

**SERYUMLU MAGNEZYUM  
ALAŞIMLARI GELİŞTİRME ve  
BUNLARIN KARAKTERİZASYONU  
Yüksek Lisans Tezi**

**Yiğit TÜRE**

**Eskişehir, 2016**

**SERYUMLU MAGNEZYUM ALAŞIMLARI GELİŞTİRME VE BUNLARIN  
KARAKTERİZASYONU**

**Yiğit TÜRE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği  
Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA**

**Eskişehir  
Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Haziran, 2016**

*Bu Tez Çalışması SAN-TEZ Komisyonunca kabul edilen 0286.STZ.2013-2 no.lu  
proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Yiğit TÜRE'nin "Seryumlu Magnezyum Alaşımları Geliştirme ve Bunların Karakterizasyonu" başlıklı tezi 16/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Emrah DÖLEKÇEKİÇ	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. İ. Özgür ÖZER	.....

Prof. Dr. Nedim Değirmenci

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### SERYUMLU MAGNEZYUM ALAŞIMLARI GELİŞTİRME VE BUNLARIN KARAKTERİZASYONU

Yiğit TÜRE

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Haziran, 2016

Danışman: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA

Magnezyum  $1.74 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığı ile yapısal metal olarak ağırlık tasarrufu amacıyla yapılacak metalik parça tasarımlarında en çekici alternatif malzemedir. Tüm diğer metaller gibi, saf olarak değil, alaşımları ile kullanıma girmiş ve ağırlık tasarrufunun istenildiği her uygulamada, örneğin otomotiv, uzay – havacılık, taşımacılık, spor eşyaları vb., pek çok uygulama alanı için de kullanıma aday olan yakın geleceğin en önemli yapısal metalidir. Büyük ölçüde mekanik anizotropi gösteren magnezyum metali gerekli alaşımlı elementleri ile modifiye edilmeden başarılı bir şekilde kullanımı imkansızdır. Kullanılan alaşım elementleri literatürdeki mevcut bilgi birikimine uygun olarak seçilmiştir. Bu çalışmada seryum elementinin magnezyum ve alaşımlarının üzerine etkileri incelenmiştir. Alaşımlar kontrollü atmosfer ortamında üretilmiş olup, sonrasında gerekli metalografik işlemlere ve testlere tabi tutularak elde edilen alaşımlar hakkında bilgiler elde edilmiştir. Seryumun magnezyum ve alaşımları üzerine tane boyutu küçültme etkisi yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak magnezyum alaşımlarının deformasyon kapasitesinde artış sağlanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Magnezyum ve alaşımları, Seryum, Mikroyapı, Sertlik, Deformasyon kapasitesi

## ABSTRACT

### IMPROVING AND CHARACTERIZATION OF MAGNESIUM ALLOYS CONTAINING CERIUM

Yiğit TÜRE

Department of Materials Science and Engineering

Anadolu University, Graduate School of Science

June, 2016

Supervisor: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA

Magnesium with its  $1.74 \text{ g/cm}^3$  density is the most attractive alternative when designing metallic parts for the purpose of weight reduction. Like any other metal, not in pure form but with its alloys it has already been in use, and furthermore presents itself as a candidate material for many applications such as automotive parts, aero – space components, sporting goods etc., being the most important structural metal of the near future. Magnesium and its alloys with their great anisotropic mechanical properties cannot be used successfully without alloying with appropriate elements. Selection of the alloying elements in this study was made based on the information gathered from the existing literature. In the study, effect of cerium on the properties of magnesium and magnesium alloys was examined. Alloys were produced in the controlled atmosphere furnace and thereafter, metallographic processes and tests were performed in order to get information about properties of obtained alloys. Particle size reduction effect of cerium on magnesium and alloys was observed. Consequences of this case, increased deformation capacity of magnesium alloys was provided.

**Keywords:** Magnesium alloys, Cerium, Microstructure, Hardness, Deformation capacity

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, baŐlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karŐılaŐtıđım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım Sayın Hocam Prof. Dr. Ali Arslan Kaya'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve yardımlarını benden esirgemeyen ekip arkadaşlarım Alican Ataman ve Dilara Eren'e teŐekkürü bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi olarak yanımda bulunan, benimle üzülp benimle mutlu olan, annem Melike Türe, babam Cengiz Türe'ye ve her zaman yanımda olan Özgün Duygu İnsan'a sonsuz teşekkür ederim.

Yiğit TÜRE

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalardan bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Yiğit TÜRE

## İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	Error! Bookmark not defined.
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Magnezyum.....	1
1.2. Magnezyum Alaşımaları .....	3
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>17</b>
2.1. Kullanılan Malzemeler .....	17
2.2. Alaşımın Hazırlanması.....	17
2.3. Numune Hazırlama .....	18
2.4. Numunelerin İncelenmesi .....	19
2.5. Fiziksel Özelliklerin Tespiti .....	20
2.5.1. Sertlik testi.....	20
2.5.2. Çekme testi.....	20
2.5.3. Serbest şişme (free inflation) testleri – blow forming.....	20
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>22</b>
3.1. Mikroyapı Analizi .....	22
3.1.1. Mg-2Zn-2Ce Alaşımı .....	23
3.1.2. Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce Alaşımı .....	24
3.1.3. Mg-1Y-2Zn-1Ce Alaşımı .....	26
3.1.4. Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Pb-1Ce Alaşımı.....	28
3.2. Mekanik Testlerle Karakterizasyon .....	29
3.3. Yeniden Kristalleşme Isıl İşlemleri.....	37
<b>4. SONUÇ .....</b>	<b>40</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>42</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>49</b>



## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo 1.1.</b> “Magnezyum – Alüminyum – Çelik” fiziksel özelliklerinin kıyaslaması. ....	3
<b>Tablo 1.2.</b> Alaşım elementlerinin ve proses tipinin özelliklerin değişiminde birlikte gösterdikleri göreceli etkiler. ....	4
<b>Tablo 1.3.</b> Farklı seryum oranlarının ZA104 alaşımın fiziksel özelliklerine etkisi. ....	10
<b>Tablo 1.4.</b> Alaşım İçerisindeki Element Miktarları .....	12
<b>Tablo 1.5.</b> Alaşım İçerisindeki Element Miktarları .....	13
<b>Tablo 1.6.</b> Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının kompozisyonları .....	14
<b>Tablo 1.7.</b> Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının çekme testi sonuçları .....	14
<b>Tablo 1.8.</b> Belirtilen alaşımların tane çapları .....	15
<b>Tablo 2.1.</b> Tedarik edilen alaşımların listesi. ....	17
<b>Tablo 2.2.</b> Hedeflenen alaşımların bileşimi ve şarj için kullanılan malzemelerin kütlece içeriği. ....	18
<b>Tablo 2.3.</b> Dağlama solüsyonu içeriği ve miktarları. ....	19
<b>Tablo 3.1.</b> Döküm sonrası nominal alaşım bileşimleri ve tane boyutları .....	22
<b>Tablo 3.2.</b> Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi. ....	24
<b>Tablo 3.3.</b> Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi. ....	25
<b>Tablo 3.4.</b> Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analiz. ....	27
<b>Tablo 3.5.</b> Konvansiyonel magnezyum alaşımları için literatürden alınan mekanik ölçüm değerleri. ....	30
<b>Tablo 3.6.</b> Alaşımların HB ve Hv sertlik değerleri .....	30
<b>Tablo 3.7.</b> Alaşımların çekme testleri sonuçları .....	30
<b>Tablo 3.8.</b> RFDA sistemi ile ölçülen elastisite modülü ve ses sönümlenme değerleri. ...	31

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mg-Ce faz diyagramı.....	5
Şekil 1.2. (a) M1 ve (b) ME11 alaşımlarının üst resimdekiler hızlı ve alt resimdekiler yavaş olmak üzere farklı hızlarda ekstrüzyon sonrası mikroyapıları. ....	9
Şekil 1.3. Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının çekme testi sonucunda gerilim-gerinim grafiği .....	14
Şekil 1.4. Işık mikroskobu resimleri a)ZEX400 b)ZEX200 c)ZX40 d)ZE40 e)Z4. (a'daki ok bütün numuneler için haddelenme yönünü göstermektedir).....	15
Şekil 1.5. Haddelenmiş ve tavlanmış numunelerin nötron difraksiyon tekniği ile elde edilen Basal {0002} ve prizmatik {10-10} yönlerindeki verileri. a)ZEX400 b)ZEX200 c)ZX40 d)ZE40 e)Z4 (RD: haddeleme yönü TD: çapraz yönü).....	16
Şekil 2.1. Ergitme fırını. ....	18
Şekil 2.2. Hazırlanan çekme numunesi boyutları. ....	20
Şekil 2.3. (a) Sistemin şematik gösterimi. (1) Kubbe yüksekliği için pozisyon transducer'i, (2) pozisyon transducer'I için çelik çubuk, (3) test cihazı kafaları, (4) load cell, (5) elektrik fanı, (6) silindirik fırın, (7) kalıp, (8) numune plakası, (9) gaz şişirmeli numune tutucusu, (10) gaz girişi; (b) şekillendirme odası çizimi, (c) test sonrası numune görünümü. ....	21
Şekil 3.1. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi. ....	23
Şekil 3.2. Mg-2Zn-2Ce alaşımının döküm mikroyapısı. Çok sayıda tav ikizi bulunduğu görülmektedir.....	24
Şekil 3.3. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.....	25
Şekil 3.4. Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce alaşımının döküm mikroyapısı. ....	26
Şekil 3.5. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.....	27
Şekil 3.6. Alaşımın döküm mikroyapısı ve tane sınırlarında yer alan intermetalik fazing boyut ve dağılımını gösteren ışık mikroskobu resimleri. ....	28
Şekil 3.7. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.....	29
Şekil 3.8. Tane sınırlarında görülen döküm porozitesi, az sayıdaki intermetalik ve sıklıkla görülen tav ikizlerini gösteren mikro yapı fotoğrafları.....	29
Şekil 3.9. Aramis sensörlü DIC sistemine sahip çekme testi düzeneği (Poliba, Italy)..	31
Şekil 3.10. 400 °C'de sıcak haddeleme uygulanmış farklı iki alaşımın sıcak haddelemede gösterdikleri kesit daralması oranları.....	32

<b>Şekil 3.11.</b> 400 °C’de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numunesi. ....	32
<b>Şekil 3.12.</b> 400 °C’de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numunesi. ....	33
<b>Şekil 3.13.</b> Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile T= 673+/-5K ve P=16 Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi. ....	33
<b>Şekil 3.14.</b> 450 °C’de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numuneleri (ilk testler). ....	34
<b>Şekil 3.15.</b> 450 °C’de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numuneleri (ikinci testler). .	35
<b>Şekil 3.16.</b> Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile iki ayrı numunede T= 723+/-5K ve P=16 Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi. ....	36
<b>Şekil 3.17.</b> Mg-2Zn-2Ce alaşımı üzerinde farklı koşullarda ilaveten yapılan serbest şişme testleri sonuçları. (a) İlk ilave test; (b) ikinci ilave test. ....	36
<b>Şekil 3.18.</b> Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile iki ayrı numunede T= 723+/-5K ve P=11 Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi. ....	37
<b>Şekil 3.19.</b> Sıcak hadde için seçilen alaşımların hadde sonrası dinamik olarak yeniden kristalleşmiş mikroyapı görüntüleri. (a) Göreceli daha kaba taneli; (b) Göreceli daha çok tane sınırı içeren bölge. ....	38

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

NO <sub>x</sub>	: Nitrojen oksit türevleri
HSP	: Hekzagonal sıkı paket
S-N eğrisi	: Gerilme-Çevrim sayısı eğrisi
YS	: Yield Strength (akma mukavemeti)
UTS	: Ultimate tensile strength (maksimum çekme dayanımı)
RE	: Rare earth (nadir toprak elementleri)
CRSS	: Critical resolved shear stress (kritik kayma gerilimi)
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
TYS	: Tensile yield strength (çekme akma mukavemeti)
XRD	: X-ray diffractometer (X ışınları difraktometresi)
Hv	: Hardness Vickers
HB	: Hardness Brinell
SEM	: Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)
EDS	: Energy-dispersive X-ray spectroscopy (enerji dağılımı spektrometresi)
ASTM	: American society for testing and materials
EDM	: Electric discharge machining (kıvılcımla malzeme işleme)
TEM	: Transmission electron microscope (geçirimli elektron mikroskobu)
E	: Elastik modulus (elastik modülü)
RFDA	: Resonance frequency damping analysis

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Magnezyum

Magnezyum ilk olarak 1755'de İskoçyalı kimyager Joseph Black tarafından keşfedilmiştir. Fakat Joseph Black bu elementi saf haline ayırtıramamıştır. 1808 yılında İngiliz kimyager Sir Humphrey Davy tarafından magnezyum ayırtırılmıştır. Bu yüzden Sir Humphrey Davy magnezyumun kaşifi olarak kabul edilir. Ayırtırma yöntemi olarak elektrolizi kullanmıştır.

Bundan 20 yıl sonra, Fransız Antoine Alexandre Brutun Bussy magnezyumu ayırtırmak için başka bir yöntem bulmuştur. Bu yöntem de yüksek sıcaklıklarda potasyumlu dehidrat magnezyum eritilerek gerçekleştirilmiştir.

Saf metalik magnezyumun eldesi ise 1833 yılında ünlü İngiliz bilim adamı ve aynı zamanda Sir Humphrey'in asistanı olan Micheal Faraday tarafından gerçekleştirilmiştir. Faraday redüklenmiş magnezyum klorür dehidratı elektroliz yaparak saf metalik magnezyumu elde etmiştir [1].

Günümüzde ekolojik ve ekonomik trendlerin gereği doğrultusunda magnezyum ve alaşımlarına olan ilgi üstel bir şekilde artmaktadır. Doğal kaynakların; özellikle ulaşım araçlarında (otomobil, uçak, vs.) kullanılan petrol ve türevleri azalması ve fosil yakıtların çevreye salınım yaptıkları sera gazları denilen CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gazları ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Her iki durum da göz önünde bulundurulduğunda yapısal malzemelerde ağırlık tasarrufunun yaratacağı faydalar gündeme gelmektedir. Dolayısıyla yapısal metaller arasında en hafif özkütleye sahip olan magnezyum ve alaşımları ön plana çıkmaktadır. Kullanılacağı uygulama alanına bağlı olarak (genellikle havacılık ve otomotiv sanayi) toplam kütledeki ağırlık tasarrufu aynı zamanda yakıt tasarrufu anlamına gelmekte ve doğamıza zarar veren karbon salınımını azaltırken ekonomik açıdan da fayda sağlamaktadır [1-3].

