum üretimi yöntemlerden biriyken, diğeri ise elektroliz yöntemiyle olup, dolomitten kimyasal yollarla çökeltme ve arıtma işlemiyle Magnezyum üretilmesidir. İkinci yöntem doğrudan tuzlu sulardan elde edilen magnezyum oksitin (MgO) termal redüksiyonu ile üretimidir [1-2].

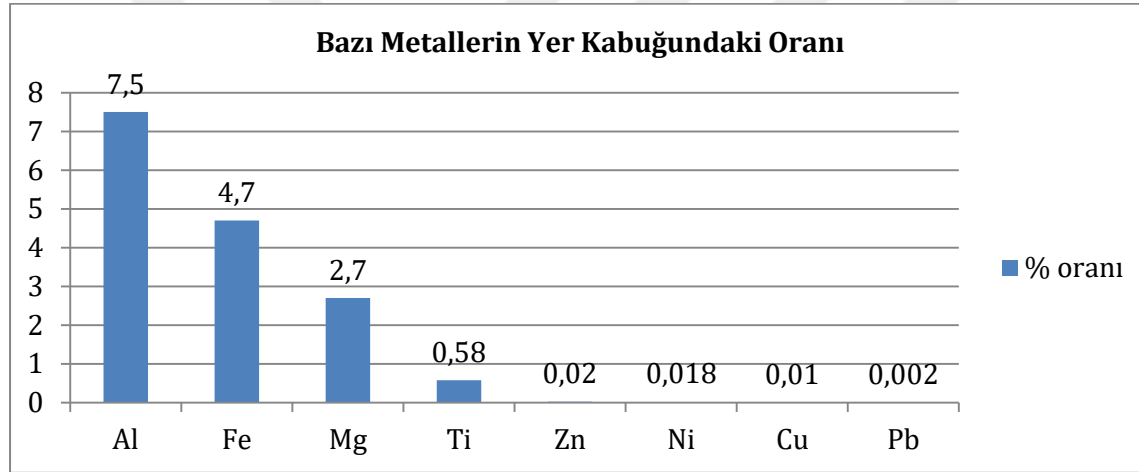
Tablo 0.1. Alüminyum, magnezyum ve çeliğin bazı özelliklerinin kıyaslanması [1]

Özellik	Magnezyum	Alüminyum	Çelik
Yoğunluk(ρ) (gr/cm ³)	1,74	2,7	7,86
Elastikiyet(E) GPa	45	70	211
Akma Dayanımı (YS) MPa	150	200	250
Kopma Dayanımı (UTS) MPa	250	300	400
Erime Noktası (T) (°C)	600	650	1500
E/ ρ	26	26	27
YS/ ρ	86	74	32
UTS/ ρ	144	112	51

Magnezyumun alüminyuma göre süneklik, gürültü ve titreşim sönümleme özellikleri daha iyidir. Dökülebilirlik ve işlenebilirlik kabiliyetleri çok iyidir. Kısaca NTM olarak tanımlanan, periyodik tablodaki 17 metalik elementi kapsayan nadir toprak metalleri ile yaptığı alaşımlarda yüksek direnç/ağırlık değerleri elde edilmekte ve bu özellikleri sadece demir ve bakır gibi metallere değil alüminyuma da tercih edilmelerine olanak sağlamaktadır [1].

Magnezyum alüminyumdan %36, demirden %78 daha hafif bir elementtir. En yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip yapı malzemesidir. Bu nedenle modern teknoloji olan uzay, uçak ve otomotiv parçalarının üretiminde kullanılan önemli bir malzeme olup, tercih edilen bir malzemedir. 1970 yılında yaşanan yakıt krizi ile birlikte, düşük emisyon ve yakıt tüketiminin azaltılmasının sağlanması amacıyla araçların ağırlıkları düşürülmeye çalışılmaktadır [6].

Tablo 0.2. Bazı metallerin yer kabuğundaki oranı [5]



Tablo 2.2’de yer kabuğundaki bazı önemli metallerin oranları gösterilmiştir. Yer kabuğunun yaklaşık olarak %7,5’ini Alüminyum, % 4,7’ünü Demir ve %2,7’sini Magnezyum oluşturmaktadır. Magnezyum metalinin üretimi çeşitli ham maddelerden elde edilebilmektedir. Magnezyum elementi, günümüzde kullanılabilir en düşük yoğunluğa sahip metaldir. Ticari olarak kullanılan magnezyum minerali, 10’dan fazla ülkede 30’dan fazla önemli yatakta 380 milyon ton olarak çıkarılmakta olup, ABD, Kanada, Norveç, Brezilya, Avusturya, Türkiye, Çekoslovakya, Rusya, Yunanistan, Çin, Hindistan, Avustralya ve K.Kore dünyadaki en büyük magnezyum yataklarından bazılarıdır [5].

Magnezyum üretimi ilk olarak Birinci Dünya Savaşı döneminde önem kazanmıştır. Magnezyum savaş öncesi dönemlerde fişek yapımında kullanılırken, I. Dünya Savaşı döneminde birçok ülke tarafından üretilmeye başlanmıştır. Alaşımlarındaki tane inceltici etkisi ve hafifliğe karşı iyi olması gibi bazı sahip olduğu özellikleri Magnezyumun yapısal uygulamalarda kullanılmasına sebebiyet vermiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında Magnezyum metaline olan

istem artmıştır. Sadece ABD’de 1938 yılından 1943 yılına, 5 yıldaki üretim yaklaşık 8 kata kadar yükselmiştir. Savaş süresince askeri amaçlı kullanımlar, hava taşıtları ve yapısal uygulamalar öncelikli olmak üzere motor parçaları, uçak iskeletleri ve iniş takımlarında da hızla kullanılmaya başlanmıştır. Magnezyum günümüze kadar endüstrinin birçok alanında kullanılmış ve bu elemente günden güne rağbet artmıştır. 2009 yılında Mg metalinin %33’lük kısmı Çin, %17’lik kısmı Kanada, diğer %17’lik kısmı ABD, %11’lik kısmı Norveç ve %22’lik kısmı ise de diğer ülkeler tarafından üretilmiştir [2].

Magnezyum, periyodik cetvelde 2A grubunda bulunmakta, Mg simgesiyle gösterilmekte ve atom numarası 12 olan bir elementtir. 3 s² elektron düzenine sahip toprak alkali bir element olan Magnezyumun atom hacmi 14 mA/d, atom ağırlığı 24.312 g/mol, özgül ısısı 0,25 cal/g°C olup, ergime noktası 650°C, kaynama noktası 1090°C’dir. Çekme dayanımı 80-180 MPa’dır. Doğada saf olarak bulunamayan genellikle oksit halde ve diğer elementlerle bileşik halinde bulunan bir elementtir. Endüstride artış gösteren kullanımı nedeniyle Mg, sanayi metalleri arasında yerini almaktadır [2-4].

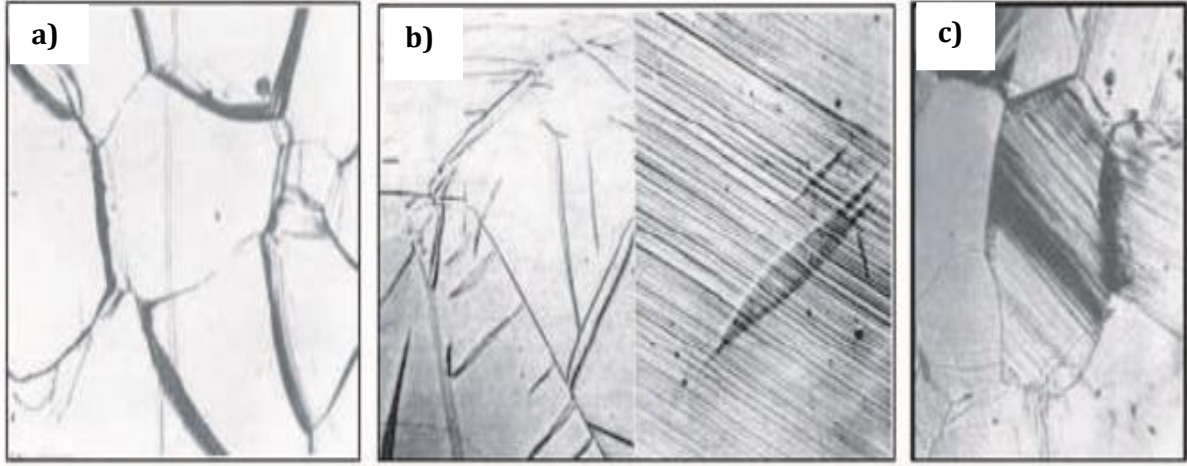
Çoğu teknolojik uygulamada saf metalik magnezyum, talep edilen ve ihtiyaç duyulan özellikleri karşılayamamaktadır. Kullanım alanına göre değişmekle birlikte uygulamalarda istenen özelliklerden bazıları mukavemet, korozyon ve sürünme direnci, süneklik gibi özellikler olup, magnezyumun alaşımlandırılması bu özellikleri elde etmek için gerçekleştirilir [5]. Saf Magnezyumun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.3’de belirtilmiştir [2-4].

Tablo 0.3. Magnezyum metalinin genel özellikleri [2,4]

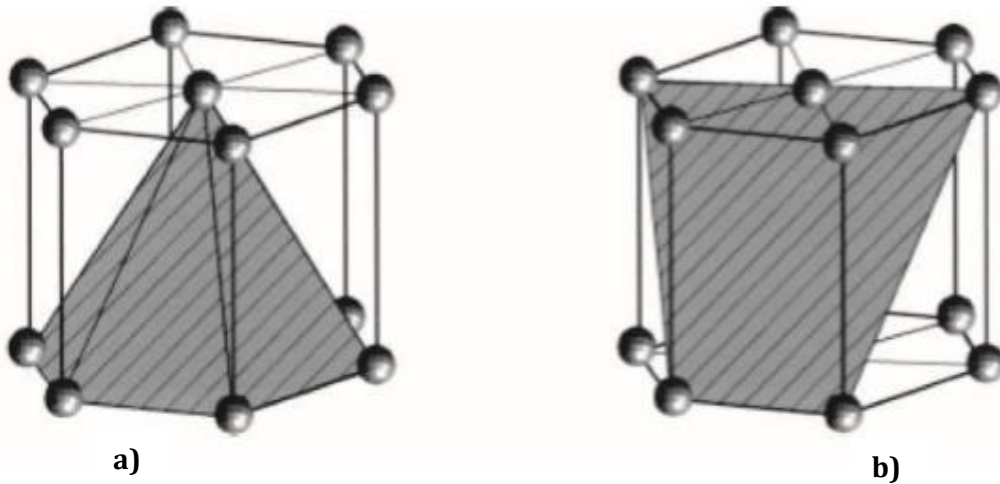
Simgesi	Mg	Elektron düzeni	3 s ²
Atom Numarası	12	Kristal yapısı	Hegzagonal (HSP)
Atom ağırlığı (g/mol)	24.312	Çekme Dayanımı (MPa)	80-180
Kaynama noktası (°C)	1090	Young Modülü (GPa)	45
Ergime noktası (°C)	650±0,5	Atom hacmi (mA / d)	14,0
Yoğunluğu (g/cm ³)	1,74	Özgül ısısı (cal/g °C)	0,25

Magnezyum, hegzagonal sıkı paket yapıya sahip bir metaldir. Bu metalin diğer kristal yapılar ile kıyaslandığında daha az kayma sistemine sahip olduğu görülmektedir ve bundan dolayı magnezyumu bilhassa düşük sıcaklıklarda deforme edebilmek oldukça sınırlıdır [7, 8].

Oda sıcaklığındaki kayma sistemi $\{0001\}$ bazal düzleminde $\langle 1120 \rangle$ yönünde olup, 225°C üzerinde $\{1011\}$ ve $\{1012\}$ piramidal ve $\{1010\}$ prizma kayma düzlemleri aktiftir. Oda sıcaklığı deformasyonu başlıca bazal düzlemlerdeki kaymalar ile sağlanır. 225°C de aktifleşen piramidal düzlemler plastik deformasyon yeteneğinde artmaya sebep olur. Yapılan çalışmalarda saf magnezyumda $90\text{-}300^\circ\text{C}$ 'de, $8\text{-}70\text{MPa}$ gerilme aralığında, $\{0001\}$ düzleminde ikizlenme, bazal kayma ve alt tane oluşumu gözlemlenmiş ve bu durum Şekil 2.1.a ve Şekil 2.1.b'de görülmektedir. Bunlar birincil sürünme bölgesindeki mekanizmalardır. Şekil 2.1.c'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda, 250°C üzeri, bazal olmayan piramidal ve prizma kayma düzlemlerinde tane sınırı deformasyonu ve kayması meydana gelir. Magnezyum metalinde oluşan piramidal düzlemler de Şekil 2.2'de gösterilmektedir [5,7,8-11].



Şekil 0.1. a) Magnezyumda alt tane oluşumu b) magnezyumda bazal kayma ve ikizlenme c) yüksek sıcaklıkta tane sınırı kayması [7].



Şekil 0.2. Başlangıç düzeninde Piramidal düzlemler; a) Prizma, b) Piramidal [5]

2.1.1. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Magnezyum alaşımlarının tanımlanması ASTM sisteminde standartlaştırılmıştır. Tanımlama iki harfle birlikte iki rakamı kapsar. Standartta bulunan ilk iki harf en yüksek oranda ilave edilmiş iki alaşım elementini ifade ederken, sonrasındaki rakamlar bu alaşımların en yakın tam sayıya yuvarlanmış yüzdelik oranlarını gösterir.

Standartlaştırmada her bir alaşım dört tanımlama bölümünden oluşur.

- Birinci tanımlama bölümünde alaşımın ana alaşım elementleri belirtilir. Tanımlama yapılırken harfler kullanılır. Yaygın şekilde kullanılan alaşım elementlerinin tek harfle tanımlanması Tablo 2.4'te belirtilmiştir [5,12].

Tablo 0.4. Magnezyum elementine ilave edilen alaşım elementlerinin ASTM sisteminde tanımlanması [5,12].

Kısaltma Harfi	Alaşım Elementi	Kısaltma Harfi	Alaşım Elementi	Kısaltma Harfi	Alaşım Elementi	Kısaltma Harfi	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	F	Demir	M	Manganez	S	Silisyum
B	Bizmut	H	Toryum	N	Nikel	T	Kalay
C	Bakır	J	Stronsiyum	P	Kurşun	W	Yitriyum
D	Kadmiyum	K	Zirkonyum	Q	Gümüş	Y	Antimuan
E	Nadir elementler	L	Lityum	R	Krom	Z	Çinko

- İkinci tanımlama bölümünde, her bir ana alaşım elementinin yüzde ağırlıkça değerleri belirtilmektedir.
- Üçüncü tanımlama bölümü, alaşımın kendi içinde tanımlanmasını belirtmektedir. Genelde malzemenin saflık derecesini temsil etmekte ve Tablo 2.5'te gösterilmektedir.

Tablo 0.5. Malzemenin saflık derecesini temsil eden harfler ve tanımlama ifadeleri [5,12].

Kısaltma Harfi	A	B	C	D	E
Tanımladığı İfade	1. bileşim	2. bileşim	3. bileşim	Yüksek saflık	Yüksek korozyon direncini

- Dördüncü tanımlama bölümünde ise, alaşıma uygulanan ısıl işlem belirtilmektedir. Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler Tablo 2.6'te gösterilmiştir.

Tablo 0.6. Magnezyum alaşımları için menevişleme gösterimi [12].

Gösterim		Açıklama
TEMEL BÖLÜMLER	F	Üretildiği gibi
	O	Tavlanmış ve yeniden kristalleşme işlemi uygulanmış (sadece dövme alaşımları için geçerli)
	H	Gerinin sertleşmesi işlemi gerçekleştirilmiş
	W	Çökelti ısıl işlemine tabi tutulmuş (kararsız menevişleme)
	T	F,O veya H işlemlerinden başka kararlı meneviş işlemlerine tabi tutulmuş
ISIL İŞLEM (T) TÜRLERİ	T1	Soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
	T2	Tavlanmış (sadece döküm alaşımları için)
	T3	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş ve soğuk işlenmiş
	T4	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş
	T5	Soğutulmuş ve yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş
	T6	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş ve yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş
	T7	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş ve kararlı duruma getirilmiş
	T8	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş
	T9	Çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuş, yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş ve soğuk işlenmiş
	T10	Soğutulmuş, yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş ve soğuk işlenmiş

AZ91D-T6 magnezyum alaşımı tanımlama standardına göre incelenirse; A ve Z harfleri alaşımın ana elementleri olduğunu, A harfinin alüminyum, Z harfinin ise çinko alaşım elementi olduğunu, 9 ve 1 rakamlarının alüminyum ve çinko elementlerinin ağırlıkça yüzdeleri belirttiğini ve alaşımda %9 oranında alüminyum, %1 oranında ise çinko elementi olduğunu ifade etmekte olup, D ile belirtilen bölüm üretilen alaşımın yüksek saflık derecesinde olduğunu tanımlamaktadır. T6 ise malzemeye uygulanan ısıl işlemi tanımlamakta, çözeltin ısıl işlemine tabi tutulmuş ve yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiş olduğunu belirtmektedir [5,12].

Magnezyum alaşımlarının bileşim değerlerini belirten ASTM B93/B93M ve ASTM B94 standartları Tablo 2.7'de gösterilmiştir [2].

Tablo 0.7. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) [2].