Magnezyum, 1S<sup>2</sup> 2S<sup>2</sup> 2P<sup>6</sup> 3S<sup>2</sup> elektron konfigürasyonunda iyonik formda bulunan; 20 °C' de sahip olduğu 1,738 g/cm<sup>3</sup> 'lük özkütlesi ile hali hazırda ticari olarak kullanılan en hafif yapısal metal olarak bilinir. 2. Dünya Savaşı sonrasında magnezyum alaşımları sektörel olarak kullanılmaya çalışıldı fakat hiç biri Ferdinand Porche'un dizaynı olan Volkswagen'in Beetle modelde ulaştığı başarıya ulaşamadı. Daha yaygın kullanıma girememesinin, dünya çelik sektörünün baskın olması da dahil olmak üzer pek çok nedeni vardır. Mühendislik nedenlerinin başında ise magnezyumun kristal sistemi yer alır. Heksagonal kristal sistemi nedeniyle magnezyum birçok anomali gösterir. Örneğin, HSP

kristal sistemi yüzünden düşük sıcaklıkta az sayıda kayma düzlemine sahiptir. Bazal kayma düzlemi ve ikizlenmeler neredeyse birlikte hareketlenir. Çekme ve basma mukavemetleri %50 civarında farklılık gösterir. Yeniden kristalleşme prosesindeki toparlanma (recovery) evresi çoğunlukla görülmez. Yorulmada S-N eğrisi kesiklilik gösterir. Bunların yanısıra kimyasal olarak da, özellikle nemli/sulu ve asidik ortamlarda korozyon direnci düşüktür ama bazik ve özellikle florürlü ortamlarda pasive olabilmektedir. Magnezyumun bu etkenlerin dışında bir de kullanımını kısıtlayan tekstür problemi vardır [1,4-14].

Magnezyum ve alaşımlarının önemi özellikle bulunduğumuz yüzyıl içerisinde belirgin bir şekilde artmıştır. Bu durumun en temel nedeni, özkütle bazında en yaygın yapısal metallerden olan çelikten % 78 ve alüminyumdan % 36 daha hafif olmasıdır [15]. Bu durum Tablo 1.1.'de diğer mühendislik özellikleri kıyaslaması ile birlikte görülmektedir. Yalnız kullanılacağı sektörler de göz önünde bulundurulduğunda, geliştirilmesi gereken mukavemet, süneklik ve sürünme gibi özellikler vardır. Bu özelliklerin de geliştirilebileceği yapılan çalışmalar ile gösterilmiş olup halen daha devam etmektedir [16-18]. Örneğin düşük sürünme direnci, magnezyum alaşımlarının kullanımını kısıtlayan özelliklerinden biridir. Bunun sebebi magnezyumun öz-difüzyon (self diffusion) katsayısının yüksek oluşu kadar, 225 °C' nin üzerinde prizmatik ve piramidal ilave kayma sistemlerinin hareketlenmesidir [19]. Burada sunulan çalışma temelde bir alaşım geliştirme çalışması olup, ele alınan alaşım sisteminde örneğin deformasyon gibi bir mukavemet artırıcı işleminin etkilerini gözlemlemek ve sistemin üçüncü bir element ilavesi durumunda yaşlandırmaya uygun olup olmadığını tespit etmektir. [20].

**Tablo 1.1.** “Magnezyum – Alüminyum – Çelik” fiziksel özelliklerinin kıyaslaması [21].

	Magnezyum	Alüminyum	Çelik
Yoğunluk ( $\rho$ ) gr/cm <sup>3</sup>	1,74	2,70	7,86
Elastik Modül (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/ $\rho$	26	26	27
YS/ $\rho$	86	74	32
UTS/ $\rho$	144	112	51

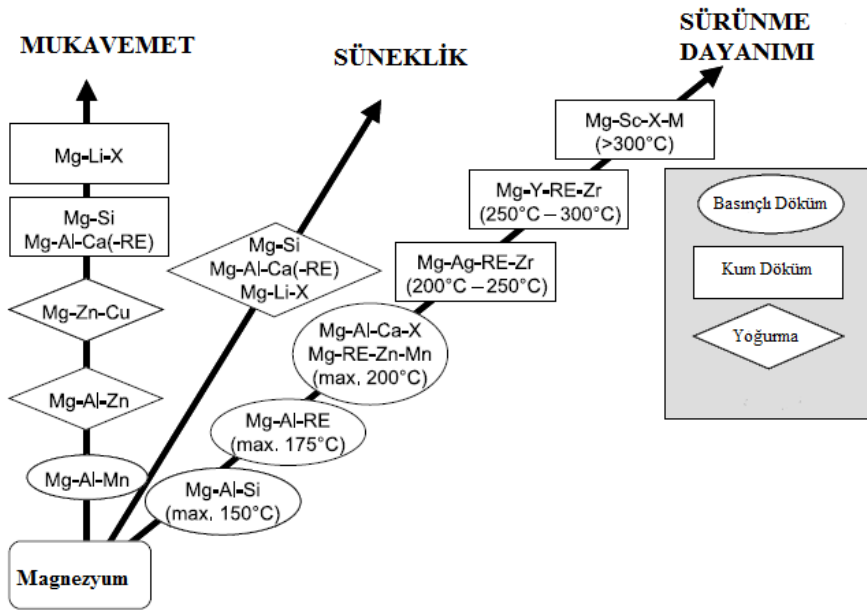
## 1.2. Magnezyum Alaşımları

Alaşım yapımı Hume-Rothery kurallarına uygun iki veya daha fazla metalin birbiri içerisinde eritmeyle karışımı yoluyla gerçekleşir [22]. Tüm diğer metallerin alaşımlamasında olduğu gibi, uygun elementlerle oluşturulacak sistemlerle magnezyum kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak istenilen özelliklere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Genel olarak magnezyum için konvansiyonel alaşımlarında kullanılan başlıca alaşım elementleri alüminyum, silis, çinko, mangan ve zirkonyumdur. Son 20 yıldır magnezyumda diğer metallerin, ametallerin ve/veya nadir toprak elementlerinin de denendiği yoğun bir alaşım geliştirme çabası vardır. Nadir toprak elementleri magnezyum alaşımlarında yüksek sıcaklık özelliklerini geliştiren ve ortaya çıkan alaşımın işlenebilirliğini arttıran önemli bir faktör olarak bilinir. Bu elementler magnezyum matris ile bir araya gelerek termal olarak kararlı intermetalik çökelti partikülleri oluştururlar [23-26]. Alaşım elementlerinin magnezyum bünyesine kazandırdığı özellikler ve konvansiyonel proseslerin etkileri Tablo 1.2’de genel olarak özetlenmeye çalışılmıştır.

Magnezyum alaşım geliştirmede göz önüne alınması gereken ve Tablo 1.2’de yer almayan en önemli hususlardan biri yeniden kristalleşme davranışıdır. Magnezyum ve alaşımları tüm deformasyonlu işlemlerde kristallografik yönelme (tekstür) gösterirler. Diğer metallerde de görülebilen bu deformasyon tekstürü o metallerde yeniden kristalleşme ile giderilebilirken, magnezyumda bu genellikle olmamakta ve tekstür korunmaktadır. Alaşım geliştirmede göz önüne alınması gereken ilave strateji, işte bu

durumun oluşmaması amacıyla yeniden kristalleşme esnasında çekirdeklenme noktaları olarak davranabilecek çökelti partiküllerinin oluşması istenir. Tekstürün giderilememesi, magnezyum alaşımlarının şekillendirme kabiliyetini, diğer bir deyişle kullanımlarını sınırlamakta ve parça dizaynında problem yaratmaktadır. Çünkü tekstürlü metal ile üretilmiş parçalar hem yöne bağlı davranış farklılıkları hem de akma dayanımı açısından çekme-basma asimetrisi gösterirler [27-29].

**Tablo 1.2.** Alaşım elementlerinin ve proses tipinin özelliklerin değişiminde birlikte gösterdikleri göreceli etkiler. [1]



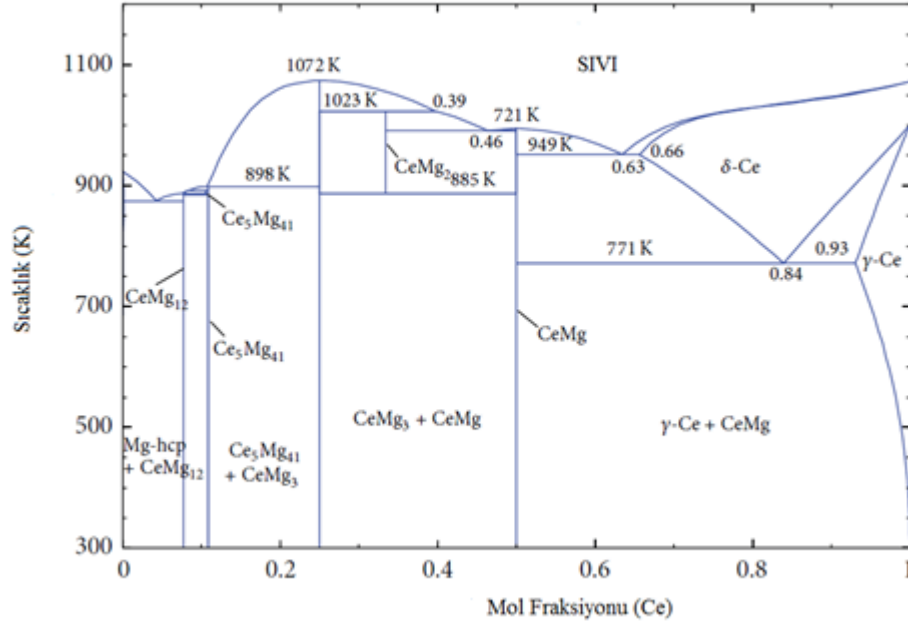
Yapılan bu çalışmada Magnezyum – Seryum alaşımlarının üzerine yoğunlaşmıştır. Seryum her zaman saf halde bulunmadığından dolayı aynı zamanda seryum, misch metal olarak da karşımıza çıkmaktadır. Misch metal 'in yapısında % 50 seryum, % 25 lantan ve az miktarlarda neodyum ve praseodim bulunmaktadır [30].

Mg – Ce faz diyagramına göre, seryumun magnezyum içerisindeki çözünürlüğü çokta fazla değildir. Şekil 1.1'den de görüldüğü üzere 592 °C' deki (~865 K) yani ötektik sıcaklıkta ki kütlece çözünürlüğü 0,52%' dir [31].

Nadir toprak elementlerinin, magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon uygulamasından sonra tekstür yapısındaki zayıflamayı ve tanelerin daha rastgele (random) bir hal almasını ilk olarak Ball ve Pragnel incelemiştir. Bu çalışmada WE54 alaşımını kullanmışlardır. Alaşım yapısında nadir toprak elementleri konsantrasyonu çok düşük olsa bile tekstür davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğunu saptamışlardır [32]. Bu olumlu etkinin



yanında nadir toprak elementlerinin (rare earth elements-RE) alaşım bünyesine eklenmesiyle dökülebilirlik özelliğinde azalma saptanmıştır [33].



Şekil 1.1. Mg-Ce faz diyagramı.

Genel olarak metalurjik tekstür zayıflaması nadir toprak elementi eklenmiş alaşımların yeniden kristallenmesi sürecine bağlanmıştır. Bilim dünyası tarafından nadir toprak elementlerinin magnezyum alaşımlarındaki, mekanizmasını yukarıda açıklamış olduğumuz bu etki üzerinde, reaksiyon kinetiği ve bileşimde mevcut diğer elementlerin varlığı durumunda sonuçları açısından halen çalışmalar sürdürülmektedir [34,35].

Nadir toprak elementleri ilavesinin yeniden kristalleşme ile tekstürün giderilmesindeki olumlu etkilerine ilaveten, oluşan intermetaliklerin mukavemet artırıcı etkileri bakımından da katkıları vardır. Aynı çökelti partiküllerinin olumlu bir diğer etkileri ise yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini ve difüzyonu yavaşlatarak sürünmeyi yavaşlatıcı etkileridir. Yapılan birçok çalışma göstermiştir ki belirli oranlarda seryum katkısı magnezyum alaşımlarında tane boyutlarının iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Tane sınırlarında oluşan  $Mg_{12}Ce$  tane büyümesini engelleyerek tanelerin daha küçük kalmasını sağlamaktadır. Tane boyutlarında ki bu iyileşme malzemenin mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilemektedir. Bu olumlu etkilerinin yanında Ce katkısının kaba intermetalikler oluşması durumunda alaşımın üzerinde negatif etkileri de vardır. Tane büyümesinin önüne geçen, tane sınırlarında oluşan kaba  $Mg_{12}Ce$  yüksek sıcaklık

fazının oluşması bu tür bir örnek teşkil eder. Bu oluşan faz, uygulanan bazı ısıl işlemlerden sonra bile mevcudiyetini alaşım bünyesinde korumakta ve boyutlarına bağlı olarak çatlak ve kopmaya sebebiyet vermektedir [36-44].

Toprak alkali elementlerinin mekanik özellikleri artırmasının yanında korozyon direncini de arttırdığı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Toprak alkali metali olarak adlandırılan elementlerin korozyon direncine etkisi "scavenger effect" olarak isimlendirilmiştir. Bu durum alaşım içerisindeki kirlilik olarak belirtilen korozyona sebebiyet veren demir gibi elementlerin toprak alkali metaller ile metallerarası bileşik oluşturarak zararsız hale getirmesiyle olur. Toprak alkali elementlerin bu zararlı elementleri yakalayıp zararsız hale getirerek katodik aktiviteyi düşürme durumunu ilk olarak Mercer ve Hill bulmuşlardır [45]. Diğer bir neden ise toprak alkali metallerin yüzeyde oluşturduğu ince koruyucu oksit tabakadır. Rosalbino'nun yapmış olduğu çalışmaya göre yapıda oluşan  $(Al_{1-x}Mg_x)_3Ce$  fazının AZ91 alaşımı üzerinde ince bir tabaka olarak korozyona karşı koruduğu görülmüştür [46-48].

En genel hatlarıyla seryumun magnezyum alaşımları üzerindeki etkilerini sıralarsak [31,49-55];

- Korozyon direncini artırır,
- Plastik deformasyon kabiliyetini artırır,
- Deformasyon sertleşmesi oranını artırır,
- Sürünme davranışında iyileşme sağlar,
- Akma mukavemetini düşürür.

Literatürde yapılan bir çalışmaya göre Mg-1.5Zn-0.2Zr alaşımının üzerine sırasıyla yüzdece 0.1, 0.3, 0.5 seryum ilavesi yapılmıştır. Üretim metodu olarak yarı sürekli döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre en iyi tane boyutu iyileştirme etkisi kullanılan alaşım için 0.3 % olarak belirlenmiştir. Seryum eklenen numunelerde  $Mg_{12}Ce$  fazı gözlemlenmiştir. Seryum, alaşımda yoğun olarak tane içerisinde ziyade tane sınırlarında gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak magnezyumun içerisinde seryumun yüzey aktif element olması ve pozitif absorpsiyon etkisi olarak gösterilmiştir. Belirtilen bu etkiler ışığında magnezyum eriğinin yüzey enerjisi düşmüştür. Bu düşüş aynı zamanda çekirdeklenme enerjisinde de düşmeye sebebiyet vererek çekirdeklenme oranında artışa neden olduğu belirtilmiştir [56].

Yapılan diğer bir çalışmaya göre, seryum içeren Mg-3Ce-1,2Mn-1Zn alaşımına Zn ve/veya Sr eklenmesi  $Mg_{12}Ce$  fazının morfolojisine ve alaşım içerisindeki dağılımına

herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, Zr ve Sr içeren alaşımların yapısında içermeyenlere oranla daha fazla miktarda kalıntı  $Mg_{12}Ce$  fazı gözlemlenmiştir. Bu durum ötektik  $Mg_{12}Ce$  fazının stabilitesini pozitif yönde etkileyerek yüksek sıcaklıkta alaşımın sürünme davranışında olumlu bir etki yaratmıştır [57].