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4,5-5,3	5,6-6,4	1,9-2,5	3,7-4,8	2,5-3,5	7,8-9,2	8,5-9,5	0,05 max	0,05 max
Zn	0,20 max	0,20 max	0,15-0,25	0,10 max	0,7-1,3	0,2-0,8	0,45-0,90	1,0-1,5	4,8-6,2
Mn	0,28-0,50	0,26-0,50	0,20 min	0,35-0,60	0,20 min	0,15-0,5	0,17-0,40	0,1 max	0,1 max
Si	0,05 max	0,05 max	0,70-1,2	0,6-1,4	0,05 max	0,10 max	0,05 max	0,05 max	0,05 max
Fe	0,004 max	0,004 max	0,004 max	0,035 max	0,005 max	0,05 max	0,004 max	0,03 max	0,03 max
Cu	0,008 max	0,008 max	0,008 max	0,015 max	0,05 max	0,05 max	0,025 max	0,025 max	0,05 max
Ni	0,001 max	0,001 max	0,001 max	0,001 max	0,005 max	0,005 max	0,001 max	0,005 max	0,005 max
Be	-	-	-	-	-	0,002	-	0,002	0,002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0,12-0,25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3-0,9
Diğer	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

2.1.2. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum da diğer birçok metal gibi saf olarak çok nadir kullanılan bir metaldir. Magnezyumun alaşımlandırılması kullanım alanına göre farklılık göstermekle birlikte uygulamalarda talep edilen mukavemet, korozyon ve sürünme direnci, süneklilik gibi özellikleri elde etmek içindir.[5].

Döküm yöntemi ile üretilen magnezyumun birçok özelliğinin iyileştirilmesi için çeşitli alaşım elementleri ilavesi ile alaşımlama yapılmaktadır. Magnezyumun özelliklerini iyileştirmek için uzun yıllar önce başlayan ve halen devam eden araştırmalar yapılmaktadır ve bu yapılan araştırmalar sayesinde bazı magnezyum alaşımları geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan alaşım sistemlerinden en yaygın olarak kullanılanı Mg-Al ikili sistemidir. Magnezyuma alüminyum elementi ilavesinin temel nedenleri mukavemeti, korozyon ve sürünme direncini iyileştirmek ve

dökülebilirliği arttırmak olarak belirtilebilir. En yaygın olarak kullanılan alaşımlardan biri AZ91 alaşımıdır. Yapılan çalışmaların ilki otomobillerin iç bölgesinde bulunan aksamalar olup, direksiyon simidi, kontrol paneli bunlara bazı örnekler olmuştur ve en tanınmış örneklerinden birisi Volkswagen marka arabaların Beetle modeli olarak verilebilir [1,5,9,12,14].

Magnezyum alaşımları mükemmel işlenebilirliğe sahiptir. Bu özelliği ile hafiflik aranan malzemeler için istenen boşluğu doldurur. Fakat magnezyum alaşımları hala alüminyum ve plastikler ile yarışamamaktadır. Bu durumun en büyük sebeplerinden biri düşük ve sabit maliyetlerde piyasaya sunulamaması, diğeri ise doyum sağlayan ve tatmin edici mekanik özelliklerin sağlanamaması olarak belirtilebilir. Magnezyum alaşımları için alaşım geliştirme, hızlı soğuma, üretim teknolojileri, geri dönüşüm, korozyondan korunma ve kompozitler gibi birçok konuda araştırmacılar çalışmalarını sürdürmeye devam etmektedir [9, 15-27]. Yapılan çalışmalarda asıl amaçlanan konular malzemelerin düşük maliyette üretilebilmesi, alaşım çeşitlerinin genişletilmesi, yenilikçi üretim metotlarının geliştirilmesi, korozyon direncinin artırılması, hızlı soğuma proseslerinden faydalanabilme ve magnezyum matriksli kompozitlerin kullanım alanlarının geliştirilmesi olarak belirtilebilir. Magnezyum alaşımları ile üretilen malzemeleri sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.8'de verilmiştir [5,9,12,28].

Tablo 0.8. Magnezyum alaşımlarının avantajları ve dezavantajları [5,9,12,28].

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
<ul style="list-style-type: none"> • Metalik malzemeler arasında en düşük yoğunluğa sahip metaldir. Hafiftir. • Yüksek spesifik mukavemete sahiptir. • İyi dökülebilirlik kabiliyetine sahip olup, basınçlı döküme uygundur. • Yüksek kesme hızında freze ve torna ile kolay işlenebilirlik özelliği bulunmaktadır. • Kontrol altındaki bir atmosferde kaynak edilebilirliği iyidir. • Korozyon direnci son derece iyidir. • Geri dönüşüm özelliği vardır. <p>Polimer malzemelerle kıyaslandığında mekaniksel özellikleri daha iyi, zamanla gevrekleşme özelliği ise ona göre düşük, elektriksel ve ısı iletkenliği daha iyidir.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Geliştirilen alaşımların yetersiz olması sebebi ile birkaç alaşıma sahiptir. • Oda sıcaklığında düşük süneklik ve tokluğa sahiptir. • Soğuk şekillendirilebilirlik sınırlıdır. • Elastisite modülü düşüktür. • Yüksek sıcaklıkta limitli özellikleri bulunur. Örneğin sürünme direnci gibi. • Kimyasal reaksiyona girme yatkınlığı yüksektir. • Yüksek döküm çekilmesine sahiptir. • Üretim maliyetleri yüksektir ve üretici sayısı sınırlıdır.

2.1.3. Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkileri

Magnezyum alaşımları çok sayıda üretim yöntemi ile üretilebilmektedir. Döküm yöntemi ile magnezyum alaşımı üretimi kullanılan yöntemlerden biridir. Magnezyum alaşımları değişiklik gösterdikçe, üretim yöntemleri de değişiklik göstermekte, elde edilen magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri de değişiklik göstermektedir. Magnezyum alaşımları genellikle savunma sanayinde, otomobil parçalarında, diz üstü bilgisayarlarda, cep telefonu ve kamera gibi elektronik aletlerin aksamalarında kullanılmak üzere basınçlı döküm tekniği ile üretilirler [5, 12, 15-18, 30].

Magnezyum metaline ilave edilerek alaşımlandırılmasını sağlayan ve alaşımlarının geliştirilmesinde kullanılan bir çok element bulunmaktadır ve kullanılan alaşım elementlerinin magnezyum metali üzerinde birçok farklı etkisi olmaktadır. Alaşım elementlerinin magnezyum metali üzerindeki etkileri aşağıda belirtilmiştir [5, 9, 26-27, 31- 48].

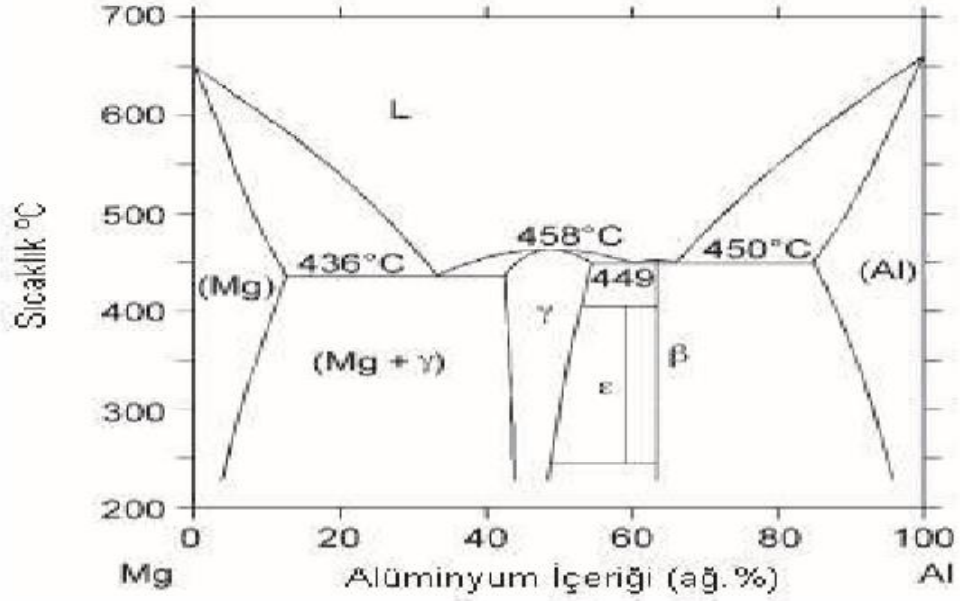
- **Alüminyum (Al):** Döküm alaşımında dayanımı artırır, metal akışını geliştirir ve döküm üzerindeki mikro gözenekleri minimuma indirir. Alüminyum ilavesi ile birlikte alaşımda sertlik, dayanıklılık ve katılma süresini pozitif yönde yükseltmekte, fakat sünek davranışı düşürmektedir. Farklı sertleşme dönüşümleri ile oluşan (katı ve çökelti), $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalığı düşük sıcaklıklarda (<120 °C) oluşarak dayanıklılığı yükseltmektedir. Yüksek oranlarda ilavesi mikro poroziteyi artırmaktadır ve bunun yanında dökülebilirliği artırır.
- **Berilyum (Be):** 30 ppm'den az olan çok düşük konsantrasyonda ilave edilen Be, erimiş metalin yüzeyindeki oksidasyonun azaltılmasında rol oynar. Berilyum, Mg-Al alaşımlarında tane kabalaşmasına sebebiyet verebilir.
- **Çinko (Zn):** Çinko magnezyum içerisinde alüminyumdan sonra en etkili alaşım elementidir. Çinko genellikle oda sıcaklık mukavemetini arttırmak için alüminyum ile birlikte kullanılır. Bununla birlikte %7-10 Al bulunan Mg' ye %1'den fazla Zn ilave edilirse sıcak gevrekliği artırır. Çinko aynı zamanda çökeltme sertleşmesi ile mukavemetlendirilen Mg alaşımları üretmek için Zn, nadir metaller veya Toryum ile birlikte kullanılır. Mg alaşımları içerisinde bulunması muhtemel Demir (Fe) ve Nikel (Ni) emprütelerinin zararlı korozyon etkilerini gidermeye yardımcı olur. Ergimiş metalin akıcılığında artış sağlar, aynı zamanda tane inceltici etkisi bulunmaktadır, buna karşın mikro porozite oluşumuna doğru eğilim gösterdiği görülür.
- **Gümüş (Ag):** Periyodik cetvelde ağır metaller arasında yer alan gümüş elementi, nadir elementler ile yüksek sıcaklıklarda sürünme direncini arttırırken, mukavemet artışını sağlamaktadır, fakat bu artış korozyon direnci için geçerli değildir. Korozyon direncinde tam tersi bir etki göstererek korozyon direncini azaltır.

- **Kalay (Sn):** Magnezyuma yapılan kalay ilavesi ile alaşımın sünekliğinde artış sağlanır. Sıcak işlem sırasında çatlamaya eğilim gösteren alaşımın, çatlama eğiliminin azalmasında etkilidir ve alaşımın işlenebilirlik kabiliyetini artırır. Magnezyuma kalay ilavesi ile birlikte alaşımda Mg_2Sn intermetalik fazı oluşur. Oluşan bu fazın ergime sıcaklığı $770^{\circ}C$ 'dir. Mg-Sn esaslı alaşımlar yüksek sıcaklıklarda yüksek sürünme direncine sahiptir ve bu alaşımlar yüksek sıcaklık uygulamalarına daha uygundur.
- **Kalsiyum (Ca):** Kalsiyumun, magnezyum içerisinde yüksek ayrışması $565^{\circ}C$ 'de %1.34, $200^{\circ}C$ 'de %0'a yaklaşmaktadır. Mg_2Ca 'nın eritilme işlemi $718^{\circ}C$ 'ye ısı çıkartılır. Mg'de Ca az miktarda dağıldığı için katı eriyik de sertleşme oluşumunda etkisi azdır. Ca, alaşımın sürünme direncinde olumlu bir etki yaparak geliştirir ve tane küçülmesinde pozitif etki yapar. Döküm alaşımlarına döküm öncesi hemen eklendiğinde ergimiş şartlardaki hem de döküm işlemi sonrasındaki ısıl işlemde oksidasyonu azaltır. Buna karşın korozyon davranışı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Mg levhaların haddelenebilirliğinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ca ilavesi yaklaşık ağırlıkça %0,3'ün altında olması gerekir, aksi halde levha kaynak esnasında çatlamaya müsait hale gelir.
- **Lityum (Li):** Ortam sıcaklığında Lityum elementi ilavesi ile katı eriyik sertleşmesi oluşur. İlave edilen lityum yoğunluk düşüşü ve süneklik artışı ile etkisini gösterir.
- **Mangan (Mn):** Manganez elementi ilave edildiği magnezyum eriyiğindeki demir içeriğini kontrol etmekte kullanılır. Bu durum Fe-Mn çökelti bileşeni aracılığıyla sağlanır. Alaşımların sürünme direncinde artış sağlayabilir ve demir kontrolü sağlaması ile korozyon direncinde olumlu yönde iyileşme sağlar. Fakat magnezyum alaşımlarının mukavemet özelliğinde etkisi çok azdır.
- **Silisyum (Si):** Magnezyum alaşımına silisyum ilavesi ile kararlı silisit Mg_2Si intermetalığı oluşur. Oluşan bu intermetalikten dolayı alaşımın yüksek sıcaklık özelliklerinde olumlu etki yaratarak iyileşme sağlayabilir, ancak magnezyum alaşımında dökülebilirliği olumsuz etkileyerek, alaşımın dökülebilirliğini düşürür. Silisyumun korozyona etkisi dikkate alınmayarak, göz ardı edilebilir.
- **Stronsiyum (Sr):** Çekme boşluğunda veya dağılımında pozitif anlamda bir gelişme sağlayarak olumlu bir etki yaratır. Magnezyum alaşımında porozite eğiliminin azalmasında etki gösterir. Mg-Al ikili sisteminde tane inceltici etkisi göstermekte, alaşımın sürünme direncinde artış sağlamaktadır.
- **Titanyum (Ti):** Titanyum alaşıma ilave edildiğinde, magnezyum içinde çözünürlüğü çok az olmaktadır. Ancak magnezyum alaşımlarının hızlı katılaşma ile üretilmesiyle titanyumun çözünürlük miktarı artırılabilir.

- **Toryum (Th):** Alaşıma ilave edilen Th, yüksek sıcaklıklarda sürünme ve gerilme özelliklerini iyileştirir. Alaşımın dökülebilirlik kabiliyetini geliştirirken, mikroporozite eğilimini azaltır.
- **Yitriyum (Y):** Y, magnezyum alaşımlarının dayanımını artırır. Yüksek sıcaklıklarda gerilme ve sürünme özelliklerini geliştirir. Y'nin ilavesi alaşımın korozyon özelliklerini geliştirir. Y, magnezyumda yaklaşık %12,5 oranında yüksek çözünürlüğe sahiptir ve sıcaklık düşüşü ile birlikte çözünürlükte de düşüş yaşanır, çökelti sertleşmesi oluşmasına neden olur.
- **Zirkonyum (Zr):** Katılama esnasında zirkonyumca zengin partiküller magnezyum tanelerinin heterojen çekirdeklenmesine neden olur ve Zr elementi Al, Mn ve Si ile kullanılmadığında tane inceltici etkisi çok güçlü olmaktadır. Ortam sıcaklığında zirkonyum alaşımın çekme mukavemeti üzerinde geliştirici etki gösterir.
- **Toprak Alkali Elementleri (RE):** Yapılan araştırmalarda periyodik tablonun baştan ikinci grubunda yer alan toprak alkali elementlerinin sürünme direncini ve yüksek ısı dayanımını artırdığı ve aynı zamanda döküm porozitesinde de tam tersi etki göstererek azalttığı görülmektedir. Bu elementlerin ilave edildiğinde dökülebilirliği artırır ve magnezyum alaşımlarında mikroporoziteyi azaltır. Yüksek sıcaklıklarda olduğu gibi oda sıcaklığında da alaşımda katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi yaparlar. Alaşımda dayanım özelliklerinde gelişme ve artış sağlar. Yükselen sıcaklıklarda alaşımların iyi sürünme dirençleri sayesinde kararlı çökeltileri matriste ve tane sınırlarında dağılır. Potasyum (K), Sodyum (Na) ve Lityum (Li) gibi toprak alkali elementleri korozyon karşısında iyileştirmeye katkıda bulunur.

2.1.4. Magnezyum-Alüminyum (Mg-Al) Alaşımları

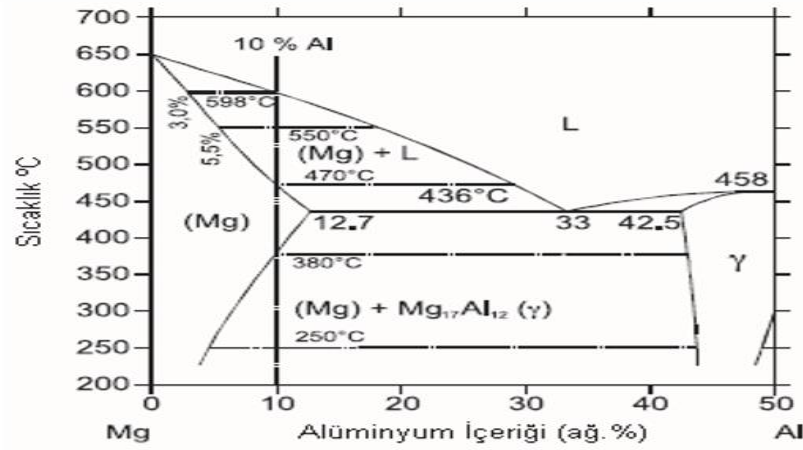
Mg-Al ikili sistemi en eski ve en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. AZ91, AM50 ve AM60 gibi alaşımlar tüm Mg alaşım dökümünün büyük bir bölümünü kapsamaktadır [2, 3]. Şekil 2.3 de Mg-Al ikili denge diyagramı görülmektedir. Denge diyagramından da görüldüğü gibi 436°C gibi çok düşük sıcaklıkta ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ötektik reaksiyon, $L \leftrightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha(Mg)$, düşük sıcaklıkta meydana gelir (437°C). Bu ötektik sıcaklıkta alüminyumun maksimum çözünürlüğü %12,7 ve azalan sıcaklık ile alüminyumun çözünürlüğü de keskin bir şekilde azalır. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sisteminin alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi sağlayabileceğini göstermektedir [14-16, 49].



Şekil 0.1. Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı [50].

Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi Mg-Al alaşım sistemleri % 2 den daha fazla alüminyum içerdiği zaman döküm mikroyapısında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliti görülür. Eğer alaşımlarda alüminyum içeriği % 8'in üzerinde ise ağ yapısını tamamlamamış $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliti tane sınırları boyunca dağılım gösterir ve bu durum sünekliliğin hızlı bir şekilde düşmesine neden olur. Yaklaşık 420°C de çözelti işlemi $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliti'nin çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir ve her iki durumda çekme mukavemeti ve sünekliliği artırmaktadır. 150°C ile 250°C aralığında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliti çökebilir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar. Buna karşın Mg-Al alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmak için gerekli özellikleri taşımamaktadır. Çinko, manganez, silisyum, nadir elementler gibi elementler Mg-Al alaşım sistemine ilave edilerek özelliklerin geliştirilmesi sağlamaktadır [15, 44, 47, 51-54].

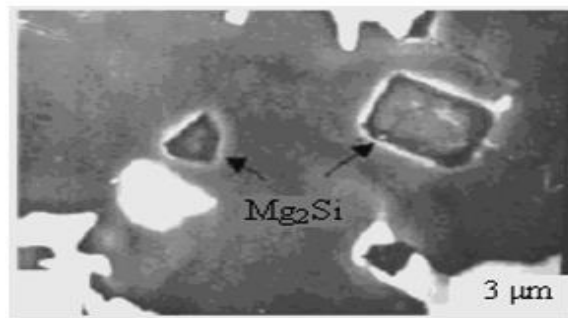
Mg-Al ikili alaşımları oldukça iyi döküm özelliklerine ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Mg-Al alaşımları Mn, Zn, RE ve Si gibi ilave elementlerle üçlü ve dörtlü alaşımlar oluştururlar. Bu ilave elementler daha önce de belirtilen özellikleri geliştirilerek alaşımların dökümünü daha uygun hale getirirler. Fakat ilave edilen bu elementler alaşımın katılma davranışını zorlaştırırlar En fazla kullanılan alaşım elementleri Al, Zn, Mn ve Zr dir. RE, Yi ve Ca genellikle yüksek sıcaklıklar için kullanılır [32].



Şekil 0.2. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü [12].

2.1.5. Magnezyum-Alüminyum-Silisyum (Mg-Al-Si) Alaşımları

AS41 (%4,2 Al, %1 Si, %0,35 Mn) alaşımı bir basınçlı döküm alaşımı olup, Mg alaşımlarında 150°C sıcaklığa kadar sürünme direncinin iyileştirilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir alaşımdır. AS41 alaşımın dayanımı, Mg_2Si fazından kaynaklanmaktadır. Mg_2Si fazı hızlı katılaşma sonucunda ince taneli bir yapıya sahip olmaktadır. AS41 alaşımı, kuma döküm uygulamalarında kendine yer bulamamış ve kullanılamamıştır. Çünkü kuma döküm uygulamalarında soğumanın yavaş olarak gerçekleşmesi sebebi ile Mg_2Si fazı kaba taneli olmuş ve bu durum da alaşımın çekme dayanımını ve sünekliliği azaltmaktadır. Resim 2.5'te silisyumlu magnezyum alaşımlarının mikro yapısı görülmektedir [32].

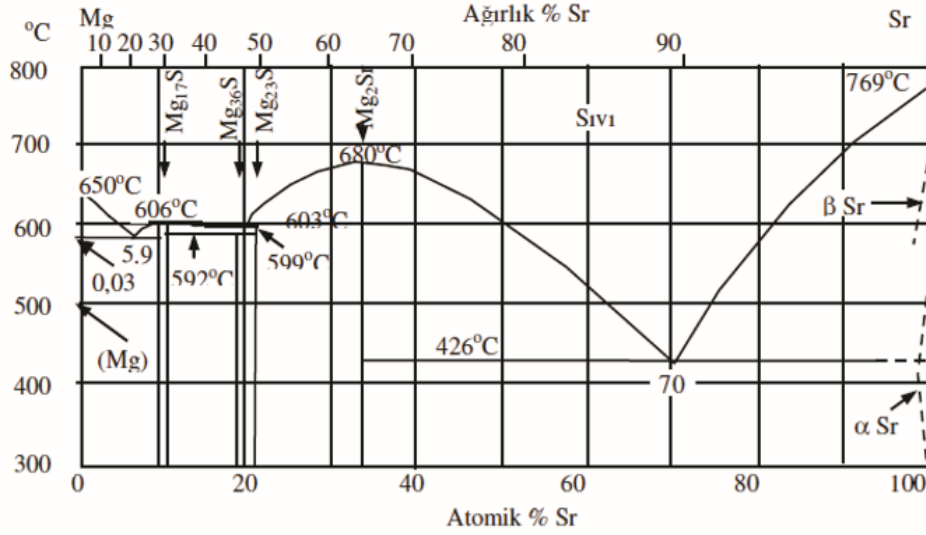


Şekil 0.1. Si'li Mg alaşımının mikro yapısı [32]

2.1.6. Magnezyum-Alüminyum-Stronsiyum (Mg-Al-Sr) Alaşımları

Literatürde Magnezyum-Stronsiyum alaşımları (A) olarak adlandırılır. Şekil 2.6'da magnezyum-stronsiyum (Mg-Sr) ikili denge diyagramında görüldüğü gibi, magnezyum

içerisinde stronsiyumun çözünürlüğü 585°C sıcaklıkta %0,11 ve 200°C sıcaklıkta yok denecek kadar az çözünürlüğe sahiptir. $Mg_{17}Sr_2$, $Mg_{38}Sr_9$, $Mg_{23}Sr_6$ ve Mg_2Sr (sistemde mevcut olan 4 kararlı intermetalik bileşen) intermetaliklerin ergime noktaları sırasıyla 606, 592, 599 ve 680°C'dir [7, 9, 46].

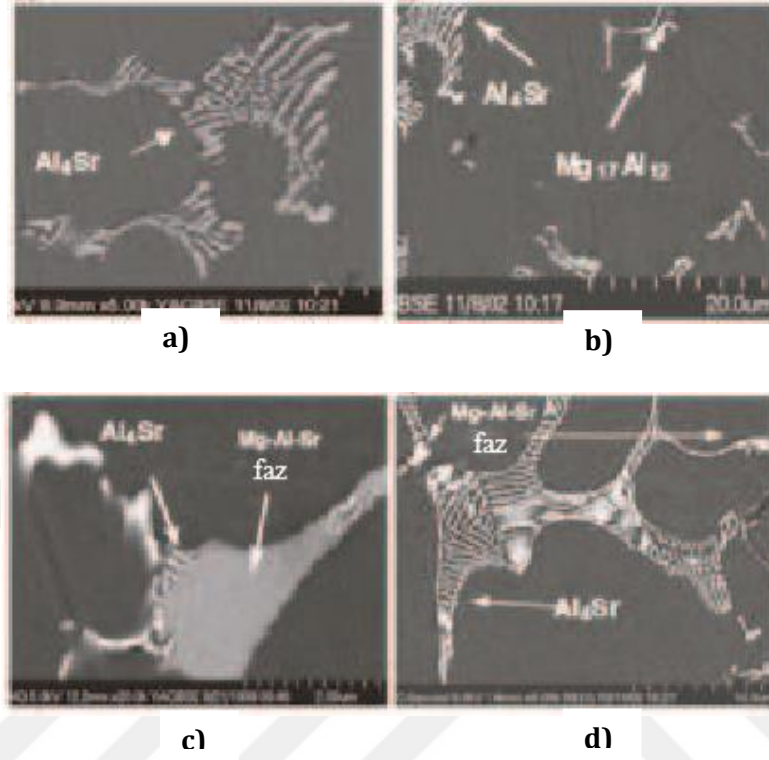


Şekil 0.1. Magnezyum-Stronsiyum ikili denge diyagramı [50]

Sr alaşım elementi içeren alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar sonucunda, stronsiyumun çekme boşluğu veya dağılımında olumlu etkiye sahip olduğu ve magnezyum alaşımının porozite eğilimini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Sr alaşım elementinin Mg-Al sistemlerinde tane inceltici etkiye sahip olduğu ve aynı zamanda sürünme direncini artırdığı görülmüştür. Bunun yanında korozyon direncinde ise önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir [7, 9, 42, 55-59].

Literatürde yapılmış olan bazı çalışmalarda Sr/Al oranının farklı mikro yapı oluşumunda etkili olduğu görülmüştür [7]. Al_4Sr intermetalığı yapıda ikincil faz ise, Sr/Al oranının 0,3 değerinden az olduğu bir durumdur ve Şekil 2.7'de verilmiştir. İri yapıdaki ikincil intermetalik fazı (üçlü Mg-Al-Sr fazı) ile Al_4Sr intermetalığı birlikte gözlemlendiği anda bu oranın daha fazla olduğu görülmüştür. İri yapılu üçlü Mg-Al-Sr fazı çok sayıda araştırmacı tarafından tespit edilmeye çalışılmıştır ve yapılan bir çalışmanın sonunda elde edilen mevcut üçlü faz $Mg_{13}Al_3Sr$ olarak tanımlanmıştır [56]. Yapılan diğer bir araştırmada elde edilen çalışma sonucu mevcut üçlü fazın Mg_9Al_3Sr fazı olduğunu göstermiştir [60]. Buna karşın son yıllarda yapılan çalışmalarda başka bir konu üzerine yoğunlaşmıştır. Mg-Al-Sr üçlü alaşım sisteminde magnezyumca zengin olan bölgelerdeki iri yapı, içerisinde oldukça fazla miktarda Al çözüdüren bir ikili faz olduğu ve bu ikili fazın $Mg_{17}Sr_2$ fazı olduğu konusu araştırmacıların

üzerine çalıştığı bir konu olmuştur [9, 61]. Sonuç olarak araştırmacıların ortak düşüncesi bahsedilen alaşım sistemlerinde daha fazla çalışma gerçekleştirip, üçlü faz diyagramının belirlenmesi ve mevcut fazların tanımlanması gerekliliğidir [7, 45, 46].



Şekil 0.2. Basınçlı döküm alaşımların mikro yapısı a) AJ51(Mg-5Al-1Sr) b) AJ62L (Mg-6Sr-1.6Sr) alaşımları ile Sr/Al oranı 0,3 den düşük, Al_4Sr ikincil faz, c) AJ52(Mg-5Al-2Sr) ve d) AJ62L (Mg6Al-2Sr) alaşımları ile Sr/Al oranı 0,3 den yüksek ve iki tür ikincil faz mevcut, Al_4Sr ve Mg-Al-Sr üçlü bileşeni [7].

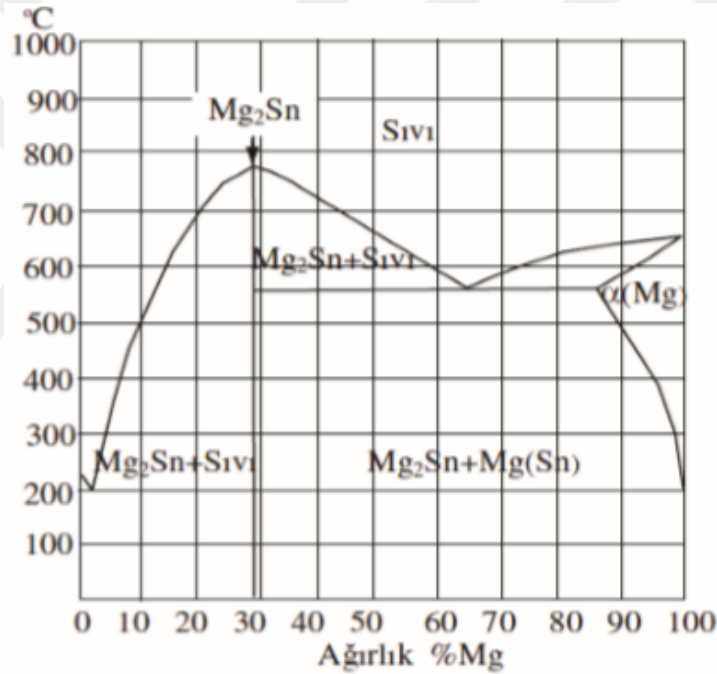
2.1.7. Magnezyum-Kalay (Mg-Sn) Alaşımları

Magnezyum-Kalay alaşımları literatürde "AT" olarak tanımlanmakta olup, Sn ilaveli magnezyum alaşımları ilk olarak 1934 yılında denenmiştir.

Kalay elementi $561^{\circ}C$ sıcaklıkta, ağırlıkça takribi olarak %14,85 oranında magnezyum metali içerisinde çözünmektedir. Şekil 2.8'de magnezyum-kalay ikili denge diyagramı verilmiştir. Kalay elementinin magnezyum içerisindeki çözünürlüğü $200^{\circ}C$ 'de ağırlıkça %0,45 değerine düşmekte ve oda sıcaklığında çözünürlük yok deneye kadar azalmaktadır. Magnezyum-kalay ikili alaşımları yüksek ergime sıcaklığına sahip olan Mg_2Sn intermetalini içermektedir. Mg_2Sn intermetaligi termal kararlılığa sahiptir. Bundan dolayı Mg-Sn esaslı alaşımların yüksek sıcaklıklarda sürünme dirençleri daha yüksektir. Sıcaklık ile çözünürlüğün

değişebilir olması durumundan dolayı Magnezyum-Kalay alaşım sistemlerini yaşlandırma ile sertleştirme işlemi için uygun hale getirir. Dolayısı ile çekme-basma mukavemeti özellikleri daha iyi gelişmiştir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur.

Araştırmacıların yapmış olduğu son dönemlerde yapılan çalışmalara göre Mg alaşımlarına ağırlıkça %5'e kadar ilave edilen periyodik cetvelin 4A grubunda bulunan kalay metali, bu alaşımların çekme mukavemetinde ve sürünme direncinde artış sağlamaktadır. Günümüzde magnezyum-kalay alaşımları halen ticari bir öneme sahip olamamıştır ve araştırmacılar magnezyum-kalay alaşımlarının çeşitli kombinasyonları üzerine çalışmalarını devam ettirmektedirler. Ayrıca son yıllarda Mg-Sn ikili alaşım sistemine çeşitli oranlarda Kalsiyum(Ca) ilavesi yapılarak alaşım üzerindeki etkisi incelenmiştir, çalışma sonucunda ise korozyon direnci, sürünme ve dökülebilirlik üzerine önemli gelişmeler elde edilmiştir [62-69].



Şekil 0.1. Magnezyum-Kalay ikili denge diyagramı [50].

2.2. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum metalinin de birçok diğer metalde olduğu saf halde kullanılması düşük dayanım özelliğinden dolayı zor olmakla birlikte, neredeyse mümkün değildir. Bu durum, magnezyum özelliklerini iyileştirmek için araştırmalar yapılmasına ve yapılan araştırmalar sayesinde değişik alaşımların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Magnezyum alaşımlarının en önemli özelliğinin hafiflik olması, bazı magnezyum alaşımlarının özgül çekme dayanımının alüminyum ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyük olması günümüzde elektronik,

savunma, havacılık ve uzay sanayi gibi birçok farklı endüstride magnezyum alaşımlarının yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır [71].

Magnezyum alaşımları birçok özelliği sayesinde farklı farklı endüstri sektörlerinde kullanılan bir alaşım elementi olup, kullanım alanlarından birisi de yapısal uygulamalardır ve yapısal uygulamalarda sıkça kullanılan malzemeler arasındadır. En yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip yapı malzemesidir. Sadece hafiflik özelliği sayesinde, kullanımında veya imalatında hareketli parçalar için kullanımı uygun ve tercih edilen hale gelmiştir. Düşük Yoğunluklarının düşük olmasından kaynaklanan düşük eylemsizlikleri, hızlı hareket gösteren parçalarda mühim bir avantaj oluşturmaktadır. Yoğunluğun düşük olması, ağırlık azaltıcı etkiye neden olmaktadır. Bundan dolayı otomotiv ve havacılık sektörleri gibi parça ağırlıklarının oldukça önemli olduğu sektörlerde magnezyum alaşımları sıkça tercih edilmektedir. Hafif olma özelliği yapısal uygulamalarda da kullanılmalarının en önemli özelliklerinden biridir. Hafiflik dışında sahip olduğu diğer özellikler de farklı uygulama alanlarında kullanım yeri bulmasına olanak sağlamaktadır [72].