Literatürdeki bir diğer çalışmada seryum ve lantanyumun magnezyum alaşımlarından Mg-6Zn-3Cu üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Döküm mikro yapısına göre seryumca zengin olan alaşımın lantanyumca zengin olan alaşıma göre tane yapısını daha iyi ölçülerde iyileştirdiği, tane sınırlarındaki ötektik faz miktarını arttırdığı ve termal olarak daha kararlı MgRE ve  $Mg_{12}RE$  bileşimleri oluşturduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda toprak nadir elementi olarak seryumca zengin alaşımın daha yüksek sürünme direnci gösterdiği görülürken bu element kayma mukavemetinde düşüşe sebebiyet vermiştir [23].

Seryumca zengin misch metalin bir başka çalışmada ZC63 alaşımının üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmada kütlece %1 eklenen bu element formunun alaşımın yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu durumun gerçekleşmesinin sebebi ise termal açıdan istikrarlı olan  $Mg_{12}RE$  ve MgRE bileşiklerinin belirgin ölçüde tane sınırı hareketlerini engellemesi şeklinde açıklanmıştır [58,59]. Bu belirtilen özelliğinden dolayı seryum özellikle sürünme dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılacak magnezyum alaşımlarında tercih sebebi olmaktadır.

Anılan bu çalışmada ise seryum içeren ME21 alaşımında kütük sıcaklığı, ekstrüzyon oranı ve soğuma şartlarının kristalografik yönelmeye ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Seryumun oluşturduğu  $Mg_{12}Ce$  partikülleri vasıtasıyla nadir toprak elementi etkisi ve yeniden kristalleşme üzerine olumlu etkileri olduğu gözlenmiştir. Bu etkilerin sonunda ekstrüzyon yönüne bazal düzlemde 40-50 (derece) zayıf yönelme ve homojen küçük boyutlu taneler meydana gelmiştir. Bu düzeydeki yönelme oda sıcaklığındaki ekstrüzyon ile üretilen ürünün sünekliğini geliştirirken aynı zamanda %30 çekme ve %20 basma uzamasını arttırmıştır. Ortaya çıkan üniform tane küçülmesi işlenebilirlik açısından alaşımı pozitif yönde etkilemiştir. Hall-Petch eşitliğine göre tane boyutunun azalmasıyla akma mukavemeti üst seviyelere taşınmıştır. Magnezyum alaşımları söz konusu olduğunda, basma akma mukavemeti sıklıkla, bu değerlerin asimetrisine öncülük eden  $\{10-12\}$  /  $\langle 10-11 \rangle$  ikizlenme sisteminin aktivasyonu ile belirtilir. Tane boyutu ve kritik kayma gerilmesi (CRSS) arasındaki ilişki

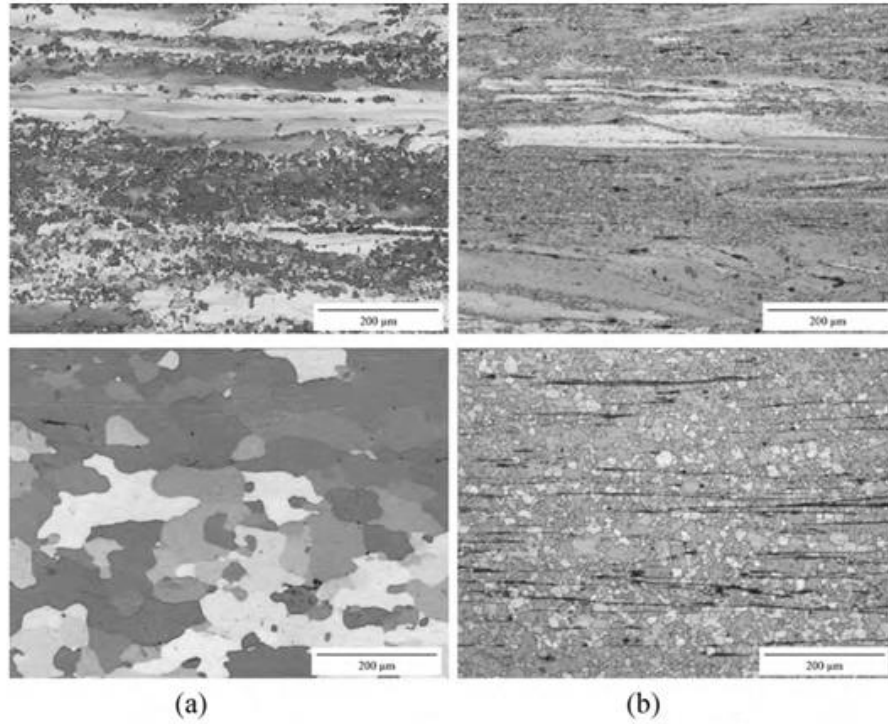
kayma düzlemlerinin aktivasyonundan daha belirgin olduğundan, ikizlenme açısından tane boyutundaki azalma özel bir önem arz etmektedir [60-62].

Az miktarda alaşım bünyesine katılan nadir toprak elementleri olması durumunda plastik deformasyon sonrasında kayma bandı üzerinde yeniden kristallenmiş taneler gözlemlenmiştir. Bu kayma bantları üzerinde oluşan ve büyüyen taneler normal tanelere kıyasla daha rastgele tane yönlenmesi oluşumunu sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmada tekstür şiddetini zayıflatmak adına Nd, Ce ve Y kullanılmıştır. Gerekli miktardaki tekstür zayıflaması doğrudan katı çözünlülüğü ile ilişkilidir. Sözü geçen tekstür şiddeti azalması ile levha üretimine katkı sağlanacağı saptanmıştır. Tekstür miktarındaki azalmanın diğer sebepleri olarak ikizlenme içeren deformasyon bantlarının varlığı ve tane büyümesinin engellenmesi gösterilmiştir. Meydana gelen ikizlenme içeren kayma bantları homojen olmayan deformasyonlar sonucu oluşmuş tipik makroskopik kayma bantlarından farklıdır. Ancak, bu ikincil kayma bantları, çatlak başlama noktası özelliği gösterdikleri için levha üretimi uygulamalarında bünyede istenmezler [63-66].

Literatürdeki bir diğer çalışmada korozyon davranışı açısından inceleme yapılırken yapı içerisinde oluşan fazlardan 3 tanesi dikkate alınmıştır. Bunlar  $\alpha$  (matris),  $\beta$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) ve  $\gamma$  (yüksek oranda Al ve Ce içeren faz) fazlarıdır. Alüminyum içeren AM60 serisi alaşıma seryum eklenmesiyle beta fazında azalma olurken bu faz yerini gama fazına bırakmıştır. Optimum seviye olarak 0,82% ve 0,59% belirlenmiş ve bu oranlarda eklenen seryum elementinin alaşım yapısındaki  $\beta$  fazı oranını ciddi şekilde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Çalışmada  $\beta$  fazının yerine geçen  $\gamma$  fazının şeklinin ince iğnemsî bir yapıda olduğu belirtilmiştir. Yukarıda belirtilen oranların üzerinde bir ekleme yapılması durumunda ise AM-RE mikro yapısında herhangi bir değişim olmamıştır. Korozyon davranışı açısından AM-RE AM60 oranla çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durumun sebebi olarak ise  $\beta$  fazı oranının düşerek yerini  $\gamma$  fazına bırakması ve meydana gelen Al, RE oksit veya hidroksit yapısının alaşım bünyesinde koruma sağlaması gösterilmiştir [67].

Magnezyum mangan ikili alaşımı üzerinde yapılan bir diğer çalışmada seryum eklenmesi oluşan yeni alaşımın (ME11) ile kristalografik tekstür ve ekstrüzyon üzerine etkileri incelenmiştir. Alaşım bünyesinde manganın ve seryumun kütlece yüzdeleri sırası ile % 0,95 ve % 0,86'dır. Elde edilen bu alaşım hızlı (10 m/dk) ve yavaş (1 m/dk) olmak üzere ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur ve sonuçları tartışılmıştır. Şekil 1.2.' de görüldüğü gibi M1 alaşımı hızlı ekstrüzyondan sonra tamamen yeniden kristallenmiş ve

büyük taneli bir mikro yapı görüntüsü verirken düşük hızda olanda uzamış taneler üzerinde parçalı yeniden kristallenmiş taneler görülmektedir. Seryum katkılı olan yani AM11 alaşımında ise aynı davranış görülmüştür fakat yeniden kristallenen tanelerin boyutlarında gözle görülür bir küçülme söz konusudur. Ayrıca ME11 alaşımında çökelti tanecikleri ekstrüzyon yönünde uzunlamasına sıralanmışlardır. Mikro yapıdaki bu değişiklikler mekanik özelliklere de yansımıştır. ME11 alaşımına ekstrüzyon yönüne paralel bir şekilde çekme testi uygulanmıştır. TYS ve UTS sonuçları yavaş ve hızlı ekstrüzyon numunelerine göre sırasıyla 288, 189 ve 300, 251 MPa olarak görülmüştür. Nadir toprak elementi katılmayan M1 alaşımında ise aynı sırayla aynı değerleri 183, 189 ve 243, 261 MPa olarak ölçülmüştür. Bu farklılığın sebepleri olarak seryum katkısının alaşımın yeniden kristallenme kinetiğini değiştirmesi ve seryumun katı çözelti veya tanecik formunda yapıya farklı tane oryantasyonu sağlaması olarak belirtilmiştir [68].



**Şekil 1.2.** (a) M1 ve (b) ME11 alaşımlarının üst resimdekiler hızlı ve alt resimdekiler yavaş olmak üzere farklı hızlarda ekstrüzyon sonrası mikroyapıları [68].

Literatürdeki yapılan bir diğer çalışmada, Mg-3Sn-2Ca alaşımının üzerine az miktarda seryum eklemenin mikro yapıya ve alaşımın sürünme özelliklerine olan etkileri tartışılmıştır. Belirtilen alaşıma 0.5% seryum ilavesi yapılmıştır. Seryum eklenmesinde

sonra yapılan XRD' ye göre bünyedeki iki ana faz olan CaMgSn ve Mg<sub>2</sub>Ca aynı şekilde kalmıştır ve bunlara ek olarak yeni bir fazın doğmadığı belirtilmiştir. Seryum eklenmesiyle CaMgSn fazında alansal olarak belirgin bir küçülme olduğu gözlemlenmiştir (545 µm<sup>2</sup> den 64 µm<sup>2</sup>' ye). Çalışmanın diğer bir amacı ise seryum katkısının sürünme davranışına etkisi olmuştur. İlave edilen seryum sayesinde sürünme değerinin arttığı belirtilmiştir. Sürünme testinin belirtilen uygulama koşulları 150 °C, 70MPa ve 100 saattir. Sayısal değer olarak bakıldığında ikincil sürünme oranı Seryum içermeyen alaşımın 3.28 x 10<sup>-8</sup> s<sup>-1</sup> olarak saptanmışken seryum katkılı olan alaşımın değeri 1,81 x 10<sup>-8</sup> s<sup>-1</sup> olarak belirtilmiştir [69].

S. Tardif ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ZA104 ve ZA104+0.3Ca alaşımlarına seryum ilavesinin etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada seryum konsantrasyonu aralığı kütlece %0.6-3.5 olarak belirtilmiştir. ZA104 magnezyum alaşımına seryum ilavesinin, mikroyapıda elementlerin çözünürlüklerini değiştirdiği ve alüminyumun ikincil fazlara seryum içermeyen alaşımdakine kıyasla daha çok geçtiği ve seryumca zengin fazlarda çinko elementine göre daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu görülmüştür. Seryum içeriği yüksek fazların sırasıyla Al<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>Ce<sub>2</sub>, Al<sub>6</sub>Zn<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub> fazları olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada mekanik özellikler ile ilgi sonuçlarda gösterilmiştir. Sertlik değerleri olarak (HV10) Al<sub>5</sub>Zn<sub>3</sub>Ce<sub>2</sub> için 289 ve Al<sub>6</sub>Zn<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub> fazı için ise 192 değeri bulunduğu belirtilmiştir. Değişen seryum miktarına göre çekme mukavemeti, akma mukavemeti, elastik modül ve yüzde uzama değerleri Tablo 1.3.'deki gibidir [70,71].

**Tablo 1.3.** Farklı seryum oranlarının ZA104 alaşımın fiziksel özelliklerine etkisi.

Magnezyum Alaşımı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)
AZ91D	184 (10)	89 (4)	45.4 (0.3)	4.2 (0.6)
ZA104	188 (11)	77 (3)	44.4 (0.4)	5.8 (0.7)
ZA104+0.6Ce	155 (7)	89 (1)	44.7 (0.7)	2.1 (0.4)
ZA104+1.4Ce	152 (10)	84 (2)	44.2 (0.3)	2.1 (0.6)
ZA104+2.0Ce	173 (5)	89 (2)	47.1 (0.6)	2.9 (0.6)
ZA104+3.3Ce	174 (9)	95 (2)	45.6 (0.4)	2.4 (0.3)
ZA104+3.5Ce	183 (13)	99 (9)	46.4 (0.5)	2.4 (0.3)
ZA104+0.3Ca	153 (3)	90 (2)	48.8 (0.4)	2.2 (0.3)
ZA104+0.3Ca+0.5Ce	146 (4)	89 (1)	46.9 (0.6)	1.6 (0.3)
ZA104+0.3Ca+1.2Ce	146 (7)	89 (3)	48.6 (0.5)	1.6 (0.3)
ZA104+0.3Ca+2.0Ce	137 (4)	87 (1)	45.8 (0.5)	1.2 (0.1)
ZA104+0.3Ca+2.6Ce	150 (2)	90 (1)	46.4 (0.4)	1.4 (0.0)
ZA104+0.3Ca+3.4Ce	176 (4)	96 (1)	41.9 (0.3)	2.4 (0.2)

Yapılan çalışmada %2 seryum içeren malzemede özelliklerdeki düşüşün sıcak yırtılma hassasiyetinden ötürü olduğu bildirilmiştir. Sürünme mukavemeti ZA104

alaşımında %0.6 seryum eklenmesiyle artmıştır. %0.6 dan fazla eklenen seryumun sürünme davranışına herhangi bir etkide bulunmadığı da saptanan sonuçlar içerisinde. % 0.3 kalsiyum içeren alaşıma bakıldığında sürünme mukavemetinin ancak %3.4 seryum ilavesinden sonra kademeli olarak arttığı belirtilmiştir [70].

Magnezyum alaşımlarında farklı oranlarda alüminyum ve seryum elementleri bulunduranların ekstrüzyon sonrası mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Malzemelerin ekstrüzyon kabiliyeti, genel olarak o malzemenin ekstrüzyon sırasında herhangi bir yüzey hatası oluşmaması ile belirlenir. Bu konudaki bir çalışmada, ekstrüzyon işlemi öncesinde 400°C' de homojenizasyona tabi tutulan saf magnezyum kütüklerle 10 ile 90 mm/s hızları arasında yapılan ekstrüzyonda yüzeyde pürüzlenmeler görülürken, ağırlıkça %0.2 eklenen seryum sayesinde ekstrüzyonda yüzey kalitesinin belirgin bir şekilde iyileştiği belirtilmiştir. Ancak ağırlıkça %0.2'den %0.5'e çıkıldığında yüzeyde oksidasyon problemi ortaya çıkmıştır. Seryum, alüminyum ile beraber kullanıldığında, örneğin kompozisyon olarak Mg-3Al-0.2Ce ve Mg-3Al-0.5Ce alaşımlarının en iyi ekstrüzyon performansını gösterdiği bildirilmiştir [72].