Magnezyum ve alaşımları otomotiv, havacılık ve yapı uygulamalarının kullanıldığı sektörlerin dışında, biyomalzemeler, elektronik ve haberleşme ekipmanları, spor aletleri gibi daha birçok alanda da kullanılmaktadır. Geçmişte magnezyum alaşımlarının geliştirilmesindeki en önemli sebep askeri uygulamalarda kullanıma alanları oluşturması iken günümüzde bu metalin araştırılmasının ve kullanılmasının en önemli sebepleri arasında otomotiv alanında kullanarak ağırlığı azaltıp, hafiflik avantajı sağlamak ve bu sayede yakıtın daha ekonomik kullanılması, zararlı gaz emisyonunun azaltılması ve çevreye olan etkinin minimuma indirilmesinin istenmesidir [2]. Magnezyum alaşımlarının otomobillerde; debriyaj gövdesi, tekerlekler, koltuk kızakları, kapı içi koruyucu kirişler, iç kapı kolları, şanzıman gövdesi, far mesnedi, araç ön paneli gibi parçalarda kullanım alanları bulmaktadır [72].

Önceleri havacılık sektöründe daha fazla kullanılan magnezyum alaşımlarının kullanımı günümüzde eskiye nazaran azalmıştır ve bu alaşımlar helikopterlerin koltukları, şanzıman kutuları ve pedallarında kullanılmaktadır. Hafif parça kullanımı ile yakıt tüketiminin azaltılması sağlanmaktadır. Güç ve hız gereksinimindeki artış, hafifliğin yanında daha dayanıklı malzeme kullanımı ihtiyacındaki gerekliliği ortaya çıkarmıştır. Hava araçlarında magnezyum alaşımları üzerine yük binmeyen parçalarda aktif olarak kullanılmaktadır (yakıt depoları, hidrolik depolar ve benzeri gibi). Quadrant, kuyruk paline hareket vermekte ve üzerine yük binmemektedir. Quadrant ve hidrolik depo AZ91 dökümden oluşmaktadır. Depo, hidrolik sistemi beslemekte, hava aracında modele göre 3 adete kadar bulunabilmekte olup, hidrolik akışkanı uygun şekilde hazırlayıp, depolanmasını sağlamaktadır. Isınan hidrolik akışkanın soğutulması önemlidir. Tüm bu belirtilen özellikleri ise AZ91 alaşımı gayet iyi ve uygun bir şekilde sağlayabilmektedir. ZE41 alaşımı, Eurocopter EC120, MD500, Sikorsky S92 ve NH90 gibi birçok helikopterin dişli

kutularında, AZ31, AZM ve AZ61 dövme alaşımları da uydu parçalarında kullanım alanı bulmaktadır. B-36 bombardıman uçağı 8 tondan fazla ağırlığa sahip olup, yaklaşık 3 tondan fazlası magnezyum alaşımlarından oluşmaktadır. Eğer magnezyum yerine alüminyum kullanılmış olsaydı 4 tondan daha fazla bir ağırlık oluşturacaktı. S55 helikopterlerinde ZW3 alaşımı yaklaşık 115 kg kullanılmıştır. Deneysel amaçlı imal edilmiş olan F80C ise, tamamen magnezyum ile konstrükte edilmiştir. Magnezyumla ilgili yeni alaşım çalışmaları günümüzde hava araçlarında kullanılabilir magnezyum alaşımlarının sayısı artmaktadır. AZ91D ile karşılaştırıldığında mukavemet özellikleri daha yüksek olan yeni magnezyum alaşımları elde etmişlerdir. Magnezyum alaşımlarının ağırlık düşüşü sağlaması ne kadar önemli ve etkili olsa da, korozyon direncinin zayıf olması geniş kullanım alanına sahip olmasının önünü kesmektedir. Uzay endüstrisinde kullanılacak alaşımlar bazı yüksek performans gereksinimlerini aynı anda sağlamak zorundadır. Bunlar; korozyon direnci ve mekanik özellikler ile ilgili olan performans gereksinimleridir. Günümüzde 20 adet standart magnezyum döküm alaşımı bulunmaktadır. Ancak modern havacılık endüstrisindeki ihtiyaç ve gereklilikleri sağlayacak olanların sayısının azlığı büyük engel teşkil etmektedir. Bu durum magnezyum alaşımının birçok avantajının olduğu halde bazı dezavantajlara da sahip olduğunu göstermektedir [73].

Talaşlı imalatta talaşlı işlenmeye yalnızca düşük süneklığe sahip magnezyum malzemeler uygun olmasına karşın, kolay tutuşabilir olması sebebi ile tehlike arz etmektedir. Magnezyum savunma sanayisinde de kritik kullanım alanlarına sahiptir. Büyük tahrip gücüne sahip mühimmatlarda, portatif yer ve radar donanımlarında, stingray torpidolarında alevlendirme amaçlı kullanım alanları bulunmaktadır. Anti tank mühimmatı olarak kullanıldığında ise magnezyum; çubuk şeklinde ekstrüze edilerek kullanılır. Standart 100-120 mm lik mermileri ateşlemede mühimmata destekleyici olarak magnezyum katılmakta, AZ80, AZ61 ve AZM alaşımlarının tozlarından faydalanılmaktadır. Ayrıca magnezyum yandığında ortama beyaz bir ışık ve yoğun bir ısı çıkarmaktadır. İnce ve atomize tozlar ordu donatım malzemesi ve alevlendirici olarak özellikle aydınlatma ve tehlike işareti amaçlı kullanılmaktadır. Savunma sanayinde hedef yanılma amaçlı olarak askeri helikopter ve uçakların korunmasında magnezyum esaslı aygıtlar kullanılmaktadır [73].

Taşınabilir elektronik ve haberleşme cihazlarında hafiflik ve küçük boyutlar ihtiyaç duyulan ve talep edilen özelliklerdir. Bu özellikler taşıma için gerekli enerjiyi ve yakıtı azaltmaktadır. Aynı zamanda kullanıcılar tarafından talep edilen hafiflik ve küçük boyut kriterlerini karşılayacak üretimlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Magnezyum alaşımları belirtilen bu özellikleri karşılaması sebebi ile elektronik ve haberleşme sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmakta ve tercih edilmektedir. Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, televizyonlar, kameralar, elde taşınabilir elektronik cihazlar gibi bazı cihazlar magnezyum alaşımlarının kullanıldığı alanlara örnek gösterilebilir [72].

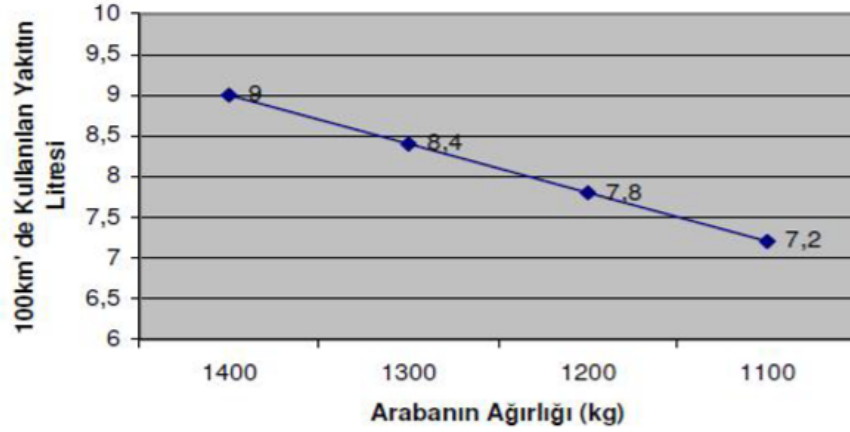
Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar (AM50 - AM60) iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Toprak elementleri içeren AE42 (Mg-AlRe), AS41 ve AS21 (Mg-Al-Si-Mn) alaşımları artan sıklıkla, Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarından daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçaları imalı için kullanılır [2].

AZ serisi alaşımlar otomobil sektöründe, havacılıkta, kamera, bilgisayar ve mobil telefonlarda kullanılır. Süper hafif Li katkılı magnezyum esaslı alaşımlar kullanım alanı olarak bazı malzemelere ikame olabilmektedir, örneğin bilgisayarda bulunan bazı plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine bu alaşımlar kullanılabilir [2].

Magnezyum ve magnezyum alaşımları hafiflik, düşük yoğunluk, yüksek spesifik dayanım, iyi dökülebilirlik, yüksek hızlarda işlenebilirlik, kontrol altındaki bir atmosferde iyi kaynak edilebilirlik, geri kazanım özelliği gibi özellikleri sayesinde savunma, uzay, otomotiv, elektronik, havacılık gibi birbirinden farklı bir çok alanda sıkça kullanılmaktadırlar. Fakat özellikle Cl^- iyonu bulunan ortamlardaki düşük korozyon dirençleri bu alanlardaki kullanımlarının kısıtlanmasına neden olmaktadır [72].

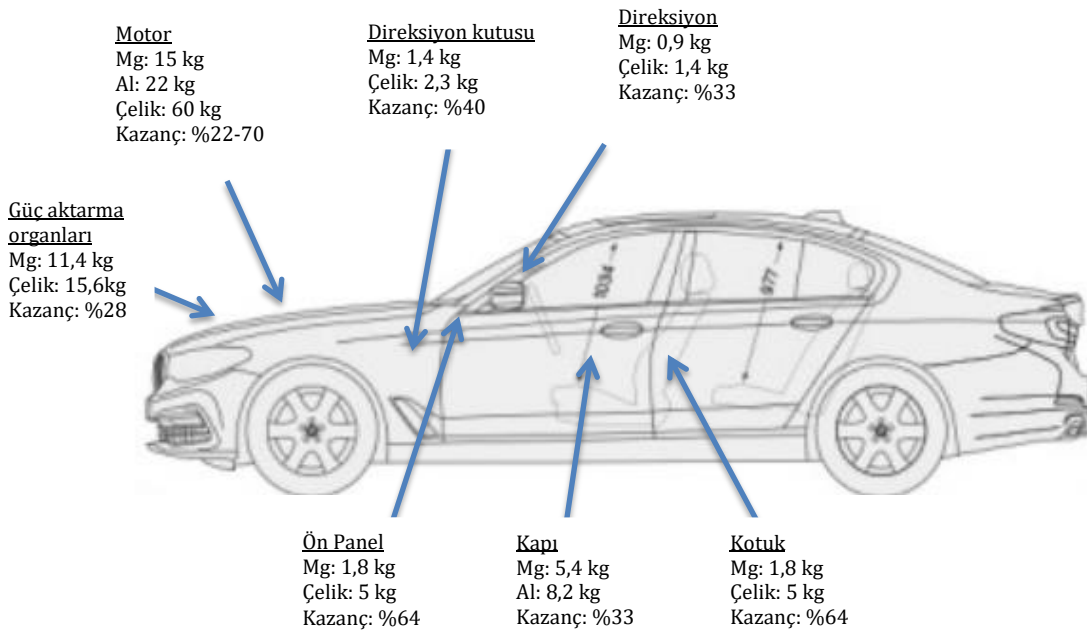
2.2.1. Magnezyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamaları

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda hafiflik avantajını ön plana çıkararak ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda magnezyum metali düşük yoğunluk özelliğine sahip olması ile mühendislik uygulamalarında bu ihtiyaçları karşılayarak ön plana çıkmaktadır. Günümüzde de magnezyum alaşımlarına en büyük talep ve ilgi otomotiv endüstrisinden olmaktadır. Bu durumun ilk sebebi, yoğunluk düşüklüğü sebebi ile hafif olan Mg alaşımlarının kullanımı ile araç ağırlığında sağlayacağı azalma, yakıt ekonomisinde yaşanacak tasarruf ve bu durumun bir sonucu olarak zararlı gaz emisyonlarının da azaltılabilecek olmasıdır. Özellikle otomotiv sektöründe hafif metalik malzemelere yönelik sadece günümüz otomobilleri ile ilgili değil, gelecekte de ihtiyaç duyulacağı öngörülen bir durumdur. Gelecekte alternatif enerji kaynakları (güneş enerjisi, hidrojen, elektrik vb. gibi) ile çalışacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik şimdiye kıyasla çok daha önemli bir gereksinimdir. Gelecek yıllarda binek otomobillerde yakıt tüketimi içi zorlu bir hedef belirlenmiştir ki; bu planlanan hedef 100 km'de 3 litre yakıt tüketimidir. Bu hedef için otomobilin toplam ağırlığından yaklaşık olarak %30'luk bir düşüş sağlanması gerekmektedir [71]. Şekil 2.9'da arabanın ağırlığının ile kullanılan yakıt üzerindeki bağlantısı çizgisel bir grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 0.1. Araç ağırlığı ile yakıt ekonomisi arasındaki ilişki [71].

Magnezyum ve alaşımları otomotiv endüstrisinde, otomobil aksamalarında yaklaşık olarak son 80 yıldır kullanılmaktadır. Louse Chevrolet 1930 yılında bir prototip arabada magnezyum pistonları ve Volkswagen Beetle motorunda ve aktarma aparatlarında 20 kg'dan fazla magnezyumdan malzeme kullanılmıştır. Magnezyum metali sahip olduğu özellikler bakımından bu süre boyunca genellikle sınırlı potansiyele sahip özel bir materyal olarak kabul görmüştür. 1970'lerdeki petrol kriziyle birlikte magnezyum metali, otomobil endüstrisinde daha fazla önem kazanmış ve daha önemli bir rol oynamıştır. Şekil 2.10'da otomobil parçalarındaki magnezyum alaşımının kullanım alanlarından bazıları gösterilmiştir [71].



Şekil 0.2. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar [71,74].

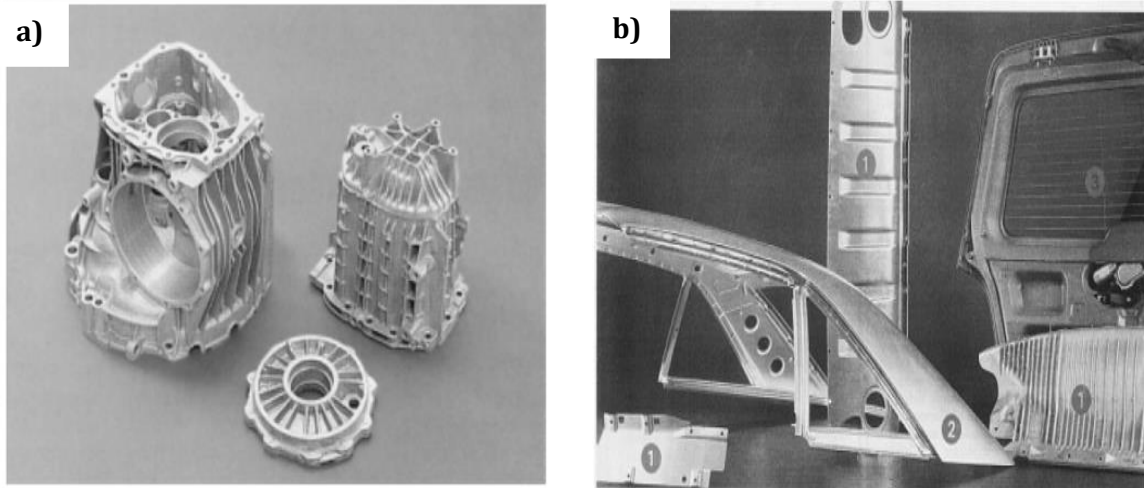
AZ serisi magnezyum alaşımları, tekerlek jantı, direksiyon, silindir ana kapağı, motor pistonları gibi parçalarda kullanılabilir. AM serisi magnezyum alaşımları yüksek toklukları ve enerji absorpsiyon özelliklerine sahiptir. Bu nedenle daha çok otomobillerde tekerlek, direksiyon, koltuk iskeleti gibi aksamın yapımında tercih nedeni olmakta ve kullanılmaktadır. Şekil 2.11'de AM alaşımından dökülmüş parçalar görülmektedir [2].



Şekil 0.3. AM serisi Mg alaşımlarından üretilmiş bazı malzemeler [2].

AZ91D alaşımı vites kutusu olarak kullanılabilir. Otomobillerde ağırlık azaltmaya olanak sağlayan bir alaşımdır. Titreşim sönümlenme ve rijitlik özelliği sağlaması sebebi ile vites kutusu muhafazalarında tercih sebebi olmuştur [70].

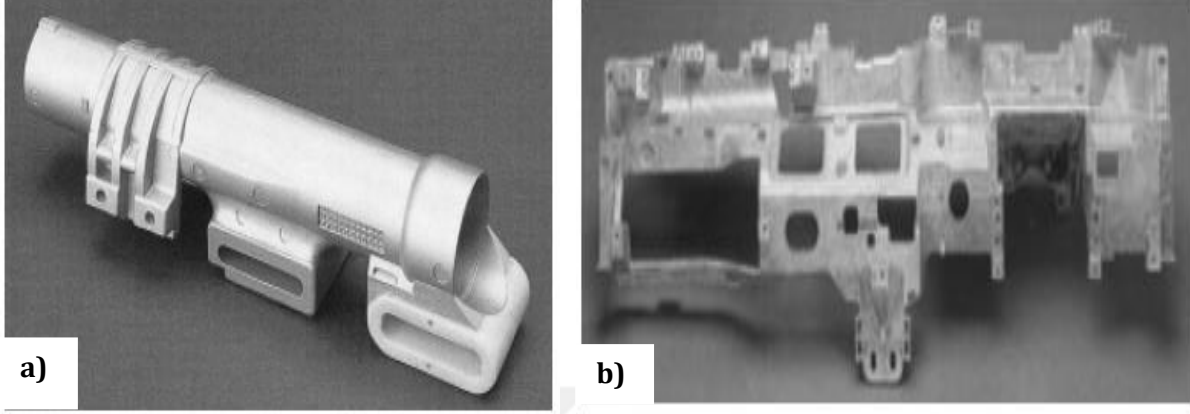
AM60B alaşımı yakıt tankı koruyucusu olarak kullanım bulmuş bir magnezyum alaşımıdır, yaklaşık olarak 3,2 kg ağırlığa sahip olup bu alaşımın kullanılması 4 kg ağırlık avantajı sağlamıştır [70].



Şekil 0.1. a) Şanzıman VW, b) Yakıt deposu kapağı [70].

AZ91D alaşımı Audi Zitzmann modelinde direksiyon mili yatağı olarak kullanılmıştır. Ağırlık kazanımı yaklaşık olarak 20 kg'dır. Alaşım boyutsal doğruluk/keskinlik sağlar [70].

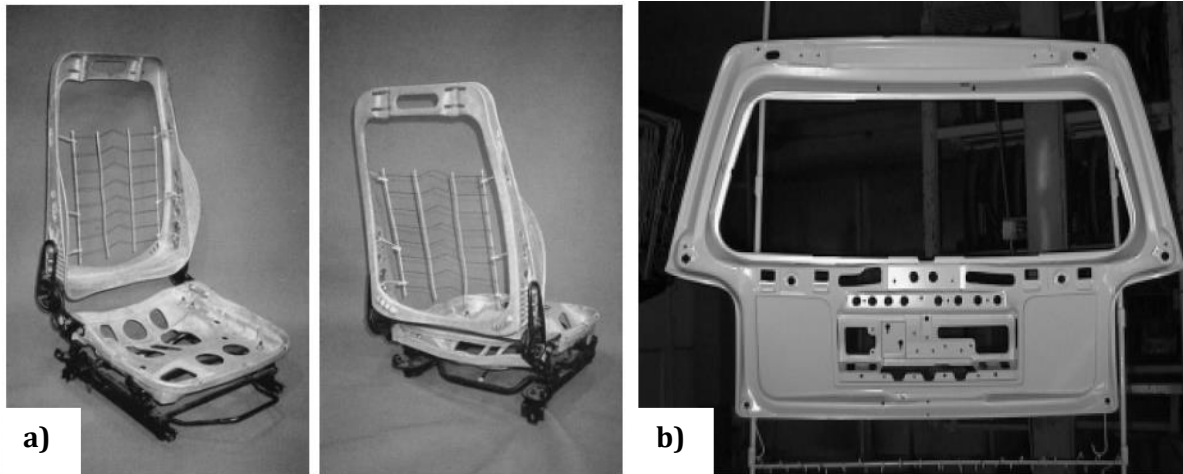
AM50 magnezyum alaşımı Cadillac marka araçta kontrol paneli olarak kullanım bulmuştur. Deformasyon özellikleri/süneklik, ağırlık kazanımı, boyutsal doğruluk/keskinlik ve sadeleştirilmiş konstrüksiyon sağlaması nedeni ile kullanım yeri bulmuştur [70].



Şekil 0.2. a) Direksiyon mili tutucusu ve braketi, b)kontrol paneli [70].

Alfa Romeo Meridian-MPI modelinin koltuk kasası yapımında AM60 alaşımı kullanılmıştır. Deformasyon özellikleri/süneklik, ağırlık kazanımı ve sadeleştirilmiş konstrüksiyon sağlaması nedeni ile kullanım yeri bulmuştur [70].

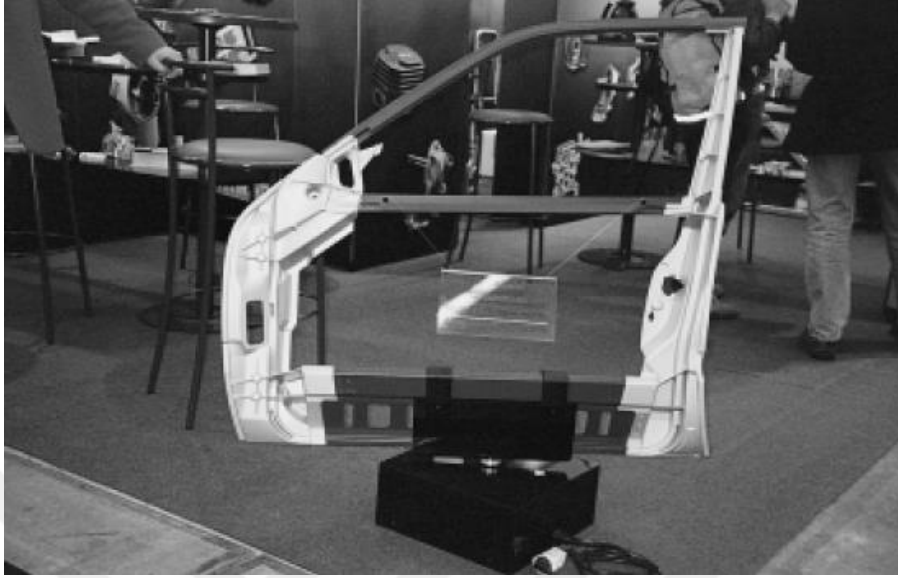
VW Lupo (Mössner AG)'da bagaj kapağı olarak 1350' 800 mm ölçülerinde, 2,7 kg ağırlığında, ortalama cidar kalınlığı 1,6 mm olan bir magnezyum alaşımı kullanılmıştır [70].



Şekil 0.3. a) Koltuk kasası, b) bagaj kapağı [70].

Magnezyum araba kapısı çalışması hafif metal konstrüksiyonunun avantajlarına örnek teşkil etmektedir. Magnezyum çubuk profilleri magnezyum döküm parçaları ile birleştirilir.

Döküm parçaları daha küoüktür ve bu nedenle üretim maliyetleri de düşüktür. Küçük parçaların daha ince cidarlı üretimi birbirini izleyen daha iyi döküm prosesleri ile yapılabilir [70].



Şekil 0.4. Hafif tasarımlı araba kabin kapısı [70].

3.MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı miktarlarda (ağırlıkça %1 ve 2) Ce alaşım elementinin Mg-5Sn-2Al alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Dökümler, koruyucu atmosfer altında indüksiyon fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eriyik malzeme, soğuk hazneli yüksek basınçlı döküm makinesi (HPDC) kullanılarak kalıbın içerisine doldurulmuş ve test numuneleri elde edilmiştir. Faz analizleri ve mikroyapısal çalışmalar X ışınları kırınım cihazı (XRD), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Mekanik testlerden çekme ve sürünme testleri yapılmış olup, Ce alaşım elementinin çekme ve sürünme değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çalışma yapılırken alaşımı hazırlamak için saf magnezyum, alüminyum, kalay ve seryum (ağırlıkça %1 ve 2) kullanılmıştır. Mikroyapı incelmesi için farklı boyutta SiC zımpara kağıtları, parlatma için alümina solüsyonu ve dağlama için asetik glikol kullanılmıştır. Ayrıca çalışma sırasında kullanılan cihazlar aşağıda verilmiştir.

- İndüksiyon Ocağı
- Yüksek Basınçlı Pres Döküm Makinesi (HPDC)
- Enerji Dağılım Spektrofotometresi (EDS)
- Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)
- X Işınları Kırınımı Cihazı (XRD)
- Çekme Test Cihazı
- Sürünme Test Cihazı

3.1. Alaşımların Üretilmesi

Mg-5Sn-2Al, Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımları, indüksiyon ergitme fırınında koruyucu atmosfer (karbondioksit (%99 CO₂) ve sülfür hekzaflorür (%1 SF₆) karışım gazı) altında üretilmiştir. Ana alaşımın üretilmesi için ticari olarak saf magnezyum, alüminyum ve kalay, seryum ilavesi için ise Mg-30Ce master alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan indüksiyon fırın (Şekil 3.1) kapasitesi 15kW'dır. Tüm alaşım elementlerinin ergime işleminin gerçekleştiğinden emin olmak için 750°C sıcaklıkta 5 dakika bekletilmiş ve Şekil 3.2'de verilen 100 tonluk soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazı (HPDC) kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretim öncesinde kalıp 200°C'ye ısıtılmış ve Şekil 3.3'deki numuneler elde edilmiştir.



Şekil 0.1. İndüksiyon ergitme fırını



Şekil 0.2. Soğuk hazneli yüksek basınçlı döküm cihazı (HPDC)

3.2. Mikro Yapı İncelemesi

Mikroyapılar, enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Zeiss Evo40 modeline sahip taramalı elektron mikroskobu verilmiştir. SEM örnekleri 400, 800, 1000 ve 1200 mesh SiC kağıt ile zımparaladıktan sonra 0,05 mikron alümina solüsyonu ile parlatılmıştır ve son olarak asetik glikol kimyasal solüsyonu (20 ml asetik asit, 1 ml nitrik asit, 60 ml etilen glikol, 19 ml damıtılmış su) ile hafifçe dağlanmıştır. Deneysel alaşımlarda oluşan faz bileşimleri Rigaku D-Max 1000 X-ışını difraktometresi kullanılarak X-ışınları kırınımı cihazı (XRD) ile analiz edilmiştir ve faz tanımlaması ICDD veritabanı ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Deneysel alaşımların ortalama tane büyüklüğünü belirlemek için görüntü analiz yazılımı (Clemex) kullanılmıştır.

3.3. Mekanik Testler

3.3.1. Çekme Testi

ASTM standardı E8/E8M'ye uygun olarak dog-bone adı verilen köpek kemiği şeklinde test numuneleri kullanılarak yapılan çekme testleri, hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda (120°C ve 180°C) 2×10^{-1} mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir. Her yüksek sıcaklıktaki çekme testinden önce, test sıcaklığını dengelemek için çekme numuneleri fırın içerisinde 10 dakika tutulmuştur. Maksimum çekme dayanımı (UTS), akma dayanımı (TYS) ve uzama (ϵ) değerleri her test koşulu için dört ölçümün ortalamasıdır. Şekil 3.4'te verilen Raagen marka çekme test cihazı kullanılmıştır, çekme test numuneleri Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 0.1. Ce ilavesi ile elde edilen Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşım numuneleri



Şekil 0.2. Çekme test cihazı

3.3.2. Sürünme Testi

Sabit yük altında sürünme testi 40 ve 50 MPa'lık bir yük altında 180 ve 210°C'de gerçekleştirilmiştir. Sürünme testi gerçekleştirilirken Raagen marka 10 KN'luk universal sürünme testi cihazı kullanılmıştır (Şekil3.5).



Şekil 0.1. Sürünme test cihazı

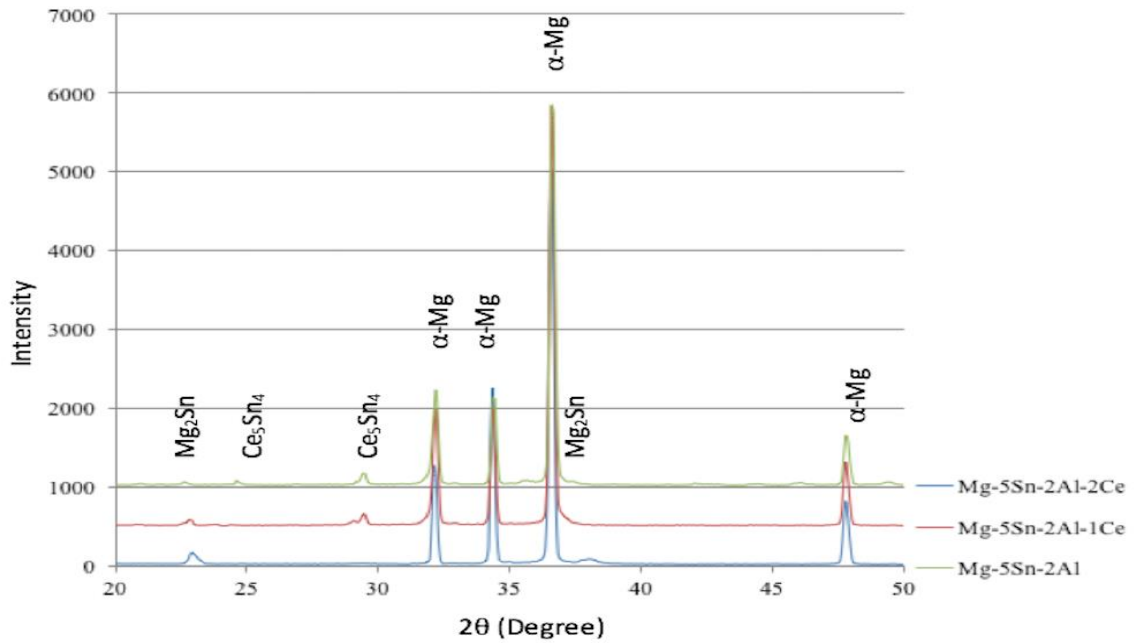
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Mikroyapı ve Karakterizasyon

Şekil 4.1, çalışılan alaşımların XRD modelini göstermektedir. Analiz, Mg-5Sn-2Al alaşımında α -Mg ve Mg₂Sn intermetalik fazının mevcut olduğunu göstermektedir. Ana alaşıma Ce ilavesiyle, α -Mg ve Mg₂Sn fazlarına ilave olarak Ce₅Sn₄ fazına ait pikler gözlenmiştir.

Tablo 0.1. Alaşım elementinin Mg-5Sn-2Al alaşımının tane büyüklüğü üzerindeki etkisi

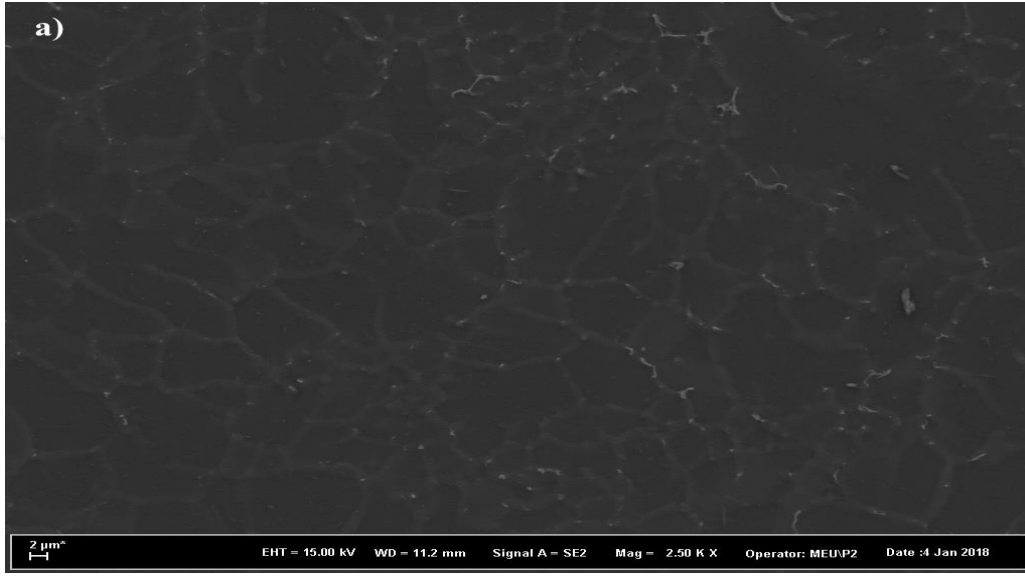
Alaşım	Tane Büyüklüğü (μm)
Mg-5Sn-2Al	10,3 (\pm 3,18)
Mg-5Sn-2Al-1Ce	4,80 (\pm 3,67)
Mg-5Sn-2Al-2Ce	4,23 (\pm 2,74)



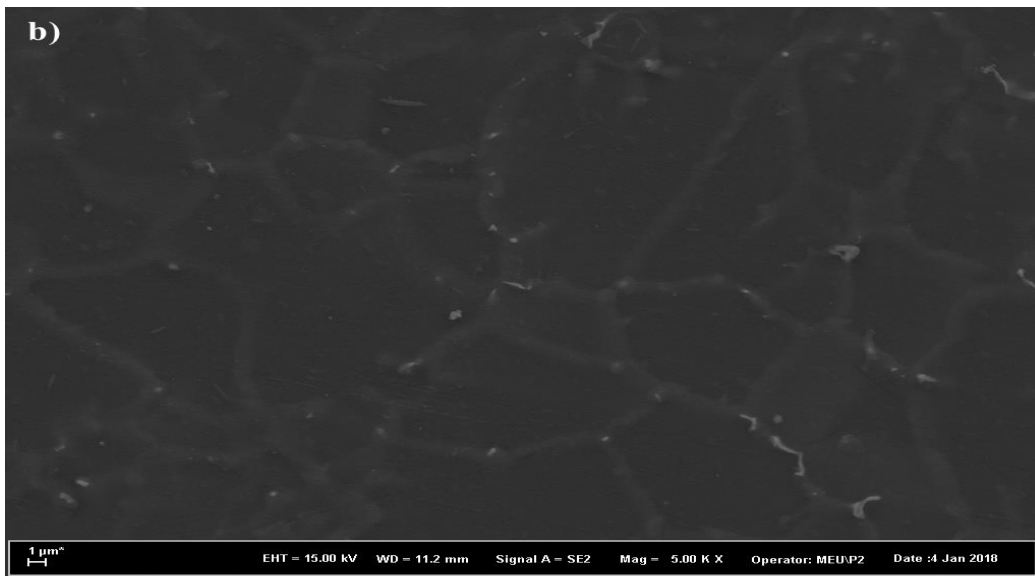
Şekil 0.1. Alaşımların XRD sonuçları

Mg-5Sn-2Al alaşımına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.2.1 ve Şekil 4.2.2'de verilmektedir. Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımlarına ait SEM görüntüleri ise sırasıyla Şekil 4.2.3, Şekil 4.2.4, Şekil 4.2.5 ve Şekil 4.2.6'da verilmiştir. Ana