Seryumun magnezyuma tek başına ilavesi konusunda da çalışmalar mevcuttur. Literatürdeki veriye göre, Mg-0.5Ce alaşımı Mg-0.2Ce alaşımına göre daha yüksek düzeyde mukavemet gösterirken süneklik değerinde azalma eğilimi göstermiştir. Mg-3Al alaşımına %0.2 ve %0.5 oranlarındaki seryumun çekme mukavemetine herhangi bir katkısı belirtilmemiştir [72].

Hall-Petch denklemi göz önünde bulundurulduğunda, magnezyum alaşımlarında tane boyutu küçülmesinin çekme ve akma mukavemet değerlerini önemli derecelerde etkilediği bilinen bir gerçektir [73]. S. F. Liu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada seryum, kalsiyum ve stronsiyumun AZ91 magnezyum alaşımında tane boyutu üzerinde etkileri tartışılmıştır. Yapılan bu çalışmada belirtilen elementlerin yapıya etkileri, EDX analizleri ve su verilerek hızlı soğutulmuş numunelerin mikroyapısal incelemeleri ile gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda seryum katkısının magnezyum alaşımında tane boyutu ortalamasını 107 µm'dan 36 µm mertebelerine kadar düşürdüğü görülmüş olup, kalsiyum ve stronsiyum ilavesi ile tane boyutu küçülme etkisi daha iyi seviyelere taşınmıştır. Ayrıca aynı çalışmada seryuma ek olarak ilave edilen kalsiyum elementinin stronsiyum elementine göre tane küçültmeye etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir. Sırasıyla kalsiyum ve stronsiyum elementleri eklenmiş alaşımın ortalama tane boyutu değerleri 23 µm ve 30 µm'dir [74].

Haitao Zhou ve arkadaşlarının çalışmasında ise AZ61 alaşımına seryum elementi ekleyerek alaşımın mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir [75]. Tablo 1.4'te belirtildiği üzere seryum elementi ilaveleri sırasıyla 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında yapılmıştır.

**Tablo 1.4.** *Alaşım İçerisindeki Element Miktarları [75].*

Alaşım No	Ce	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Mg
I	0.0	5.546	1.008	0.33	0.012	0.004	0.0015	K
II	0.5	5.504	1.009	0.33	0.012	0.004	0.0015	a
III	1.0	5.582	0.9163	0.31	0.012	0.004	0.0015	l
IV	1.5	5.415	0.9604	0.32	0.012	0.004	0.0015	a
								n

Seryum içermeyen alaşımda yaygın olarak bilinen  $Mg_{17}Al_{12}$  fazı görülmüştür [76]. Fakat seryum elementi alaşıma eklendikten sonra  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalığının boyutlarında gözle görülür oranlarda küçülme meydana geldiği belirtilmiştir. XRD yönteminin sonuçlarına bakıldığında seryum içeren alaşımlarda üç tane faz gözlemlenmiştir. Bunlar  $\alpha$ -Mg matris,  $Mg_{17}Al_{12}$  ve yeni bir faz olan  $Al_4Ce_2$ 'dir. Buldukları  $Al_4Ce$  fazı sahip olduğu yüksek çözünme sıcaklığından dolayı magnezyum matris içerisinde çözünmemektedir ve böylece yüksek sıcaklıklarda bile alaşımın tane boyutu açısından stabil kalabildiği belirtilmiştir. Bunun yanında artan seryum miktarı ile  $Al_4Ce$  fazının boyutlarında irileşme gözlenmiştir. %1'den az miktarda seryum içeren alaşımlara ekstrüzyon prosesi uygulandığında tane boyutunun AZ61'e göre küçük yapıya olduğu, fakat %1'in üzerine çıkıldığında tane boyutunda tekrar büyüme gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, ekstrüzyon ile üretilmiş alaşımların mukavemet değerleri de incelenmiştir. %1'den az seryum içeren alaşımlarda mukavemet ve süneklikte artış gözlemlenirken mekanik özellikler açısından en uygun değer %1 seryum olduğu belirtilmiştir [75,77,78].

Lityum ilavesi magnezyum alaşımları için özel bir konudur. Yüksek oranda ilave edilen lityumun, magnezyumun kristal sistemini kübik hale dönüştürdüğü bilinmektedir. Bu gruptaki çalışmalarda da seryum ilavesinin göz önüne alındığı görülmektedir. Yapılan bir çalışmada Wu Li-bin ve arkadaşları Mg-Li-Al-Zn magnezyum alaşımına seryum ekleyerek mikroyapıdaki ve çekme mukavemetindeki değişimleri gözlemişlerdir. Belirtilen bu çalışmada alaşımlar, döküm yöntemiyle hazırlanıp 300°C'de



homojenizasyon tavlmasına ve 370°C'de çözeltiye alma işlemlerine tabi tutulmuştur. Kullanılan alaşımların içerikleri tablo 1.5.'deki gibidir.

**Tablo 1.5.** *Alaşım İçerisindeki Element Miktarları [79].*

Alaşım	Kütlece /%				
	Li	Al	Zn	Ce	Mg
Mg-5Li-3Al-2Zn	5.16	3.22	2.24	-	
Mg-5Li-3Al-2Zn-0.5Ce	5.00	3.01	2.26	0.56	K
Mg-5Li-3Al-2Zn-1.0Ce	5.00	3.00	2.14	0.90	a
Mg-5Li-3Al-2Zn-1.5Ce	4.61	3.26	2.02	1.41	l
Mg-5Li-3Al-2Zn-2.0Ce	5.02	3.61	2.23	1.89	a
Mg-5Li-3Al-2Zn-2.5Ce	4.78	3.40	2.03	2.31	n

Homojenizasyon işlemi uygulanmış LAZ532 'nin yapısına bakıldığı zaman  $\alpha$ -Mg ve AlLi fazları saptanmıştır. Artan seryum miktarı ile çubuk şeklinde ve eşeksenli morfolojiye sahip  $Al_2Ce/Al_3Ce$  fazları tane sınırlarında ve tane içlerinde olduğu belirtilmiştir. Isıl işlem sonrasında AlLi fazı magnezyum matrisi içinde çözünürken  $Al_2Ce/Al_3Ce$  fazlarının yüksek termal kararlılığından dolayı mevcudiyetini büyük ölçüde koruduğu belirtilmiştir. Bütün bunların yanında normalde seryum tane küçültme etkisi olmasına karşın, belirtilen bu kompozisyonlarda bu etkisinin olmadığı görülmüştür. Mekanik özellikler açısından bakıldığında artan seryum miktarı ile çekme mukavemeti ve uzama davranışında gelişme gözlemlenirken en iyi özelliklerin %1 seryum ilavesi ile ortaya çıktığı belirtilmiştir [79-81].

B. Langelier ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, magnezyum çinko alaşımlarının seryum ve kalsiyum katkısı ile elde edilen yeni yapının mikro yapısı, fiziksel özellikleri ve tekstür yapısı üzerinde durmuşlardır. Belirtilen alaşımlar, saf Mg ve Zn elementlerine Mg-Ce ve Mg-Ca master alaşımlarının eklenerek argon atmosferinde ergitme ve dökümü ile elde edilmiştir. Üretilen alaşımların kompozisyonu tablo 1.6'da verilmiştir.

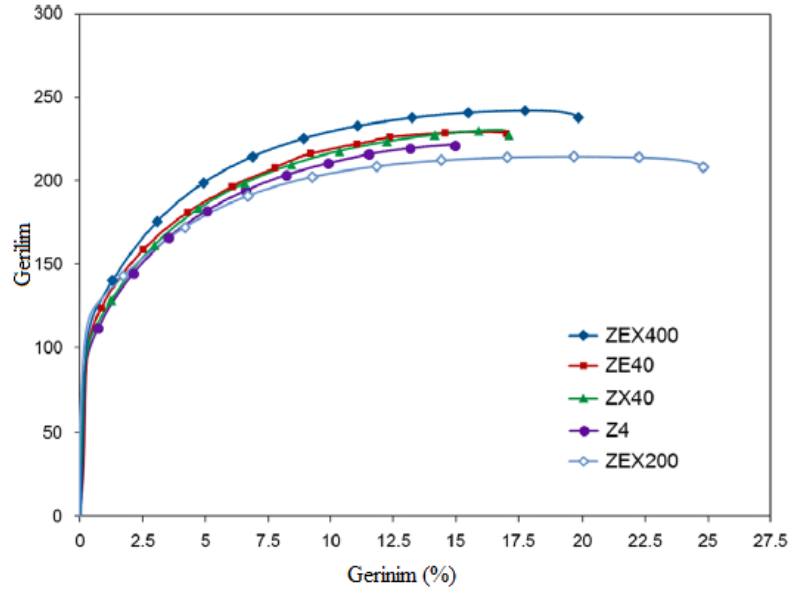
**Tablo 1.6.** Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının kompozisyonları [82].

Alaşım Adı	Zn wt% (at%)	Ce wt% (at%)	Ca wt% (at%)
ZEX400	4.0 (1.53)	0.10 (0.018)	0.3 (0.19)
ZEX200	2.0 (0.75)	0.10 (0.018)	0.3 (0.18)
ZX40	4.0 (1.53)	-	0.3 (0.19)
ZE40	4.0 (1.53)	0.10 (0.018)	-
Z4	4.0 (1.52)	-	-

Üretilen alaşımlar homojenizasyon sonrası haddelemeye tabi tutulmuş ve akabinde çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen değerler Şekil 1.3'de ve Tablo 1.7'de verilmiştir.

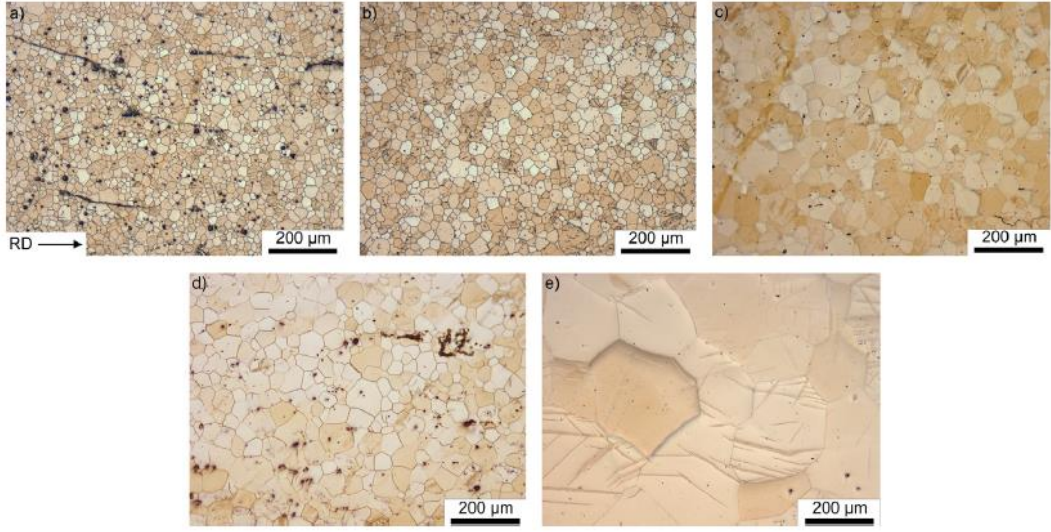
**Tablo 1.7.** Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının çekme testi sonuçları [82].

Alaşım	Akma noktası (MPa)	UTS (MPa)	Uzama (%)
ZEX400	119 ± 2.1	240 ± 1.5	18.3 ± 1.30
ZEX200	131 ± 12.3	222 ± 7.0	23.9 ± 0.27
ZX40	105 ± 1.5	231 ± 0.2	17.8 ± 1.17
ZE40	109 ± 2.6	234 ± 4.0	17.3 ± 0.94
Z4	100 ± 1.3	221 ± 0.5	14.5 ± 0.01



**Şekil 1.3.** Mg-Zn-Ce-Ca alaşımlarının çekme testi sonucunda gerilim-gerinim grafiği [82].

Adı geçen bu çalışmada elde edilen tane boyutlarındaki değişim Şekil 1.4'de ve Tablo 1.8'de gösterilmiştir.

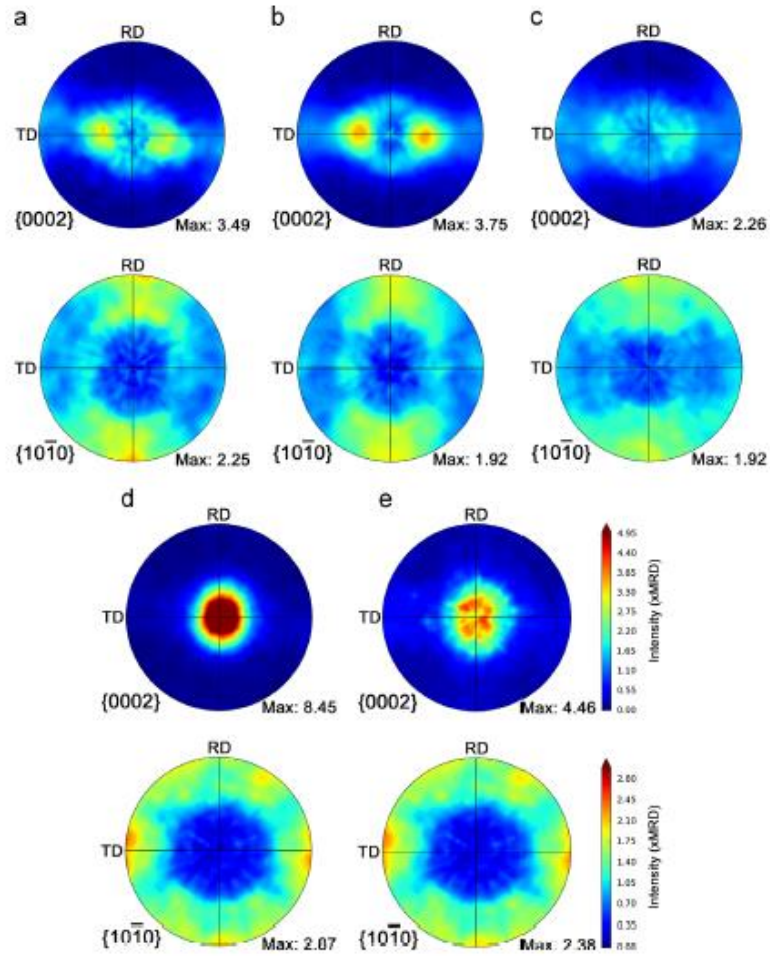


**Şekil 1.4.** Işık mikroskobu resimleri a)ZEX400 b)ZEX200 c)ZX40 d)ZE40 e)Z4. (a'daki ok bütün numuneler için haddelenme yönünü göstermektedir) [82].

**Tablo 1.8.** Belirtilen alaşımların tane çapları [82].

Alaşım	Tane çapı (mikrometre)
ZEX400	$34 \pm 3.6$
ZEX200	$32 \pm 8.8$
ZX40	$43 \pm 2.8$
ZE40	$44 \pm 2.6$
Z4	$238 \pm 29$

Aynı alaşımların yönlenme (tekstür) davranışlarının nötrön difraksiyonu ile incelendiği belirtilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.5.** Haddelenmiş ve tavllanmış numunelerin nötron difraksiyon tekniği ile elde edilen Basal {0002} ve prizmatik {10-10} yönlerindeki verileri. a)ZEX400 b)ZEX200 c)ZX40 d)ZE40 e)Z4 (RD: haddeleme yönü TD: çapraz yönü) [82].

Yapılan bu çalışmada belirtilen elementlerin kullanılmasıyla  $Mg_6Ca_2Zn_3$  ve  $MgZnCe$  (T-fazı) oluştuğu ortaya konulmuştur. Seryum ve kalsiyum elementlerinin bir arada kullanılmasıyla çekme mukavemeti değerlerinde artış sağlandığı, ve tekstür yapısında da Şekil 1.5’de görüldüğü gibi Ce ve Ca elementlerinin yönlenmeyi modifiye ettiği gözlemlenmiş fakat asıl etkinin kalsiyum elementinin yaptığı bildirilmiştir. Genel itibariyle seryum ve kalsiyum elementleri magnezyum alaşımlarında sünekliliği arttırdığı ve bu artışın sebebinin tekstür modifikasyonu ve tane küçülmesiyle ilgili olduğu yapılan bu çalışma ile gösterilmiştir [82].

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1.Kullanılan Malzemeler

Yapılan bu çalışmada seryum elementinin magnezyum alaşımlarının üzerine olan etkileri incelenmiştir. Bu incelemede kullanılacak master alaşımların temini Çin'deki bir firmadan yapılmıştır. Gelen master alaşımlar Tablo 2.1'deki gibidir.

**Tablo 2.1.** *Tedarik edilen alaşımların listesi.*

Alaşım içeriği
Mg-2Zn-2Ce
Mg-2Zn-2Y
Mg-2Sn-2Y
Mg-2Y-1Pb

### 2.2. Alaşımların Hazırlanması

İstenilen kompozisyonlar elde edilecek şekilde ve ergitme potası kapasitesi göz önüne alınarak ana alaşım blokları ve master alaşımlardan parçalar kesilip, ergitilmek üzere 21x21x5 cm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklindeki çelik potalara konuldu. Ergitme işlemi Şekil 2.1'de gösterilen Fransız SCFEB 10M 30/60 marka ve içerisine koruyucu gaz akışı sağlanabilen fırında gerçekleştirildi. İlk olarak fırın sıcaklığı 790 °C'ye ayarlandı ve bu sıcaklığa ulaşılması beklendi. Fırın belirtilen sıcaklığa ulaştığında şarjı yapılmış ergitme potası fırına yerleştirildi. Alaşımın ergimesi için pota 20 dakika bu sıcaklıkta bekletildikten sonra fırın kapatılarak soğumaya bırakıldı. Parçalar fırın içerisine konulduğu andan itibaren fırın atmosferine yüksek saflıktaki Ar gazı verildi. Ar gazı, fırın iç basıncı 1.4 Bar olacak şekilde sabitlendi. Ergitme sonrası fırının sıcaklığı 550 °C'ye düştüğünde fırın ortamına verilen Ar gazı kapatılıp fırın kapağı açılmıştır. Oluşan alaşım daha sonra fırın ortamından alınıp, oda sıcaklığında bekletildikten sonra numune kesim işlemleri yapılmıştır.

**Tablo 2.2.** Hedeflenen alaşımların bileşimi ve şarj için kullanılan malzemelerin kütlece içeriği.

Hedeflenen alaşım bileşimi	Şarj kompozisyonu
Mg-2Zn-2Ce	1508 g Mg-2Zn-2Ce
Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce	806 g Mg-2Zn-2Ce 702 g Mg-2Sn-2Y
Mg-2Zn-1Ce-1Y	1590 g Mg-2Zn-2Y 1586 g Mg-2Zn-2Ce
Mg-1Sn-1Zn-1Ce-1Y-1Pb	496 g Mg-2Sn-2Y 506 g Mg-2Ce-2Zn 514 g Mg-1Pb-2Y



**Şekil 2.1.** Ergitme fırını.

### 2.3. Numune Hazırlama

Fırında ergitme işleminin sonlanmasıyla oluşan alaşımlardan soğuk kalıp ebatlarına uyacak şekilde numuneler kesilmiştir. Her bir farklı kompozisyondaki kesilen parçalar için sırasıyla belirtilen numune hazırlama teknikleri uygulanmıştır. Kesilen numune soğuk kalıp kalıbına yerleştirildikten sonra ayrı bir kaptaki soğuk kalıp karışımı hazırlanmıştır. Hazırlama işleminde ilk olarak 20 ml polimer, behere konulmuştur. Daha

sonra üzerine 1 ml sertleştirici konulup 1 dakika süre ile iyice karıştırılmıştır. Karışımın üzerine 1 ml hızlandırıcı ilave edilerek tekrar 1 dakika süre ile karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Elde edilen bu karışım kalıp içerisindeki numunenin üzerine dökülüp katılaşması için yaklaşık 30 dakika süre verilmiştir. Bu süre sonunda numuneler kalıptan çıkarılmış ve yüzey parlatma işlemi aşamalarına geçilmiştir.

Soğuk kalıba alınan numuneler için ilk olarak kaba zımparalama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde; 1000, 2000 ve 2400 sınıfı zımparalar kullanılmıştır. Numuneler her bir kademede yaklaşık 20 saniye tutulmuş ve etil alkol ile temizlenip korozyon oluşması engellenmiştir. Zımpara işlemi bittikten sonra numuneler parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi için Struers Tegra Pol-25 markalı parlatma cihazı kullanılmıştır. Belirtilen bu işlem de sırasıyla 3 dakika DAC, 5 dakika NAP ve son aşamada 2 dakika kolloidal silika ile yapılmıştır.

Yüzeyleri parlatılan numuneler tane sınırlarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için hazırlanan solüsyonun içeriği Tablo 2.3’de verilmiştir. Belirtilen bu içerikler tabloda verilen kütle miktarlarında bir behere konularak ve homojenizasyonunu sağlamak için karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu solüsyon numune yüzeyine daldırma metoduyla uygulanmıştır. Numuneler bu solüsyona 3 saniye daldırılarak dağlanmıştır.

**Tablo 2.3.** Dağlama solüsyonu içeriği ve miktarları.

<b>Kullanılan Bileşim</b>	<b>Miktar</b>
Pikrik asit	6 g
Asetik asit	5 ml
Etanol	150 ml
Saf su	11 ml

#### **2.4. Numunelerin İncelenmesi**

Parlatma işlemi gerçekleştirilen numuneler, Phenom marka masaüstü SEM cihazında ön incelemeye tabi tutulmuş ve EDS yöntemiyle analizleri yapılmıştır.

İçeriği kontrol edilen ve uygun bulunan dağlanmış numuneler NİKON Eclipse MA100 ışık mikroskobu ve Supra 50VP elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapısal incelemeleri yapılmıştır.

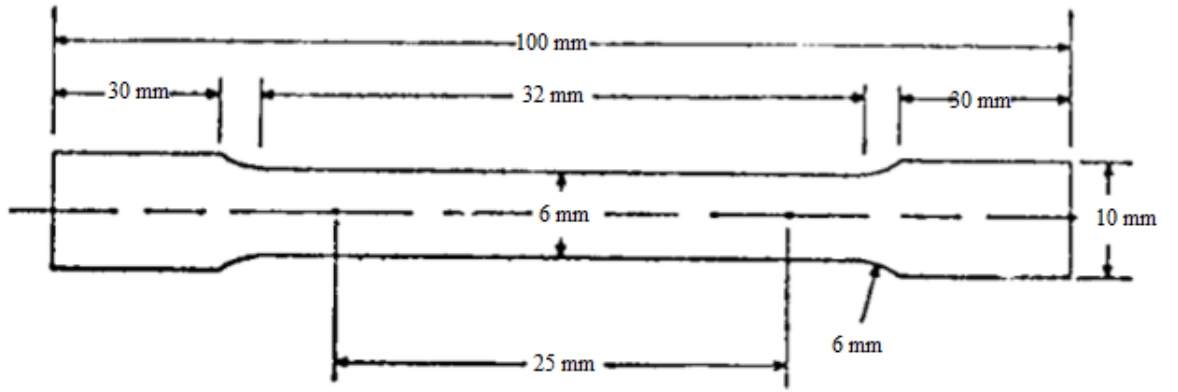
## 2.5.Fiziksel Özelliklerin Tespiti

### 2.5.1.Sertlik testi

Işık mikroskobu ile incelenmesi tamamlanan numunelerin EMCO Test M1C010 sertlik ölçme cihazı ile sertlikleri ölçülmüştür. Ölçümlerde Brinell ve Vickers ölçüm yöntemleri kullanılmıştır.

### 2.5.2. Çekme testi

Çekme mukavemeti testleri için numunelerin boyutu ASTM E8 standartında belirtilen ölçülerden (Şekil 2.2) küçültülmüş çekme numunesi boyutları baz alınarak hazırlanmıştır. Numune kesilme işlemi EDM (Electric Discharge Machining) ile yapılmıştır.



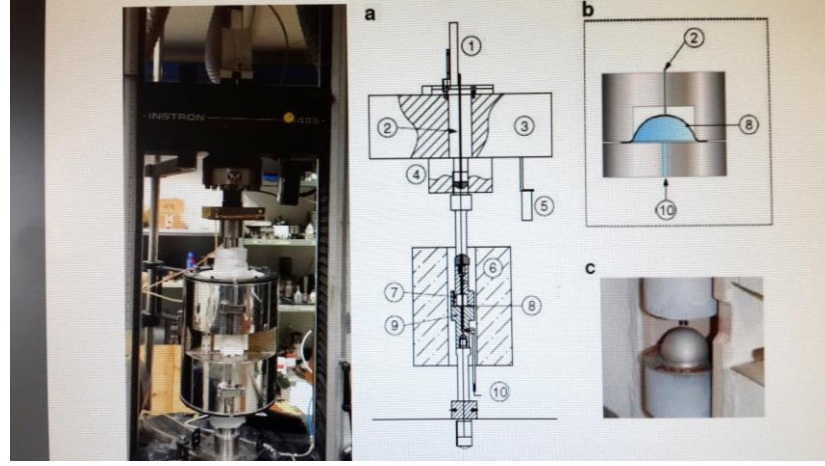
Şekil 2.2. Hazırlanan çekme numunesi boyutları.

Çekme numuneleri belirtilen ölçülerde hazırlandıktan sonra INSTRON marka cihaz ve ARAMİS sistemi kullanılarak İtalya, Bari Politenico Department of Materials'da gerçekleştirilmiştir. ARAMİS sistemi, yüzeyi özel bir boya ile boyanan numune üzerinde dikey ve yatay olarak istenilen ölçüde boyutlandırılan bir grid üzerinde her bir pikseli optik olarak okuyarak lokal deformasyon değerlerini hesaplayabilen bir sistemdir.

### 2.5.3.Serbest şişme (free inflation) testleri – blow forming

Şekil 2.3'de görülen ekipman (INSTRON 4485) kullanılarak “free inflation” (serbest şişme) testleri yapılmıştır.





**Şekil 2.3.** (a) Sistemin şematik gösterimi. (1) Kubbe yüksekliği için pozisyon transducer'i, (2) pozisyon transducer'I için çelik çubuk, (3) test cihazı kafaları, (4) load cell, (5) elektrik fanı, (6) silindirik fırın, (7) kalıp, (8) numune plakası, (9) gaz şişirmeli numune tutucusu, (10) gaz girişi; (b) şekillendirme odası çizimi, (c) test sonrası numune görünümü.

Test 45mm çapında ve giriş çapı 3mm olan bir hazne içinde gerçekleştirilmiştir. Silindirik dökümlerden ilk etapta EDM ile keserek ve daha sonra su jeti ile son boyutlandırma yaparak 80mm çapında ve 2mm nominal kalınlıkta her alaşım için 16 numune hazırlanmıştır. Kalıba yapışmayı önlemek için bor nitrür kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Mikroyapı Analizi

Hazırlanan alaşımların tümü döküm sonucu ve uzun süreli homojenizasyon tavi nedeniyle kaba taneli ve dentritik yapıya sahiptir. Katılma sonrası soğuma ve homojenizasyon tavi süresince malzemelerin yüksek sıcaklıkta geçirdikleri süre yaklaşık 5-6 saattir. Bu durum göz önüne alındığında, esasen döküm tane boyutlarının olağan dışı kabalaşma gösterdikleri söylenemez. Döküm sonucu elde edilen tane boyutları Tablo 3.1’de verilmiştir. Tane boyutları büyük olduğundan standart ASTM metodları kullanılmamıştır. Bunun yerine 20 tanenin boyutları ışık mikroskop görüntüleri üzerinden ölçülerek ortalama alınmıştır. En kaba tane boyutu Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce ve Mg-1Y-2Zn-1Ce alaşımlarında gözlenmiştir. Görüldüğü üzere Mg-2Zn-2Ce ve Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Ce-1Pb alaşımlarında döküm yapısı tane boyutları 200 µ civarındadır. Tane boyutu nispeten küçük bu alaşımlarda, tane sınırlarındaki intermetaliklerin nispeten yüksek sıcaklıklarda oluşmaları sonucu, dökümden sonra yapılan ve homojenizasyon işlemi olarak da iş gören yavaş soğuma esnasında tane büyümesini etkin bir şekilde geciktirdikleri düşünülmüştür.

**Tablo 3.1.** Döküm sonrası nominal alaşım bileşimleri ve tane boyutları.

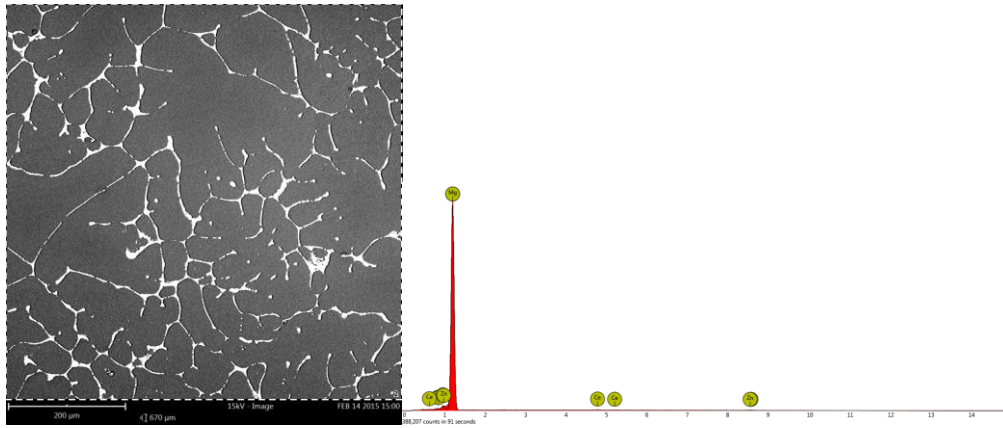
<b>Alaşım Nominal Bileşimleri</b>	<b>Tane Boyutu (µm)</b>
Mg-2Zn-2Ce	~200
Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce	~300
Mg-1Y-2Zn-1Ce	~300
Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Ce-1Pb	~200

Ancak maalesef bu alaşım sistemlerinin tespit edilmiş hazır faz diyagramları yoktur. Hatta bu sistemlerde oluşan intermetaliklerin X-ışınları ile tespiti de yine düzlemler arası mesafeleri bilinen fazlar olmadığından son derece zor kristallografik çalışmalar gerektirir. Bu tez dahilinde bu tür fazların ne olduğunun tespiti hem tezin amacı bu olmadığı için hem de süre ve cihaz imkanları nedeniyle mümkün olmadığından, çalışma bu yöne taşınmamıştır. Tezin amacı hazırlanmış olan seryumlu alaşımların mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonlarını yapmak ve bunların olası kullanımının olup olmayacağını tartışmaktır. Alaşım bileşimleri bu amaçla literatürdeki bilinenler de göz alınarak hazırlanmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasında, pragmatik bir yaklaşımla, gözlemlenen özellikleri istenilen düzeyde ve örneğin standart alaşım olan AZ31'e kıyasla, gecikmeli tane büyümesi gösteren, mekanik özellikleri yüksek, deformasyon sonrası tekstür göstermeyen veya zayıf tekstürlü olan alaşımlar üzerine konsantre olunmuştur. Tez çalışmaları kapsamında, mekanik özellikler ve ışık mikroskobu ile mikroyapısal gözlemlerle alaşımlar hakkında fikir sahibi olunmuştur. Mikroyapı olarak çökelti partiküllerinin dağılımı, boyutları, sertlik ölçümleri ve/veya çekme testi sonuçları bu tür bir ön değerlendirme/eleme için son derece yeterli ve önemli kriterler teşkil ederler.