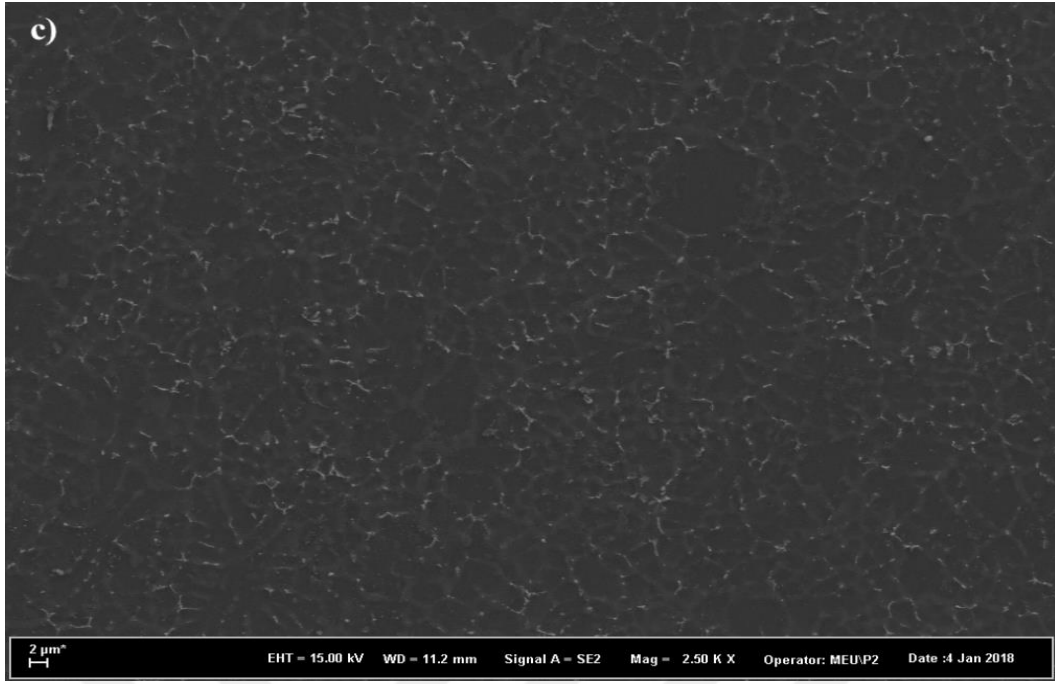
alaşım ve Ce içeren alaşımların ortalama dane büyüklüğü Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.2'lerden elde edilen sonuçlar, Mg-5Sn-2Al alaşımının ortalama dane büyüklüğünün artan Ce elementi miktarıyla %58,93 oranında (yaklaşık 10,3'ten 4,23'e) azaldığını göstermektedir. α -Mg'de katı çözünürlüğü olmadığı için Ce, Mg alaşımlarında etkili bir tane inceltici alaşım elementidir. Bu nedenle, seryumun bir miktarı kalay ile reaksiyona girerek yüksek ergime sıcaklığına sahip Ce_5Sn_4 intermetalik bileşiğini oluşturmuştur. Seryumun geri kalanı, muhtemelen tane büyümesini engelleyen katı/sıvı ara yüzeyinde bariyer oluşturmuş ve eriyikte Ce_5Sn_4 çekirdeklenmeyi artıran etki göstermiştir.



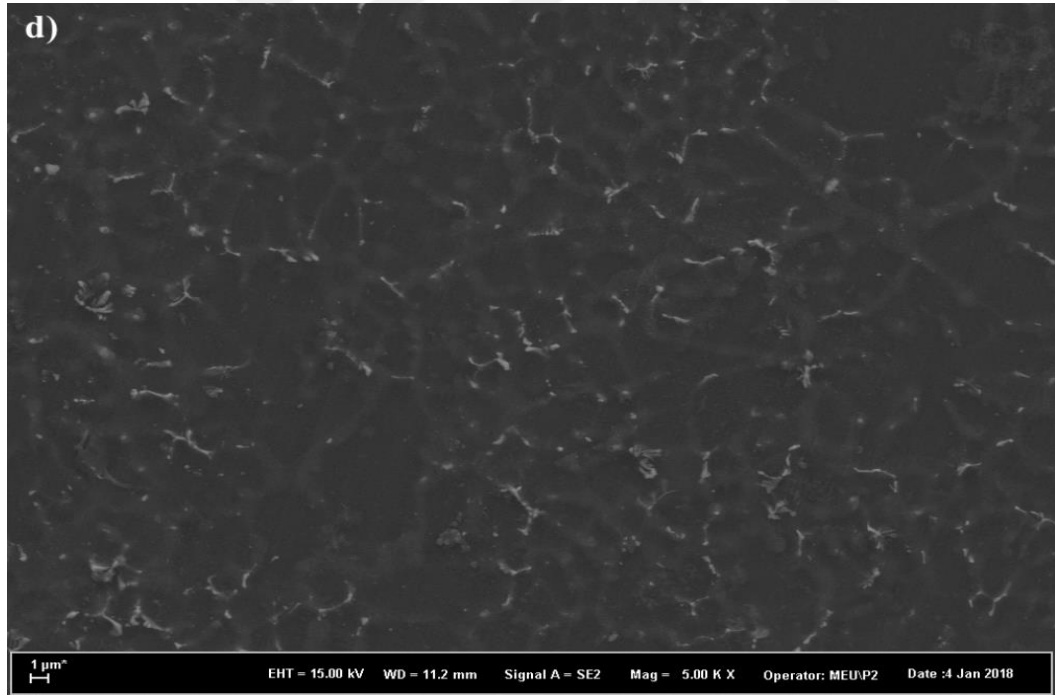
Şekil 0.2.1. Mg-5Sn-2Al alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı



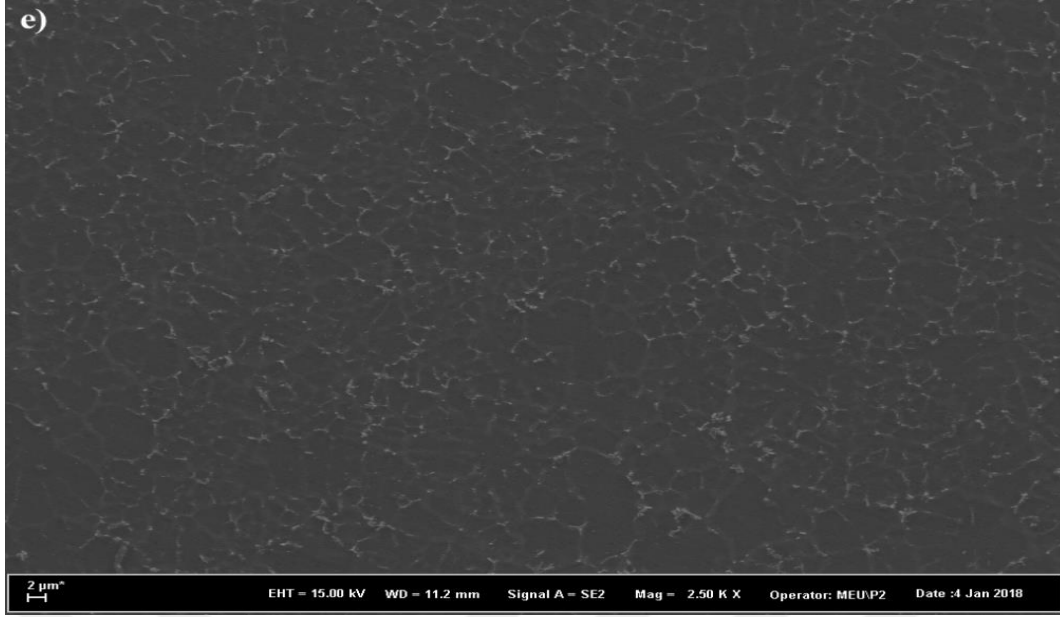
Şekil 0.2.2. Mg-5Sn-2Al alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı



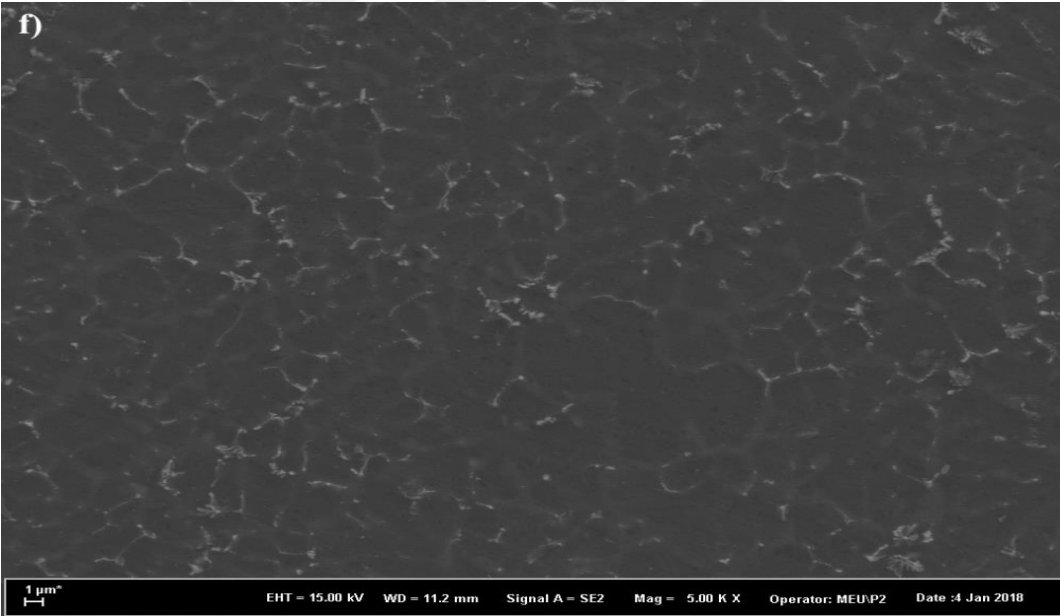
Şekil 0.2.3. Mg-5Sn-2Al-1Ce alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı



Şekil 0.2.0. Mg-5Sn-2Al-1Ce alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı



Şekil 0.2.5. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımı düşük büyütme SEM mikroyapısı



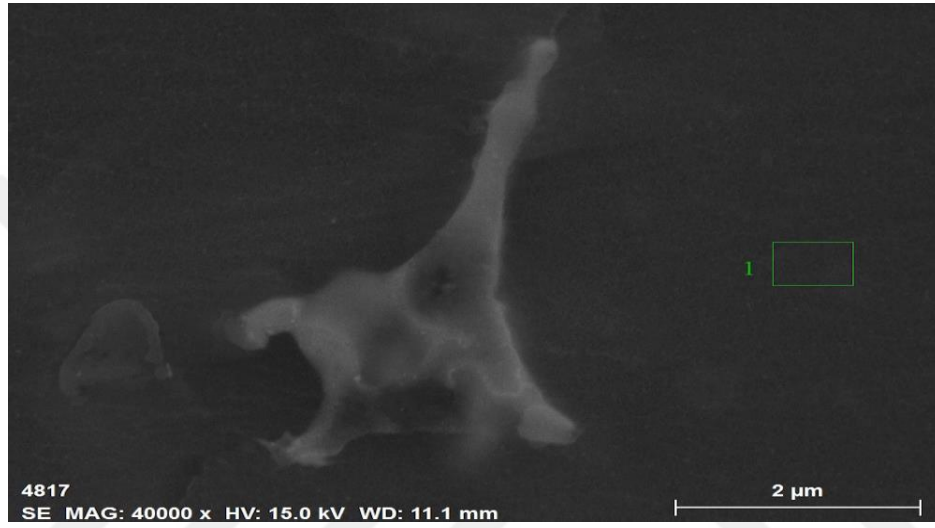
Şekil 0.2.6. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımı yüksek büyütme SEM mikroyapısı

Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizi Şekil 4.3.1 ve Şekil 4.3.2'te sergilenmektedir. Tablo 4.2'de Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran değerleri verilmiştir. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizinden görüldüğü gibi, bir miktar alüminyum ve kalay α -Mg danesinde çözülmüştür (Şekil 4.3.1'teki 1 nolu bölge). Şekil 4.3.2' te 2 nolu noktadan elde edilen Mg ve Sn arasındaki atomik oran dikkate alındığında, Mg₂Sn intermetalik

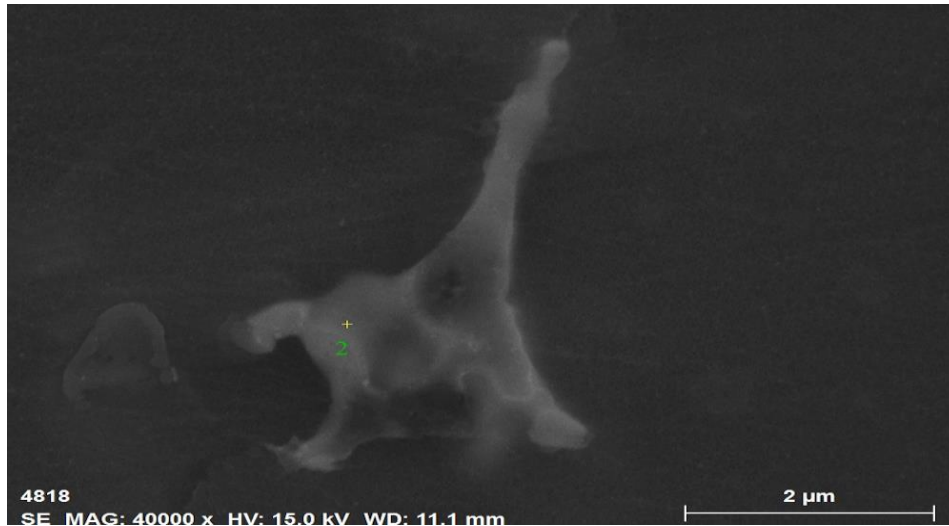
fazı doğrulanmıştır. Buna ek olarak, bazı alüminyumların Mg_2Sn içinde çözüldüğü de gözlenmiştir.

Tablo 4.2. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran

Bölge No	Kimyasal Kompozisyon (%)			Atomik Oran	
	Sn	Al	Mg	Mg/Sn	Mg/Al
1	1,54	2,04	96,78	-	-
2	22,18	2,74	75,08	3,39	-



Şekil 0.3.1. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizi (1)



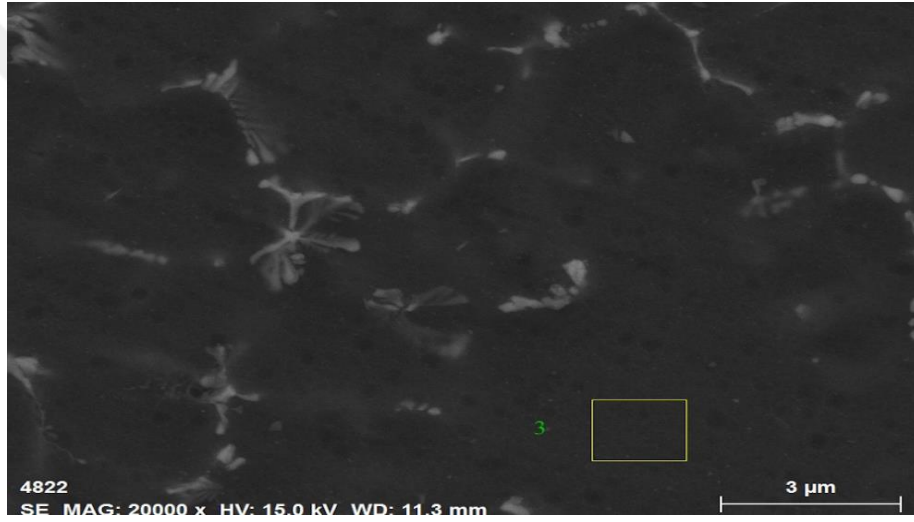
Şekil 0.3.2. Mg-5Sn-2Al alaşımının EDS analizi (2)

Şekil 4.4.1 ve Şekil 4.4.2, Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizini, Tablo 4.3 ise EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran değerlerini göstermektedir. α -Mg tanesinde

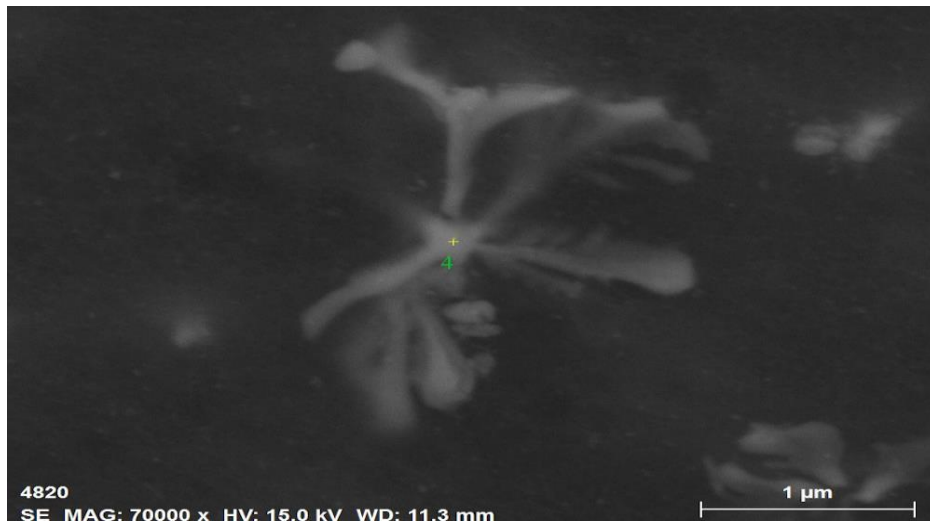
elde edilen üçüncü nokta, bazı alüminyum ve kalayın tespit edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte alüminyumun, α -Mg danesi içinde Mg-5Sn-2Al alaşımından daha az çözündüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.4.2'deki nokta 4'teki Ce / Sn atomik oranının, Ce_5Sn_4 intermetalik fazın mevcut olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, bir miktar alüminyumun Ce_5Sn_4 intermetalığı içerisinde çözündüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar XRD sonuçlarıyla uyumlu görülmüştür.