### 3.1.1. Mg-2Zn-2Ce Alaşımı

Bu alaşımın nominal bileşimini gösteren genel analizi Şekil 3.1'de görülmektedir. Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi sonucu ise Tablo 3.2'de verilmiştir. Döküm mikroyapısı ise Şekil 3.3'de verilmiştir. Malzemenin henüz deformasyon görmemiş olmasına rağmen, döküm sonrası çok yavaş katılaşma ve soğuma uygulandığı için mikroyapıda tav ikizleri görülmektedir. Neredeyse tüm tane sınırlarının intermetalik bir faz içerdiği tespit edilmiştir. Bu faz, literatürde de rapor edildiği üzere  $Mg_2Ce$  fazıdır.

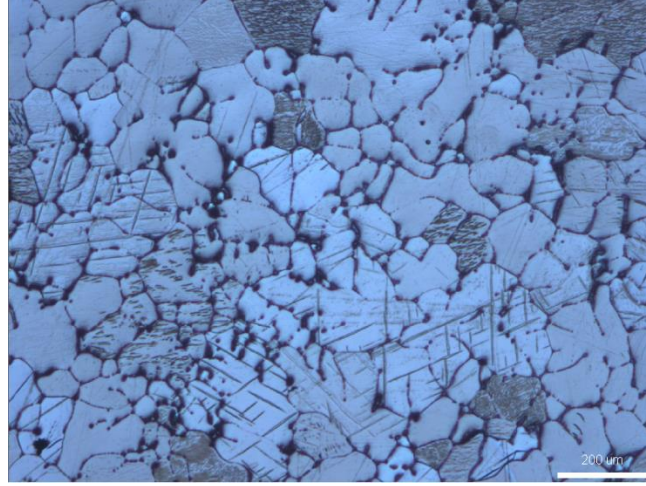


Element	% Kütle
Mg	96.7
Ce	1.6
Zn	1.7

Şekil 3.1. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.

**Tablo 3.2.** Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi.

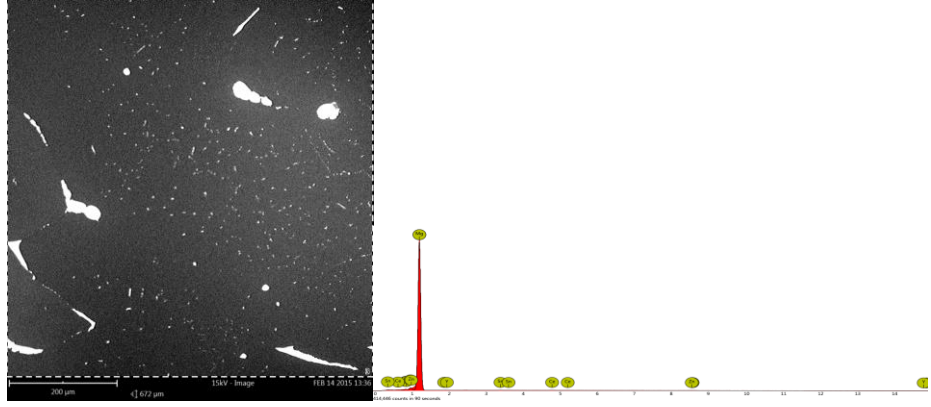
Element Number	Element Symbol	Element Name	Confidence	Concentration	Error
12	Mg	Magnesium	100.0	75.7	0.4
58	Ce	Cerium	100.0	16.6	1.7
30	Zn	Zinc	Manual	7.7	4.3



**Şekil 3.2.** Mg-2Zn-2Ce alaşımının döküm mikroyapısı. Çok sayıda tav ikizi bulunduğu görülmektedir.

### 3.1.2. Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce Alaşımı

Bu alaşımın nominal bileşimini gösteren genel analizi Şekil 3.3’de görülmektedir. Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi sonucu Tablo 3.3’de verilmiştir. Döküm mikroyapısı ise Şekil 3.4’de verilmiştir. Mikroyapıda çok fazla oksit inklüzyonlar vardır. Tav ikizleri ise çok daha az sayıdadır. Tane sınırlarının içerdiği intermetalik faz da diğer alaşımlara nazaran daha kesintili ve azdır. Bu fazın stokiyometrisi veya kristal sistemi tayin edilememiştir.

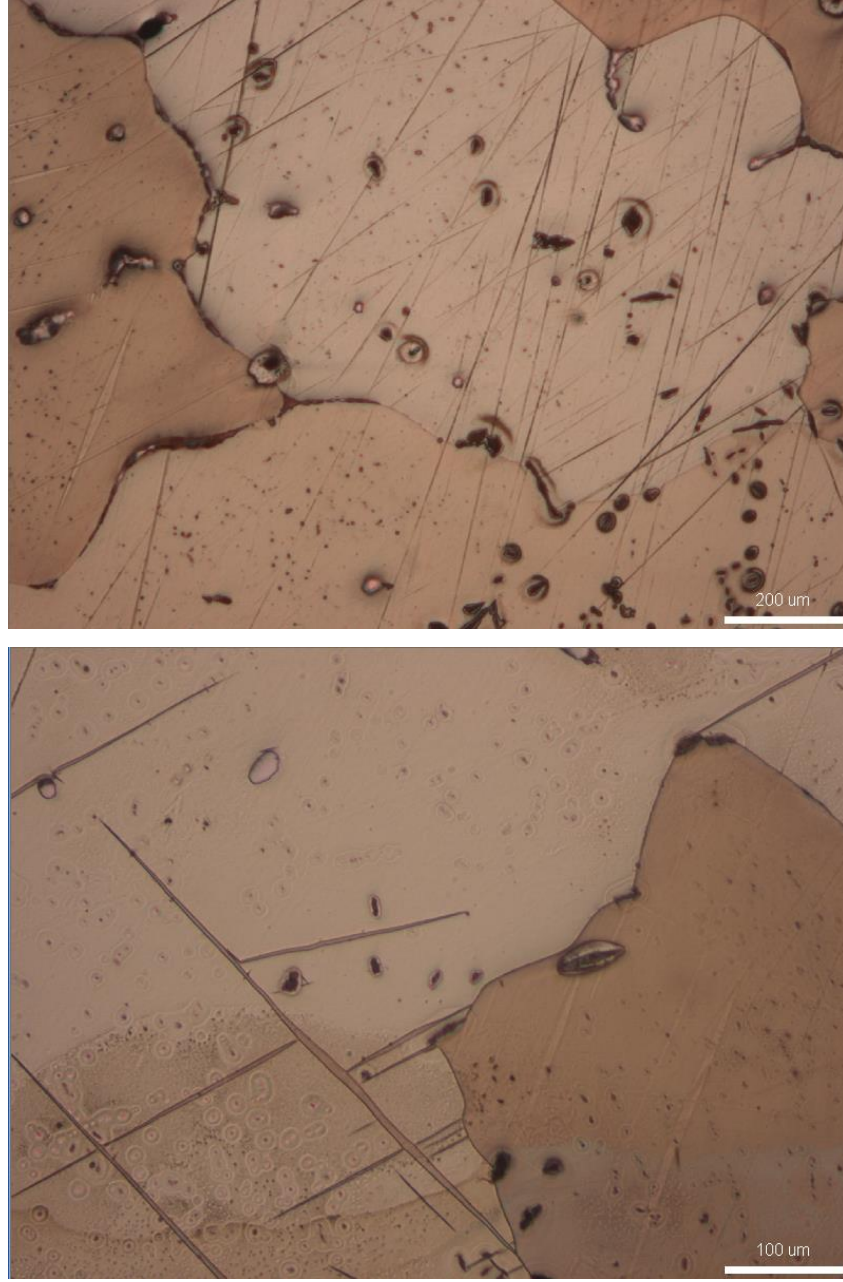


Element	% Kütle
Mg	96.7
Ce	1.6
Zn	1.7
Sn	0.6
Y	0.5

Şekil 3.3. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.

Tablo 3.3. Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analizi.

Element Number	Element Symbol	Element Name	Confidence	Concentration	Error
12	Mg	Magnesium	100.0	75.0	0.4
58	Ce	Cerium	100.0	16.9	1.7
30	Zn	Zinc	Manual	8.0	4.0

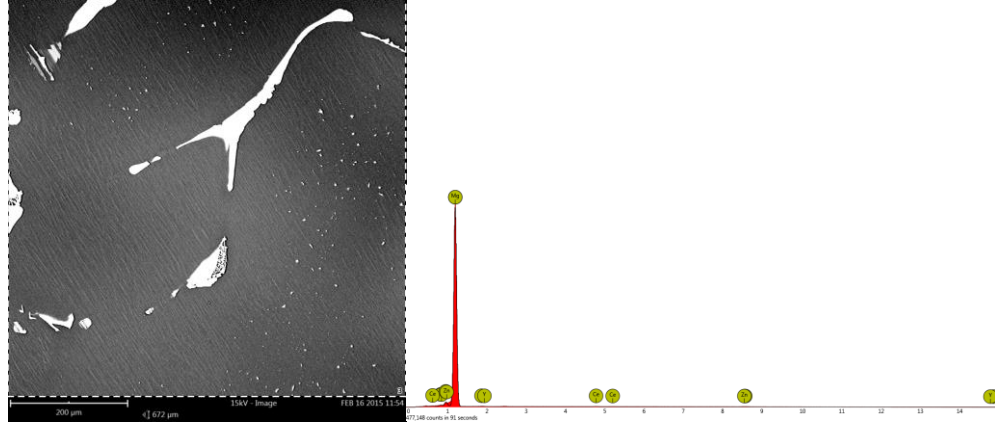


Şekil 3.4. Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce alaşımının döküm mikroyapısı.

### 3.1.3. Mg-1Y-2Zn-1Ce Alaşımı

Bu alaşımın nominal bileşimini gösteren genel analizi Şekil. 3.5’de görülmektedir. Döküm mikroyapısı ise Şekil 3.6’de verilmiştir. Mikroyapıda Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce alaşımına nispeten daha az oksit inklüzyonlar vardır ve tav ikizleri görsel olarak aynı düzeydedir. Tane sınırlarının içerdiği intermetalik faz da Mg-2Zn-2Ce alaşımına kıyasla daha az ancak Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce alaşımındaki kadar sürekli ve fazladır nazaran daha kesintili ve azdır. Bu fazın nominal bileşimi Tablo 3.4’de verilmiştir ancak

stokiyometrisi veya kristal sistemi de tayin edilememiştir. Tane içlerinde görülen çok sayıda çizgisel unsurun TEM ile tayin edilmesi gerekmektedir.



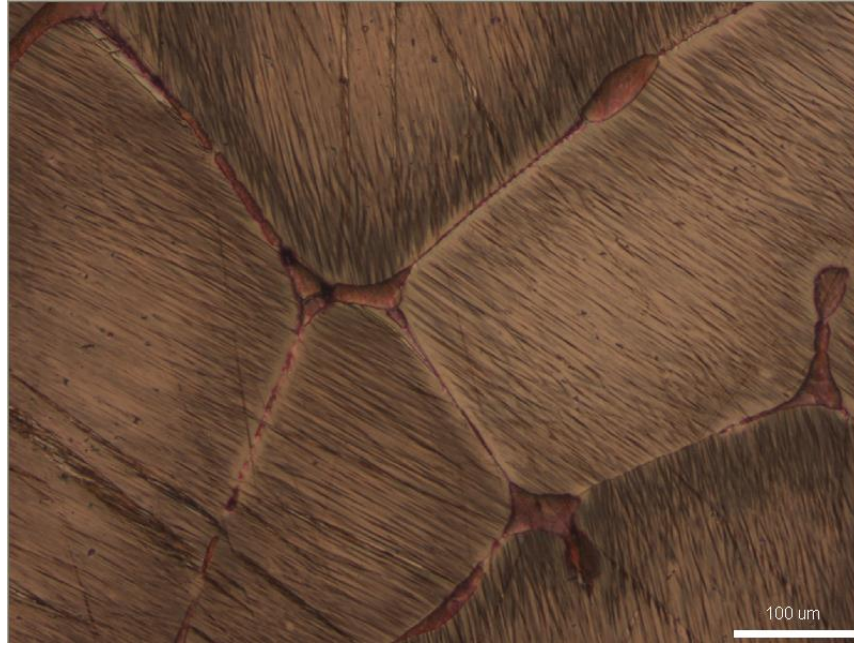
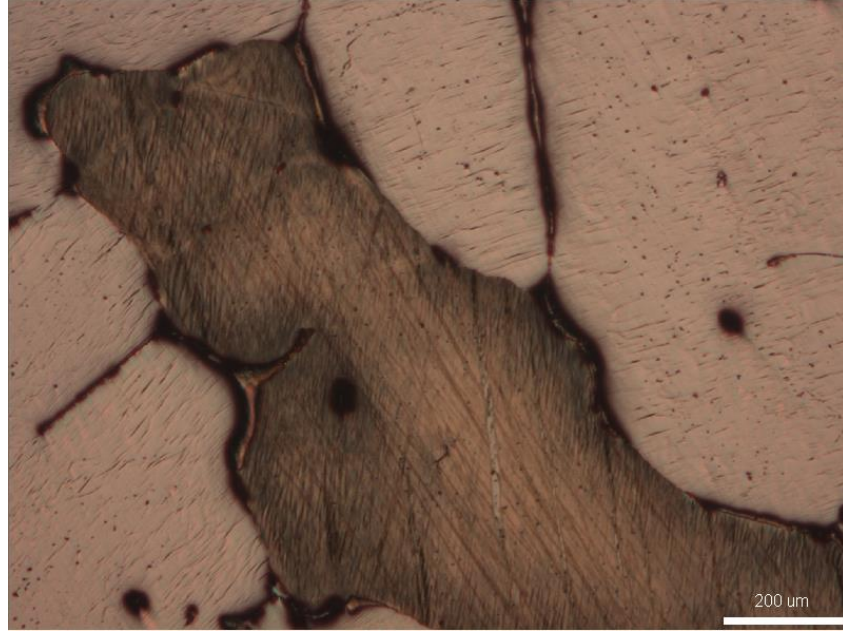
Element	% Kütle
Mg	96.5
Ce	1.1
Zn	1.7
Y	0.7

Şekil 3.5. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi

Tablo 3.4. Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazın nominal bileşimini gösteren EDS analiz.

Element Number	Element Symbol	Element Name	Confidence	Concentration	Error
12	Mg	Magnesium	100.0	74.2	0.4
58	Ce	Cerium	100.0	15.7	1.8
30	Zn	Zinc	100.0	10.0	3.6



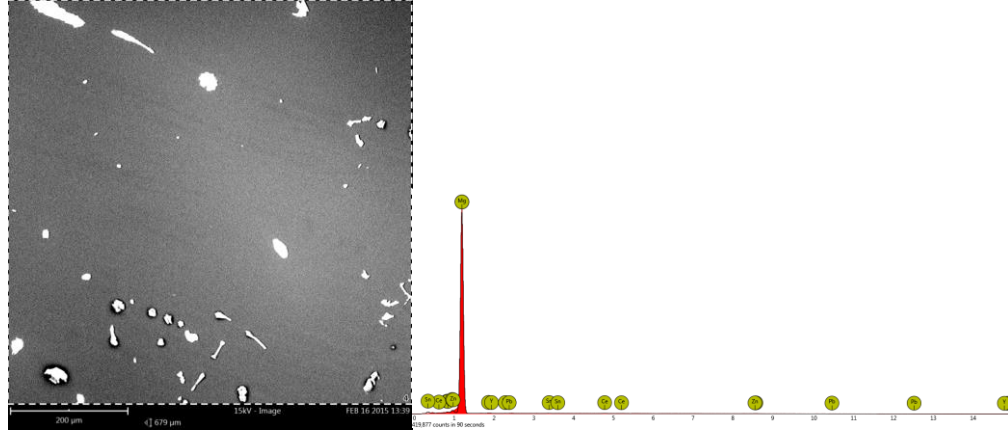


**Şekil 3.6.** Alaşımın döküm mikroyapısı ve tane sınırlarında yer alan intermetalik fazing boyut ve dağılımını gösteren ışık mikroskobu resimleri.

#### **3.1.4. Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Pb-1Ce Alaşımı**

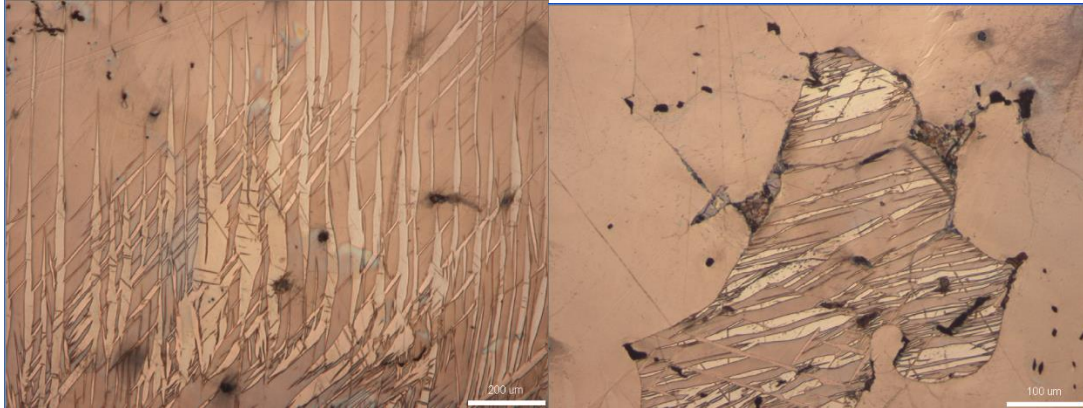
Bu alaşımın nominal bileşimini gösteren genel analizi Şekil 3.7’de görülmektedir. Döküm mikroyapısı ise Şekil 3.8’ de verilmiştir. Mikroyapıda diğer alaşımlara kıyasla daha fazla döküm porozitesi mevcuttur ancak az oksit inklüzyonların sayısı yüksek değildir. Tav ikizleri ise belirgin oranda daha yüksek sayıdadır. Tane sınırlarının içerdiği intermetalik faz diğer tüm alaşımdakinden daha azdır.





Element	% Kütle
Mg	96.5
Ce	0.8
Zn	0.9
Y	0.8
Sn	0.6
Pb	0.5

Şekil 3.7. Alaşımın nominal kompozisyonunu gösteren EDS analizi.



Şekil 3.8. Tane sınırlarında görülen döküm porozitesi, az saydaki intermetalik ve sıklıkla görülen tav izlerini gösteren mikro yapı fotoğrafları.

### 3.2. Mekanik Testlerle Karakterizasyon

Mekanik ölçüm değerlerinin konvansiyonel magnezyum alaşımları ile kıyaslanabilmesi için literatürden alınan değerler Tablo 3.5’de topluca gösterilmiştir. Tablo 3.6’da sertlik değerleri Hv ve Brinell cinsinden verilmiştir. Malzemelerin iri taneli döküm yapıları ve yüksek oksit inklüzyon içerikleri nedeniyle Brinell sertlik değerleri alaşımların genel sertlik değerini bu çalışmada daha iyi yansıtan bir skaladır.

Çekme testleri Aramis sistemine sahip özel bir çekme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede çekme numunesi boyu ve eni boyunca çok sayıda noktada

lokal olarak deformasyonun oranı tespit edilebilmektedir. Tablo 3.7’de de yüksek sıcaklık çekme testi sonuçları görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta yapılan çekme testleri için kullanılan düzenek Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

**Tablo 3.5.** Konvansiyonel magnezyum alaşımları için literatürden alınan mekanik ölçüm değerleri.

Typical room temperature mechanical properties								
Property	Unit	AZ91	AM60	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
Ultimate Tensile Strength	MPa	240 (250)	225 (240)	210 (230)	190 (210)	215 (240)	175 (220)	230 (230)
Tensile Yield Strength (0.2% offset)	MPa	160 (160)	130 (130)	125 (125)	90 (90)	140 (140)	110 (120)	145 (145)
Compressive Yield Strength	MPa	160 (148)	130	125 (113)	90 (74)	140	110 (106)	145 (103)
Fracture Elongation	%	3 (7)	8 (13)	10 (15)	12 (20)	6 (15)	9 (13)	10 (11)
Elastic Modulus, tension	GPa	45	45	45	45	45	45	45
Elastic Modulus, shear	GPa	17	17	17	17	17	17	17
Brinell Hardness		70	65	60	45	60	55	60
Impact Strength (Charpy un-notched test bars)	J	6 (9)	17 (18)	18 (18)	18 (18)	4 (16)	5 (12)	5 (12)

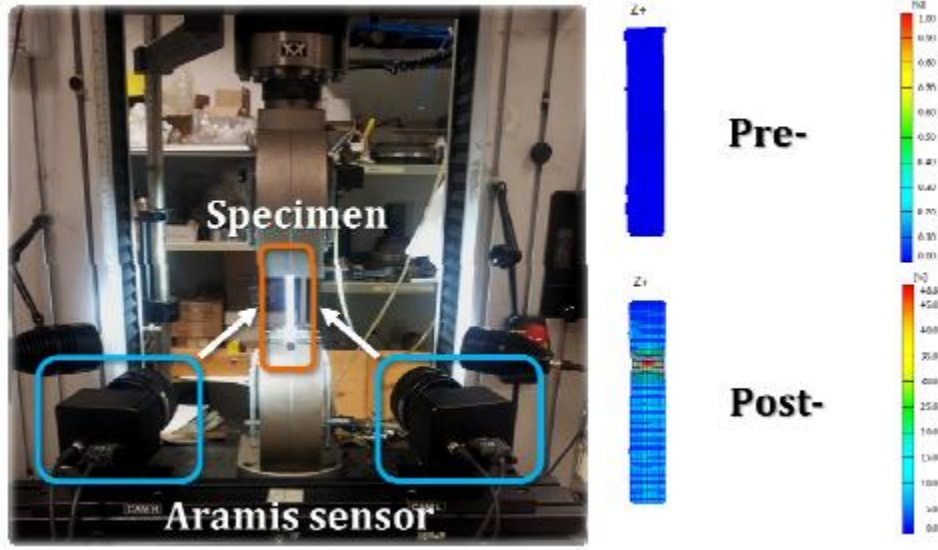
Mean values obtained from test bars cast on a 400 t cold chamber machine using a six-cavity die are shown in brackets.

**Tablo 3.6.** Alaşımların HB ve Hv sertlik değerleri

Alaşımlar	HB 1/5 ; 3 sn	HV(500g-10s)
Mg-2Zn-2Ce	45.2	65
Mg-1Y-2Zn-1Ce	37.2	54.84
Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce	32.7	67.3
Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Pb-1Ce	34.5	41.84

**Tablo 3.7.** Alaşımların çekme testleri sonuçları.

Numune	E (GPa)	Akma Muk. 0.2% (MPa)	UTS (MPa)
Mg-2Zn-2Ce	27.96	51.10	109.4
Mg-1Y-1Zn-1Ce	47.16	28.3	49.13
Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce	Geçersiz test	Geçersiz test	Geçersiz test
Mg-1Sn-1Y-1Zn-1Pb-1Ce	68.87	31.4	59.57



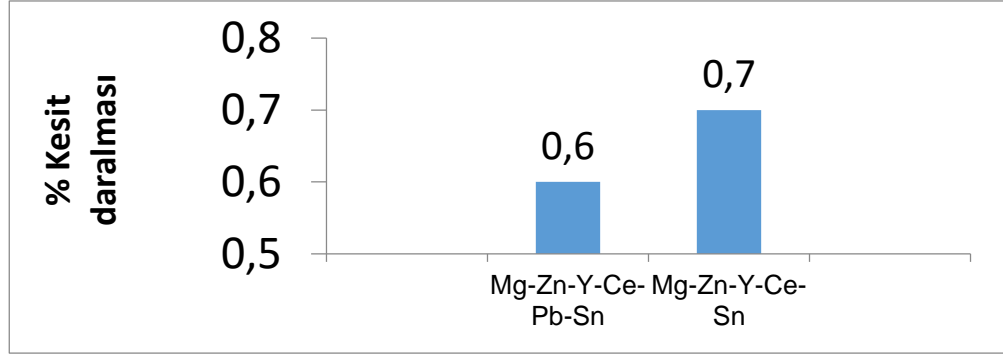
Şekil 3.9. Aramis sensörlü DIC sistemine sahip çekme testi düzeneği (Poliba, Italy).

Çekme testleri sonucunda beklenmedik ölçüde düşük Elastisite modülü gösteren alaşım üzerinde RFDA (Resonance Frequency Damping Analysis) yöntemi ile yeniden ölçümler yapılmıştır. Buna göre elde edilen değer Tablo. 3.8’de verilmiştir. Young Modulus (elastisite modülü) olarak görülen sonuç magnezyumun genel değeri olan 45GPa ile kıyaslandığında beklenen normal sonuçtur.

Tablo 3.8. RFDA sistemi ile ölçülen elastisite modülü ve ses sönümlene değerleri.

Alaşım Bileşimi	Elastik Modül (GPa)	Frekans (Hz)	Kayıp Oranı (1/s)	Damping
Mg-2Zn-2Ce	44.7	6921.190	13.30	0.000612

Seçilen iki alaşıma 400°C’de sıcak haddeleme uygulanmıştır ve alaşımların sıcak haddelemede gösterdikleri kesit daralması oranları aşağıda Şekil 3.10’da verilmiştir.



**Şekil 3.10.** 400 °C'de sıcak haddeleme uygulanmış farklı iki alaşımın sıcak haddelemede gösterdikleri kesit daralması oranları.

Seryum içeren numunelerimiz içerisinde oksit inklüzyon içeriği açısından uygun bulunan Mg-2Zn-2Ce alaşımı üzerinde yüksek sıcaklıklarda (400°C ve 450°C) serbest Şişme testleri de yapılmıştır. Test koŐullarını, numunenin davranıŐını ve kubbe yüksekliliği deđiŐimlerini gösteren sonuçlar 400°C için Şekil. 3.11'de ve Şekil 3.12'de, ve 450°C için Şekil 3.13'de ve Şekil 3.14'de verilmiştir.

#### 1<sup>st</sup> Specimen (6.1)

Test was stopped at 11s because there were cracks on the specimen as can be seen from the image as marked in red. Two of them are on the undeformed part and one is on the entry radius.



T=673±5K

P=16 bar

Load=15 kN

t=1.884mm

h<sub>d</sub>=2.010mm

Time:11s

**Şekil 3.11.** 400 °C'de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest Şişme numunesi.

Yukarıdaki Şekilde görüldüğü üzere ilk numunede kırmızı dairelerle iŐaretlenen yırtılmalar gözlenmiştir.

### 2<sup>nd</sup> Specimen for Replication (6.2)

For this specimen the blank holder load was increased to 25kN. The test was stopped at 2450s before rupture because there was gas leakage.



T=673±5K

P=16 bar

Load=25 kN

t=2.016mm

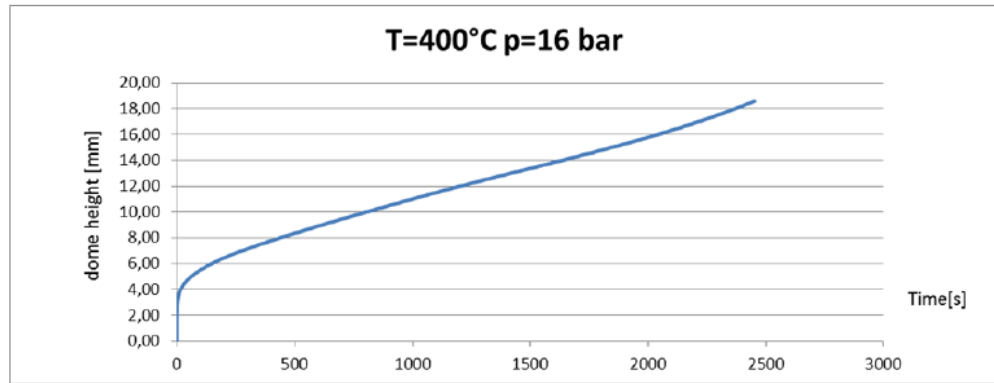
h<sub>d</sub> = 19mm

Time:2450s

Şekil 3.12. 400 °C'de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numunesi.

İkinci numunede yukarıda gösterilen şekilde görülen yarı-küre formu verilmiştir. Test esnasında numune tutma kuvveti 25kN'a yükseltilmiş ancak gaz kaçağı olması nedeniyle test 2540 saniyede durdurulmuştur. Numune yüzeyinde 'portakallanma' tabir edilen bir görünüm oluşmuştur. Alüminyumda bu yüzey durumu için önemli miktarda literatür mevcuttur ve tane irileşmesi nedeniyle olduğu bilinmektedir. Numunelerimiz döküm yapısında olduğu için bu durumun ortaya çıkması normaldir.

Bu alaşım için T= 673+/-5K ve P=16 Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi Şekil. 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile T= 673+/-5K ve P=16 Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi.

1<sup>st</sup> Specimen (6.6) (Invalid)



T=723±5K

P=16 bar

t=2.013mm

h<sub>d</sub> =20mm

Time:200s

2<sup>nd</sup> Specimen for Replication (6.5) (Invalid)



T=723±5K

P=16 bar

t=2.000mm

h<sub>d</sub> =19mm

Time: 200s

Şekil 3.14. 450 °C'de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numuneleri (ilk testler).

Yukarıda verilen görüntülerden anlaşılacağı üzere bu alaşım ile yapılan ilk testler numunedeki oksitlenme ve/veya oksit inklüzyonlar, veya porozite nedeniyle aslında maksimum deformasyonun yaşandığı kubbe tepesinde değil de farklı noktalarda görülmüştür. Bu nedenle bu testler tekrar edilmiş ve sonuçları aşağıda verilmiştir.