Tablo 4.3. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizine ait kimyasal kompozisyon ve atomik oran

Bölge No	Kimyasal Kompozisyon (%)				Atomik Oran		
	Ce	Sn	Al	Mg	Ce/Sn	Mg/Sn	Mg/Al
3	-	0,21	0,42	99,37	-	-	-
4	8,96	7,92	2,63	80,49	1,13	8,93	-



Şekil 0.4.1. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizi (3)

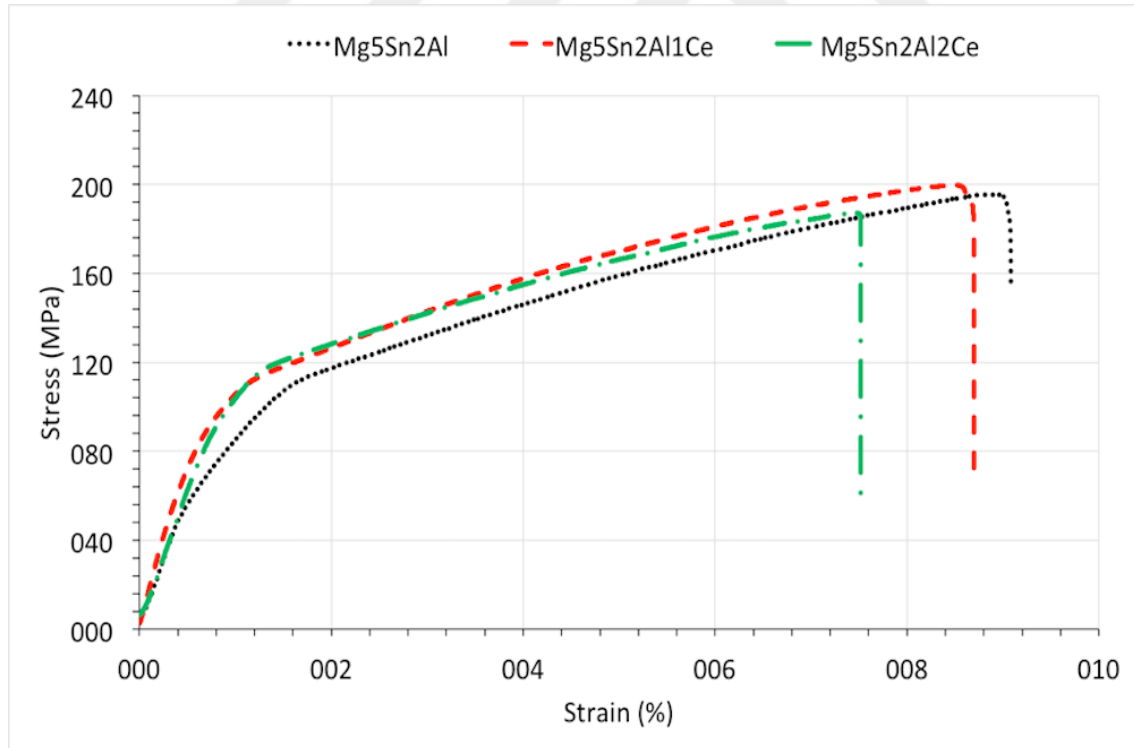


Şekil 0.4.2. Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımının EDS analizi (4)

4.2. Çekme Testleri

Oda sıcaklığındaki deneysel alaşımların temsili çekme eğrileri Şekil 4.5'te sergilenmiştir ve tüm test sıcaklıkları için akma dayanımı, çekme mukavemeti, uzama ve mikro sertlik değerleri Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

Şekil 4.5 ve Tablo 4.4'den de açıkça görülebileceği gibi Mg-5Sn-2Al alaşımının çekme özellikleri oda sıcaklığında Ce ilavesinden belirgin olarak etkilenmemiş, Mg-5Sn-2Al alaşımının uzaması Ce ilavesi ile azalmış, ancak artan Ce ilavesi ile sertlik artmıştır. Ancak, ana alaşımın yüksek sıcaklık özellikleri iyileştirilmiştir. Yüksek sıcaklıkta çekme özelliklerini geliştirmesinin nedenleri ile ilgili olarak, tane inceltme etkisinin ve Ce_5Sn_4 'ün mevcudiyetinin, dislokasyon hareketinin kısıtlanmasında önemli bir rol oynayabileceği söylenebilir. Buna ek olarak, EDS sonuçlarından, alüminyum alaşım elementinin, α -Mg fazında katılma sırasında daha az çözüldüğü gözlemlendiğinden, mukavemet artırıcı mekanizmalardan biri olan katı eriyik sertleşmesinin etkisini azalttığı düşünülmektedir. Bu nedenle, Mg-5Sn-2Al alaşımının yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileştirilmesinde Ce_5Sn_4 ikincil fazının ana etken olduğu düşünülmektedir.



Şekil 0.1. Oda sıcaklığında farklı Ce ilavesiyle Mg-5Sn-2Al alaşımının çekme testi eğrileri.

Tablo 0.4. Farklı Seryum konsantrasyonlu Mg-5Sn-2Al'nin oda sıcaklığı ve yükseltilmiş sıcaklıkta gerilme özellikleri ve mikro sertliği

Alaşım	Mikrosertlik (HV)	Çekme Özellikleri								
		Oda Sıcaklığı			120°C			180° C		
		Akma Dayanımı (MPa)	Max. Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (ε) (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Max. Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (ε) (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Max. Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (ε) (%)
Mg-5Sn-2Al	51	115±2	195±4	9,1±0,2	75±1	110±3	12,3±0,3	58±2	71±3	16,6±0,3
Mg-5Sn-2Al-1Ce	56	118±1	200±2	8,7±0,1	95±3	120±2	12,7±0,6	70±3	78±1	17,6±0,2
Mg-5Sn-2Al-2Ce	60	120±3	198±3	7,3±0,3	103±0	136±2	13,9±0,2	82±2	92±3	17,9±0,4

4.3. Sürünme Davranışı

Şekil 4.6 tipik olarak Mg-5Sn-2Al, Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımlarının 180°C'de farklı gerilmeler altında sürünme eğrilerini göstermektedir. Bütün alaşımlar için sürünme eğrileri, tipik olarak birincil sürünme, kararlı bölge sürünmesi ve üçüncül sürünme olan üç aşamada açıkça görülmektedir. Tüm alaşımlar için sürünme gerilimi, sürünme hızı ve sürünme ömrü, eğrilerin ikincil bölge olan kararlı bölgesinden hesaplanmıştır ve Tablo 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.6 ve Tablo 4.5'ten Mg-5Sn-2Al alaşımına Ce ilavesinin sürünme davranışını önemli ölçüde etkilediği ve tüm koşullarda sürünme direncini arttırdığı açıkça görülmektedir. Mg-5Sn-2Al alaşımı, 40 ve 50 MPa'da sırasıyla $1,95 \times 10^{-5}$ ve $1,06 \times 10^{-4}$ 'lük bir sürünme oranı sergilemiştir.

Genel olarak, Arrhenius denklemi (güç-yasa denklemi) [75-77] Mg alaşımlarının ikincil sürünme hızını ($\dot{\epsilon}$) tanımlamak için kullanılabilir;

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

"A" malzeme ile ilişkili bir sabit, " σ " uygulanan gerilme, "n" gerilme üssü, "Q" sürünme için bir aktivasyon enerjisi, "R" gaz sabiti ($8,314 \text{ J / mol.K}^{-1}$) ve "T" mutlak sıcaklıktır.

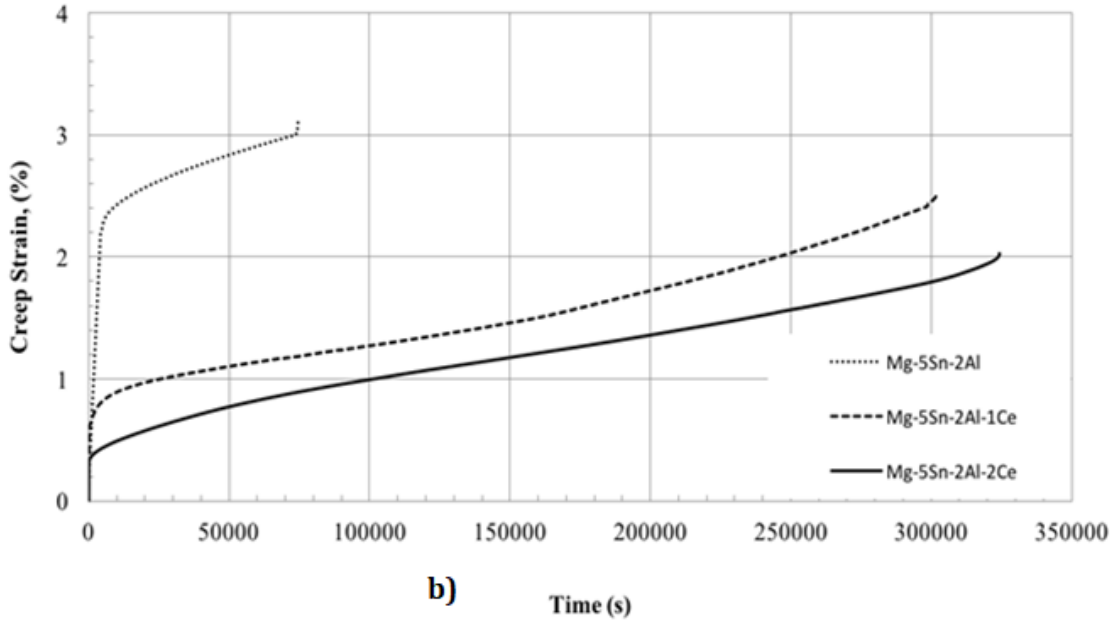
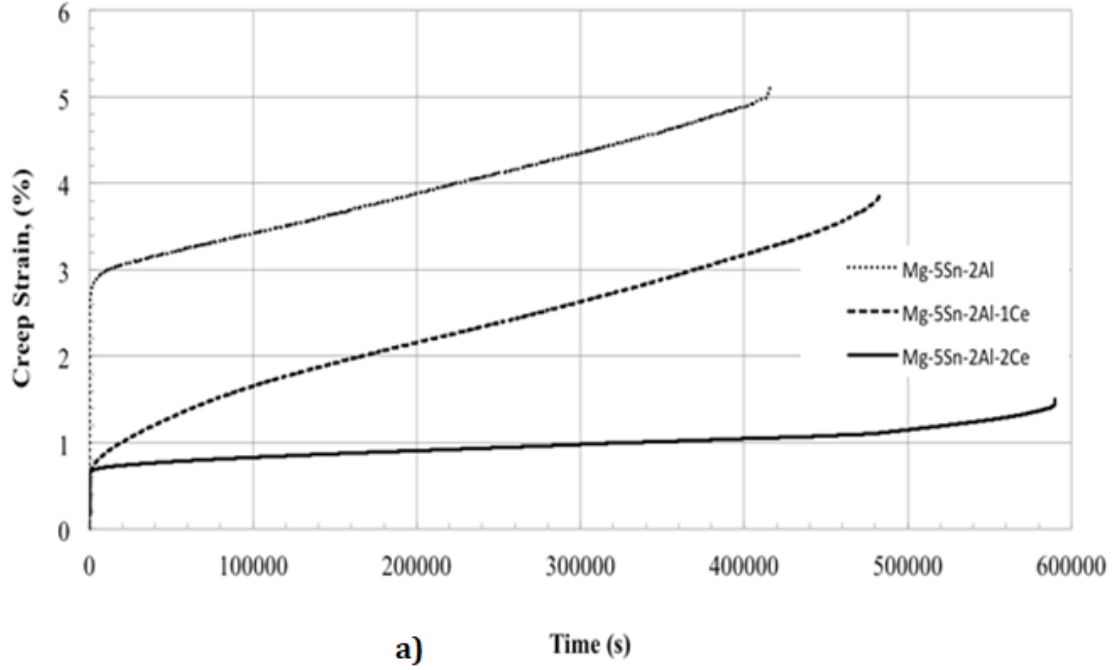
Ana alaşım ve Ce içeren alaşımlar için baskın sürünme mekanizması, gerilim üssü ile aktivasyon enerji değerleri değerlendirilerek tanımlanabilir. Şekil 4.7, ana alaşımın ve Ce içeren

alaşımın 180°C'de gerilme üslerini belirlemek için $\ln \dot{\epsilon}$ ile $\ln \sigma$ 'nın arasındaki eğimin grafiğini göstermektedir. Alaşım için Şekil 4.7'den elde edilen gerilme üssü, sırasıyla 4,30, 4,56 ve 4,95'tir. Şekil 4.8, uygulanan 50MPa gerilim altında ikincil sürünme hızlarının sıcaklığına bağlı olarak ana alaşımın ve Ce içeren alaşımın Arrhenius grafiklerini göstermektedir. Mg-5Sn-2Al, Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımaları için belirlenen aktivasyon enerjisi değerleri sırasıyla 136,4, 148,7 ve 159,3 kJ / mol'dür. Literatüre göre [105-109] ve elde edilen "n" ve "Q" değerlerine göre, 50 MPa/180-210°C'de deneysel alaşım için baskın deformasyon mekanizması bu çalışmada dislokasyon tırmanmasıdır. Ce ilavesi ile, Mg-5Sn2Al alaşımının gerilim üssünün ve aktivasyon enerjisi değerlerinin artışı, dane sınırları boyunca termal olarak kararlı Ce5Sn4 intermetalik varlığına atfedilebilir, dane sınırlarında var olan bu intermetalik dane sınırı kaymasını geciktirmiş ve sürünme direncinin artmasına neden olduğu düşünülmüştür.

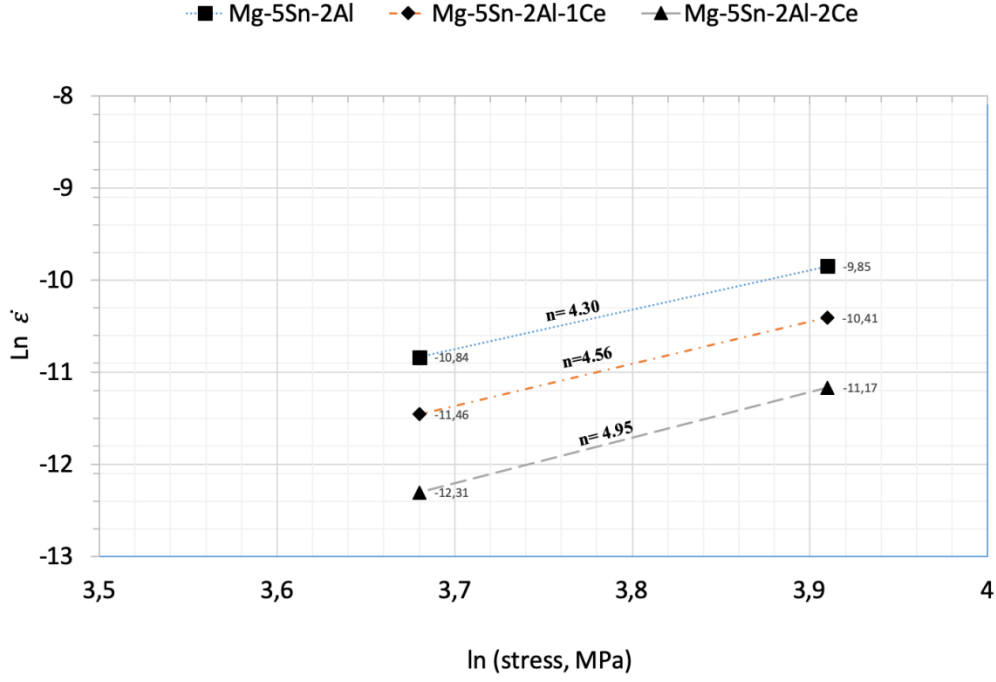
Tablo 0.5. Deneysel alaşımın 180°C ve 210°C 'de sürünme özellikleri

Alaşım	180°C					
	Sürünme gerilimi, ϵ (%)		Sürünme hızı, (s^{-1})		Sürünme ömrü, (saat)	
	40 MPa	50 MPa	40MPa	50MPa	40MPa	50MPa
Mg-5Sn-2Al	5,01	3,15	$1,95 \times 10^{-5}$	$1,06 \times 10^{-4}$	115,27	20,76
Mg-5Sn-2Al-1Ce	3,91	2,51	$1,05 \times 10^{-5}$	$2,21 \times 10^{-5}$	136,04	83,87
Mg-5Sn-2Al-2Ce	1,4	2,02	$4,5 \times 10^{-6}$	$1,55 \times 10^{-5}$	163,36	90,1

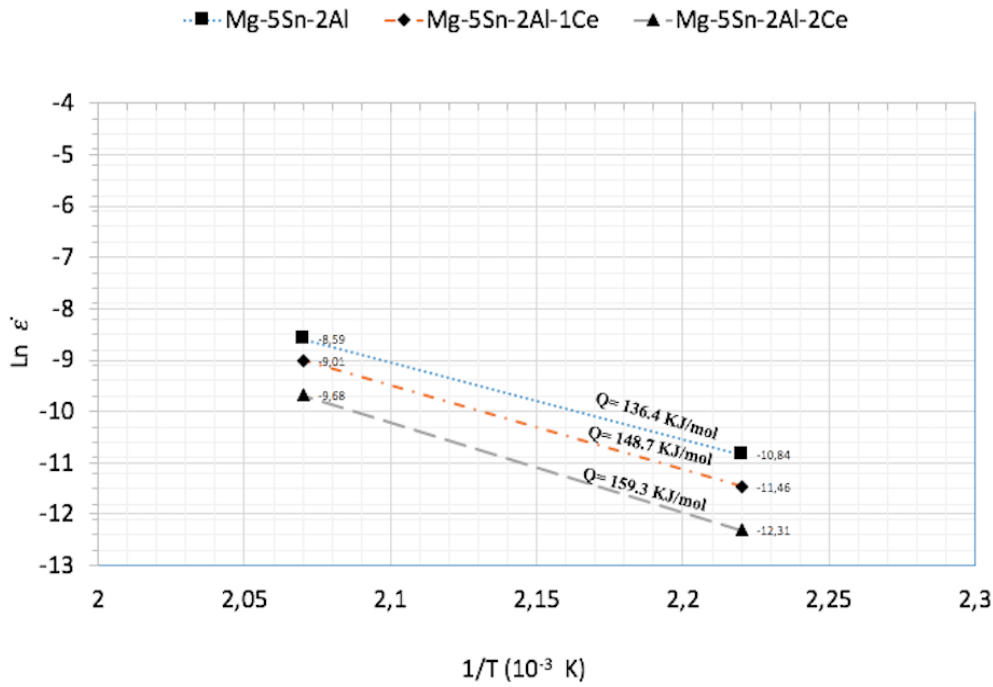
Alaşım	210°C					
	Sürünme gerilimi, ϵ (%)		Sürünme hızı, (s^{-1})		Sürünme ömrü, (saat)	
	40 MPa	50 MPa	40MPa	50MPa	40MPa	50MPa
Mg-5Sn-2Al	6,21	4,12	$1,85 \times 10^{-4}$	$5,76 \times 10^{-3}$	45,31	11,52
Mg-5Sn-2Al-1Ce	4,37	3,08	$1,22 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-3}$	96,42	37,15
Mg-5Sn-2Al-2Ce	2,48	2,78	$6,23 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-3}$	112,18	49,8



Şekil 0.1. 180°C'de Mg-5Sn-2Al, Mg-5Sn-2Al-1Ce ve Mg-5Sn-2Al-2Ce alaşımlarının geleneksel sürünme eğrileri; a) 40 MPa, b) 50 MPa.



Şekil 0.2. 180°C'de deneysel alaşımlar için gerilme üslerinin belirlenmesi için $\ln \dot{\epsilon}$ ile $\ln \sigma$ 'nın arasındaki eğimin grafiği



Şekil 0.3. 50MPa uygulanan stres altında deneysel alaşımlar için ikincil sünme hızlarının sıcaklığa bağımlılığı

5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, Ce ilavesinin Mg-5Sn-2Al alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu çalışmadan elde edilen kazanımlar ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Mg-5Sn-2Al alaşımının mikro yapısı α -Mg ve Mg_2Sn intermetalik fazlardan oluşmaktadır, Seryum ilavesi ile Mg-5Sn-2Al alaşımının dane boyutu azaltılmış ve Ce_5Sn_4 intermetalik fazı oluşmuştur.
2. Seryum ilavesi Mg-5Sn-2Al alaşımının mikro sertliğini 51 HV'den 60 HV'ye yükseltmiştir.
3. Mg-5Sn-2Al alaşımının mekanik özellikleri oda sıcaklığında çok fazla değişmese de, yüksek sıcaklıkta iyileşme gözlenmiştir.
4. Deneysel alaşımların sürünme test sonuçlarına göre Mg-5Sn-2Al alaşımının sürünme direnci seryum ilavesi ile geliştirilmiştir. Sürünme testleri esnasında dislokasyon tırmanma mekanizması tüm alaşımlar için baskın deformasyon mekanizması olmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Mert, F., & Özdemir, A. (2011). Magnezyum Alaşımlarının Basıncılı Dökümü ve Otomotivdeki Uygulamaları. In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)* (pp. 16-18).
- [2] Çiçek, B. (2011). Mg₂Si Partikül Takviyeli Mg Alaşımlarının Aşınma ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. KÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [3] Kramer, D. A. (2001). *Magnesium, its alloys and compounds* (No. 2001-341).
- [4] Kainer, K. U., & Von Buch, F. (2003). The current state of technology and potential for further development of magnesium applications. *Magnesium-alloys and technology*, 1-22.
- [5] Kainer, K.U., *Magnesium Alloys and Technology*, 2003.
- [6] Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S., *Automotive Technology Development*, Michigan.
- [7] Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced engineering materials*, 5(12), 866-878.
- [8] Lihong, W., Ligu, W., Pan, W., & Shaokang, G. (2010). Superplasticity and deformation mechanism of Mg-7.0 Al-0.2 Zn alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, 39(2), 194-198.
- [9] SADDOCK, N., D., Ph.D., The University of Michigan, Michigan, 2008.
- [10] Agnew, S. R., Yoo, M. H., & Tome, C. N. (2001). Application of texture simulation to understanding mechanical behavior of Mg and solid solution alloys containing Li or Y. *Acta Materialia*, 49(20), 4277-4289.
- [11] Yoo, M. H., Agnew, S. R., Morris, J. R., & Ho, K. M. (2001). Non-basal slip systems in HCP metals and alloys: source mechanisms. *Materials Science and Engineering: A*, 319, 87-92.
- [12] Friedrich, H. E., & Mordike, B. L. (2006). *Magnesium technology* (Vol. 212). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [13] Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. U. (2004). Automotive applications of magnesium and its alloys. *Trans. Indian Inst. Met*, 57(4), 397-408
- [14] Barber, L. P. (2004). Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys.
- [15] ZHANG, Z., Ph.D. Thesis, University of Naval, Quebec, 2000.
- [16] ZHOU, M., M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario, 2004.
- [17] Kleiner, S., Beffort, O., Wahlen, A., & Uggowitzer, P. J. (2002). Microstructure and mechanical properties of squeeze cast and semi-solid cast Mg-Al alloys. *Journal of Light Metals*, 2(4), 277-280.
- [18] MASOUMI, M., M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario, 2003.
- [19] Liu, G., Wang, Y., & Fan, Z. (2008). A physical approach to the direct recycling of Mg-alloy scrap by the rheo-diecasting process. *Materials Science and Engineering: A*, 472(1-2), 251-257.
- [20] Chino, Y., Kishihara, R., Shimojima, K., HOSOKAWA, H., YAMADA, Y., WEN, C. E., ... &

- MABUCHI, M. (2002). Metall. Sci. Metall. Sci. 14, 267-272, 1980. *Materials transactions*, 43(10), 2437-2442.
- [21] Chino, Y., Hoshika, T., & Mabuchi, M. (2006). Enhanced corrosion properties of pure Mg and AZ31 Mg alloy recycled by solid-state process. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 275-281.
- [22] Jayalakshmi, S., Kailas, S. V., & Seshan, S. (2002). Tensile behaviour of squeeze cast AM100 magnesium alloy and its Al₂O₃ fibre reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8), 1135-1140.
- [23] Rudajevová, A., & Padalka, O. (2005). Thermal expansion of pre-deformed, short fibre reinforced Mg-based composites. *Composites science and technology*, 65(6), 989-995.
- [24] Trojanová, Z., Gärtnerová, V., Jäger, A., Námešný, A., Chalupová, M., Palček, P., & Lukáč, P. (2009). Mechanical and fracture properties of an AZ91 Magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles. *Composites Science and technology*, 69(13), 2256-2264.
- [25] Gray, J., & Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review. *Journal of alloys and compounds*, 336(1-2), 88-113.
- [26] Mordike, B. L. (2002). Creep-resistant magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 324(1-2), 103-112.
- [27] Wang, N. G., Wang, R. C., Peng, C. Q., Yan, F. E. N. G., & Zhang, X. Y. (2010). Corrosion behavior of Mg-Al-Pb and Mg-Al-Pb-Zn-Mn alloys in 3.5% NaCl solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(10), 1936-1943.
- [28] <http://www.roskill.com/reports/magnesium>. (Son giriş: 21-11-2020).
- [29] Bassani, P., Gariboldi, E., & Tuissi, A. (2005). Calorimetric analysis of AM60 magnesium alloy. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 80(3), 739-747.
- [30] Ghomashchi, M. R., & Vikhrov, A. (2000). Squeeze casting: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1-3), 1-9.
- [31] Erdem, A. (2019). Magnezyum-Kalay esaslı Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Ekstrüzyon Sonrası Özelliklerinin İncelenmesi. Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [32] Ünal, M. (2008). *Magnezyum alaşımlarının döküm özelliklerinin incelenmesi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- [33] Ozturk, K., Liu, Z. K., & Luo, A. A. (2003, July). Phase identification and microanalysis in the Mg-Al-Ca alloy system. In *2003 Magnesium Technology*.
- [34] Song, G. L., & Atrens, A. (1999). Corrosion mechanisms of magnesium alloys. *Advanced engineering materials*, 1(1), 11-33.
- [35] Leil, T. A., Hort, N., Dietzel, W., Blawert, C., Huang, Y., Kainer, K. U., & Rao, K. P. (2009). Microstructure and corrosion behavior of Mg-Sn-Ca alloys after extrusion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(1), 40-44.

- [36] Yang, M. B., Jia, S. H. E. N., & Pan, F. S. (2009). Effect of Sb on microstructure of semi-solid isothermal heat-treated AZ61-0.7 Si magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(1), 32-39.
- [37] Cao, P., Qian, M., & StJohn, D. H. (2004). Grain coarsening of magnesium alloys by beryllium. *Scripta materialia*, 51(7), 647-651.
- [38] Cízek, L., Pawlica, L., Kocich, R., Janosec, M., Tanski, T., & Prazmowski, M. (2008). Structure and properties of Mg-Zrand Mg-Si alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 27(2), 127-130.
- [39] Barucca, G., Ferragut, R., Lussana, D., Mengucci, P., Moia, F., & Riontino, G. (2009). Phase transformations in QE22 Mg alloy. *Acta materialia*, 57(15), 4416-4425.
- [40] Rzychon, T., Kiełbus, A., & Szala, J. (2008). Microstructure and fluidity of sand cast ZRE1 alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 26(2), 135-138.
- [41] Huang, Y. D., Dieringa, H., Hort, N., Maier, P., Kainer, K. U., & Liu, Y. L. (2008). Evolution of microstructure and hardness of AE42 alloy after heat treatments. *Journal of alloys and compounds*, 463(1-2), 238-245.
- [42] Lee, Y. C., Dahle, A. K., & StJohn, D. H. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31(11), 2895-2906.
- [43] Qiu, D., & Zhang, M. X. (2009). Effect of active heterogeneous nucleation particles on the grain refining efficiency in an Mg-10 wt.% Y cast alloy. *Journal of alloys and compounds*, 488(1), 260-264.
- [44] Suzuki, A., Saddock, N. D., Riester, L., Lara-Curzio, E., Jones, J. W., & Pollock, T. M. (2007). Effect of Sr additions on the microstructure and strength of a Mg-Al-Ca ternary alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(2), 420-427.
- [45] Pekguleryuz, M. O., & Baril, E. (2001). Magnesium Technology 2000 Magnesium Technology 2000, 119-125, 2001. *Magnesium, 2000*, 119-125.
- [46] Baril, E., Labelle, P., & Pekguleryuz, M. (2003). Elevated temperature Mg-Al-Sr: creep resistance, mechanical properties, and microstructure. *Jom*, 55(11), 34-39.
- [47] Yang, Z., Li, J. P., Zhang, J. X., Lorimer, G. W., & Robson, J. A. M. S. E. L. (2009). Review on research and development of magnesium alloys. *Acta metallurgica sinica (English letters)*, 21(5), 313-328.
- [48] Hirai, K., Somekawa, H., Takigawa, Y., & Higashi, K. (2005). Effects of Ca and Sr addition on mechanical properties of a cast AZ91 magnesium alloy at room and elevated temperature. *Materials Science and Engineering: A*, 403(1-2), 276-280.
- [49] Wang, Y., Xia, M., Fan, Z., Zhou, X., & Thompson, G. E. (2010). The effect of Al8Mn5 intermetallic particles on grain size of as-cast Mg-Al-Zn AZ91D alloy. *Intermetallics*, 18(8), 1683-1689.

- [50] ASM Handbook, Vol.3, sayfa 305, 1108.
- [51] Zhang, L., Cao, Z. Y., Liu, Y. B., Su, G. H., & Cheng, L. R. (2009). Effect of Al content on the microstructures and mechanical properties of Mg–Al alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 508(1-2), 129-133.
- [52] Han, G., Ma, G., & Liu, X. (2009). Effect of manganese on the microstructure of Mg–3Al alloy. *Journal of alloys and compounds*, 486(1-2), 136-141.
- [53] Cao, P., Qian, M., & StJohn, D. H. (2006). Effect of manganese on grain refinement of Mg–Al based alloys. *Scripta Materialia*, 54(11), 1853-1858.
- [54] Nave, M. D., Dahle, A. K., & StJohn, D. H. (2000). Magnesium technology 2000. *The minerals, metals and materials society (TMS), Warrendale, PA, USA*, 233-242.
- [55] KULEKCI, M., K. (2007). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [56] Pekguleryuz, M., Labelle, P., Argo, D., & Baril, E. (2003). Magnesium diecasting alloy AJ 62 X with superior creep resistance, ductility and diecastability. In *Magnesium Technology 2003 as held at the 2003 TMS Annual Meeting*, 201-206.
- [57] Pan, Y., Liu, X., & Yang, H. (2007). Sr microalloying for refining grain size of AZ91D magnesium alloy. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(1), 74-76.
- [58] Trojanova, Z., Drozd, Z., Lukac, P., & Chatey, A. (2008). Mechanical properties of a squeeze cast Mg-Al-Sr alloy. *Journal of Archives of Materials Science and Engineering*, 29(2), 97-104.
- [59] Argo, D., Pekguleryuz, M., Labelle, P., Vermette, P., Bouchard, R., Lefebvre, M. (2002). *Magnesium Technology*, 1-7.
- [60] Kunst, M., Fischersworing-Bunk, A., L'Esperance, G., Plamondon, P., & Glatzel, U. (2009). Microstructure and dislocation analysis after creep deformation of die-cast Mg–Al–Sr (AJ) alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 510, 387-392.
- [61] L'Espérance, G., Plamondon, P., Kunst, M., & Fischersworing-Bunk, A. (2010). Characterization of intermetallics in Mg–Al–Sr AJ62 alloys. *Intermetallics*, 18(1), 1-7.
- [62] Bakke, P., Pettersen, K., & Albright, D. (2004). The influence of Sb, Si, and Sn on mechanical properties of Mg–Al alloys. *Magnesium Technology 2004*, 289-296.
- [63] S. Cohen, G.R. Goren-Mugistein, S. Avraham, G. Dehm, M. Bamberger, in: H.A. Luo (Ed.). (2004). *Magnesium Technology*, TMS, USA, 301–305.
- [64] Prasad, Y. V. R. K., Rao, K. P., Hort, N., & Kainer, K. U. (2009). Optimum parameters and rate-controlling mechanisms for hot working of extruded Mg–3Sn–1Ca alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 502(1-2), 25-31.
- [65] SHI, B., CHEN, R.,S., KE, W. (2010) . *Journal of Alloys and Compounds*, 453-461.
- [66] Jihua, C., Zhenhua, C., Hongge, Y., & Fuquan, Z. (2009). Microstructural characterization and mechanical properties of a Mg–6Zn–3Sn–2Al alloy. *Journal of alloys and compounds*, 467(1-2), L1-L7.

- [67] Liu, H., Chen, Y., Tang, Y., Wei, S., & Niu, G. (2007). The microstructure, tensile properties, and creep behavior of as-cast Mg-(1-10)% Sn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 440(1-2), 122-126.
- [68] Zhang, M., Zhang, W. Z., Zhu, G. Z., & Kun, Y. U. (2007). Crystallography of Mg₂Sn precipitates in Mg-Sn-Mn-Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(6), 1428-1432.
- [69] Kim, B. H., Jeon, J. J., Park, K. C., Park, B. G., Park, Y. H., & Park, I. M. (2008). Microstructural characterization and mechanical properties of Mg-xSn-Al-Zn alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 30(2), 93-96.
- [70] Fink, R. (2003). Die-Casting Magnesium. *Magnesium-Alloys and Technology*, 23-44.
- [71] Kerenciler, H. (2014). Magnezyum Alaşımlarında Yaşlanma Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi. Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [72] Altay, M. (2012). AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektriksel Parametrelerin Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [73] Öztürk, F., & Kaçar, İ. (2012). Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 12-20.
- [74] <https://www.bmw.com.tr/tr/all-models/5-series/sedan/2016/teknik-veriler.html#tab-0> (02.05.2020)
- [75] Pekguleryuz, M. O., Kainer, K., & Kaya, A. A. (Eds.). (2013). *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Elsevier.
- [76] Kumar, H., & Chaudhari, G. P. (2014). Creep behavior of AS41 alloy matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 607, 435-444.
- [77] Stelnacher, M., Mrvar, P., & Zupanlc, F. (2013). Interfaces in the magnesium-matrix composites. *RMZ M&G*, 60, 239-247.