**3<sup>rd</sup> Specimen instead of 1<sup>st</sup> test for Alloy 6(6.10)**



T=723±5K  
p=16 bar  
Load= 20kN  
t= 2.018mm  
h<sub>d</sub>=24,00mm  
Time: 300s

**4<sup>th</sup> Specimen instead of 2<sup>nd</sup> test for Alloy 6(6.11)**

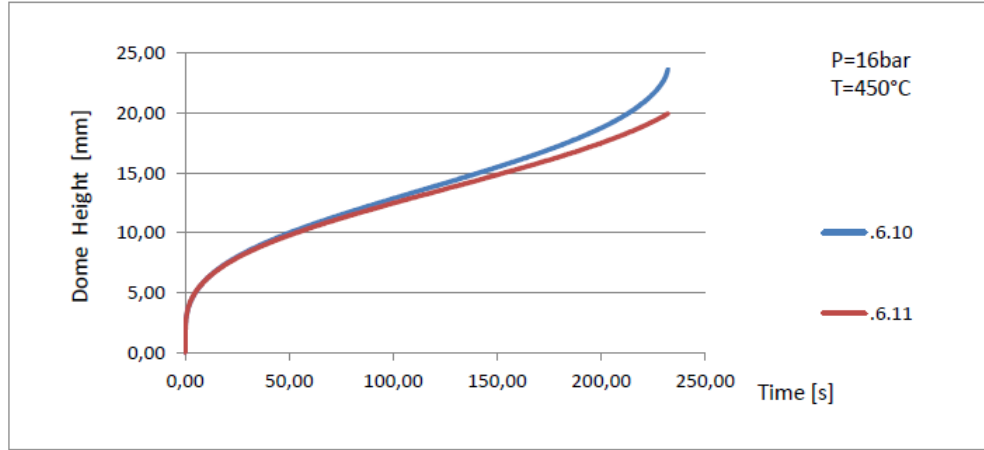


T=723±5K  
p=16 bar  
load= 20kN  
t= 2.022mm  
h<sub>d</sub> =20.4mm  
Time: 290s

**Şekil 3.15.** 450 °C'de Mg-2Zn-2Ce alaşımı serbest şişme numuneleri (ikinci testler).

Yukarıda verilen Şekil 3.15'de görüleceği üzere bu numune ikinci denemede daha başarılıdır. Ancak yine döküm yapısındaki porozite nedeniyle beklenmeyen bir noktadan delinme gözlenmiştir (sarı ve kırmızı renkli daireler).

Verilen ikinci test koşullarında bu alaşımdaki kubbe yüksekliğinin test süresince değişimi Şekil 3.16' da grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.16. Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile iki ayrı numunede  $T= 723\pm 5K$  ve  $P=16$  Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi.

İki numune arasındaki küçük farklılık test esnasında sıcaklık değişimlerindeki farklılığa bağlanmıştır. Bu alaşım önceki denemelerde başarılı görüldüğü için farklı koşullarda ilave testlere gidilmiştir. Bu ilave testlerin sonuçları Şekil 3.17’den itibaren aşağıda verilmiştir. Buradaki amaç endüstriyel çalışma koşullarında kullanılabilen parametreler zarfının ne denli geniş olabileceği konusunda fikir edinmektir.

1<sup>st</sup> Specimen (6.8) under the conditions  $T=723\pm 5K$ ,  $P=11$  bar



2<sup>nd</sup> Specimen (6.9) for replication under the conditions  $T=723\pm 5K$ ,  $P=11$  bar



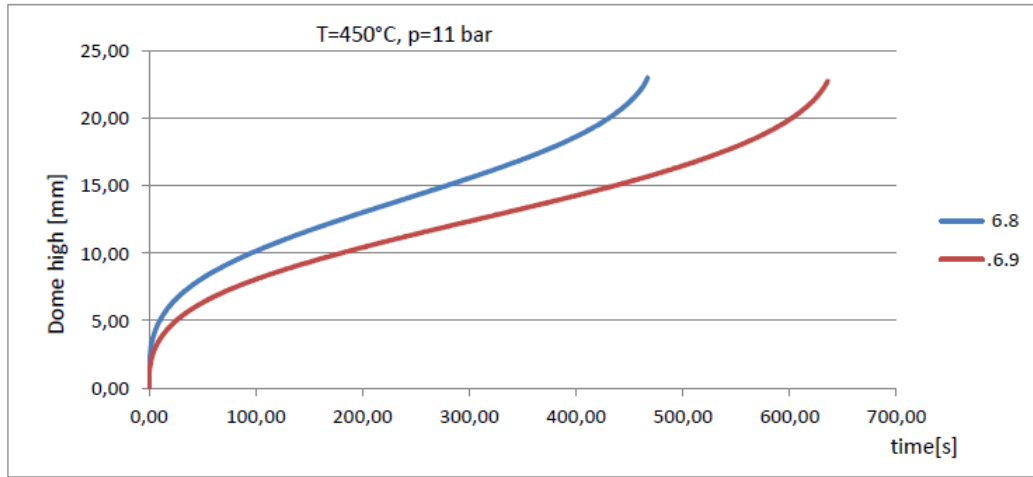
Şekil 3.17. Mg-2Zn-2Ce alaşımı üzerinde farklı koşullarda ilaveten yapılan serbest şişme testleri sonuçları. (a) İlk ilave test; (b) ikinci ilave test.

Yeni test koşullarındaki ilk numunede yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere yaklaşık 1.5mm çapında bir delik oluşmuştur. Bunun olası nedeni yine döküm yapısında mevcut



porozite veya iri bir inklüzyondur. Burada vurgulanması gereken sonuç, bu delik açılana kadar alaşımın tez çalışmasının amacına yönelik olarak deformasyon kapasitesi açısından çok başarılı bir sonuç vermiş olmasıdır. Bu nedenle yeni koşullardaki test başka bir numune ile aynı alaşım için tekrarlanmıştır.

İkinci test numunesinden alınan yukarıdaki fotoğrafta görüleceği üzere lokal mikroyapı kusurları azaltıldığı taktirde bu alaşım daha da başarılı sonuçlar verebilmektedir. Unutulmamalıdır ki, alaşımlarımızın ergitme koşulları gerçek bir magnezyum ergitme fırını koşullarına kıyasla çok daha kötüdür. Döküm koşullarındaki yetersizlikler daha önceden de ele alınmış olduğu için burada tekrar değinilmeyecektir. Bu koşullarda hazırlanmış bir alaşımımız bile şekillendirme kabiliyeti açısından son derece başarılı sonuçlar vermiştir. Görüntüleri verilmiş olan son iki numunenin kubbe yüksekliğinin test sırasındaki değişimleri Şekil 3.18’ de sunulmuştur.



Şekil 3.18. Mg-2Zn-2Ce alaşımı ile iki ayrı numunede  $T= 723\pm 5K$  ve  $P=11$  Bar koşullarındaki test sırasında kubbe yüksekliğinin değişimi.

### 3.3. Yeniden Kristalleşme Isıl işlemleri

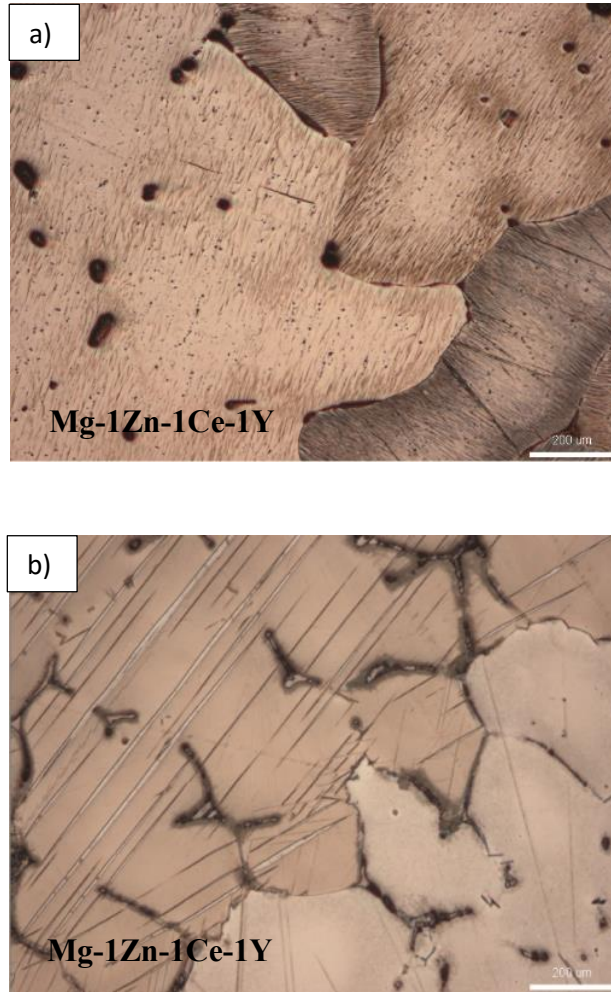
Yeniden kristalleşme bilindiği üzere tane küçültme veya mevcut tekstürün (yönlenmenin) giderilmesi amacıyla yapılır ve iki farklı metodla uygulanabilir. Bunlardan birincisi statik yeniden kristalleşmedir ve oda sıcaklığında deformasyonu müteakiben yüksek sıcaklıktaki ‘yeniden kristalleşme tavlama’ ile iki kademeli bir işlem olarak karşımıza çıkar. İkinci metod ise dinamik yeniden kristalleşmedir. Sıcak deformasyon esnasında deformasyonun ve yeniden kristalleşmenin aynı anda kaçınılmaz olarak yaşandığını duruma tekabül eder. Böylelikle, örneğin bir sıcak hadde, esasen

deformasyonla şekil değiştirmenin yanı sıra yeniden kristalleşmenin de gerçekleştiği dinamik bir işlemdir. Magnezyum alaşımları için yeniden kristalleşme, magnezyumun 'self-diffusion' (öz-difüzyon) katsayısı yüksek olduğu için hızlı gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak tane irileşmesi gibi istenmeyen bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yeniden kristalleşme sonucu elde edilen tane boyutu önem kazanmaktadır.

Yeniden kristalleşme, mevcut tekstürün (yönlenme) giderilmesi açısından da magnezyum alaşımlarında özel bir öneme sahiptir. Ne yazık ki örneğin AZ31 gibi çökelti partikülü içermeyen alaşımlarda, yeniden kristalleşme mevcut tekstürü giderememektedir. Çökelti partikülleri bulunması durumunda ise mevcut tekstür önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Statik ve dinamik yeniden kristalleşme arasında beklenen fark ise şudur: Öncelikle malzemenin şekillendirilmesinde kullanılacak rotaya (yani oda sıcaklığında deformasyonla şekillendirme veya ılık/yüksek sıcaklıkta) bağlı olarak yeniden kristalleşme ayrı ayrı incelenmek zorundadır. Statik yeniden kristalleşmenin tavlamaı içeren ikinci kademesinde dislokasyonlar yalnızca giderilme yönünde değişirken, dinamik yeniden kristalleşmede dislokasyonlar bir yandan giderilirken bir yandan oluşma şeklinde dinamik bir değişim içerisindedir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklıktaki deformasyon işleminde mevcut partiküllerin çözünerek (örneğin AZ31 içinde oluşturulabilecek  $Mg_{17}Al_{12}$   $\beta$  fazı çökeltileri 200°C'nin üzerinde çözünmeye başlarlar [83]) yeniden kristalleşmede beklenen iyileşmeyi sağlayamadığı bilinmektedir. Bu nedenle, çökelti partikülleri içeren bir yapıda statik yeniden kristalleşme ve dinamik yeniden kristalleşme sırasında çökelti partiküllerinin oluşum veya çözünme kinetiği açısından da farklılık göstereceği aşıkardır. Kaldı ki magnezyum için kendine has bir anomali de söz konusudur. Magnezyum ve alaşımları için oda sıcaklığındaki deformasyon sınırlı sayıdaki (sadece bazal düzlemleri içeren) kayma sistemlerinin hareketlenmesi ile gerçekleşirken, yüksek sıcaklıklarda ilave kayma sistemleri aktif hale gelmektedir. Bu durumda dislokasyon yoğunluğu ve davranışı sadece oda sıcaklığında deformasyonu içeren statik yeniden kristalleşme çerçevesinde ayrı, ilave slip sistemlerinin hareketlendiği yüksek sıcaklıklarda, yani dinamik yeniden kristalleşmede ise farklıdır. Dolayısıyla statik ve dinamik yeniden kristalleşmeden aynı sonuçlar beklenmemelidir. Literatür çalışmaları da tüm bu nedenlerle, yeniden kristalleşmeyi bu iki farklı durum için ayrı ayrı rapor ederler.

Rekristalizasyon için gerekli deformasyon, çekme testleri veya haddeleme ile uygulanmaya çalışılmıştır. Ancak inklüzyon içeriğinin yüksek olması nedeniyle her

alaşım yeterli oranda deforme edilememiştir. Sıcak olarak haddelenebilmiş olan Mg-1Zn-1Y-1Ce alaşımı numuneleri, dinamik rekristalizasyonu temsil eden durumdadır. Bu numunelerin mikroyapısı Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tane sınırlarının nispeten çok olduğu (b) şeklinde çok sayıda tav ikizleri mevcuttur. Bu bölgeler daha çok dentrit kollarının birbirlerini tüketerek yeniden kristalleşmenin yaşandığı bölgeler olarak yorumlanmıştır.



**Şekil 3.19.** Sıcak hadde için seçilen alaşımların hadde sonrası dinamik olarak yeniden kristalleşmiş mikroyapı görüntüleri. (a) Göreceli daha kaba taneli; (b) Göreceli daha çok tane sınırı içeren bölge.

#### 4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada seryum elementinin magnezyum ve alaşımları üzerine etkileri incelenmiştir.

Işık ve taramalı elektron mikroskobundan elde edilen veriler göstermiştir ki seryum ilavesi magnezyum alaşımlarında tane sınırlarında sıcaklık dayanımı yüksek ikinci fazlar oluşturarak tane büyümesine engel olabilmektedir.

Çalışılan alaşımlar arasında tane sınırlarında görülen intermetalik çökeltiler açısından en zengin alaşım sistemi Mg-Zn-Ce olarak tespit edilmiştir. Diğer alaşım sistemleri farklı element içeriği bakımından daha zengin olsa da, en yalın bileşimli alaşımda daha fazla çökelti partikülü görülmesi magnezyum matris içerisinde çözünürlüklerin değişmesine bağlanabilir.

Aynı zamanda yapılan çalışmada çeşitli fiziksel testler sonucunda saf magnezyuma göre çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde önemli artış sağlandığı görülmüştür. Ergitme koşullarında karşılaşılan olumsuzluklar sebebiyle elde edilen sonuçlar beklenenin altında kalmıştır. Hazırlanan alaşımların tümü döküm sonucu ve uzun süreli homojenizasyon tavı nedeniyle kaba taneli ve dentritik yapıya sahiptir. Tane boyutu nispeten küçük bu alaşımlarda tane sınırlarındaki intermetaliklerin nispeten yüksek sıcaklıklarda oluşmaları sonucu, dökümden sonra yapılan ve homojenizasyon işlemi sırasında yavaş soğumasıyla tane büyümesini etkin bir şekilde geciktirdikleri görülmüştür.

Malzemelerin iri taneli döküm yapıları ve yüksek oksit inklüzyon içerikleri nedeniyle çekme testlerinde elde edilen mukavemet değerleri çarpıcı olmasa da, elde edilen sertlik değerleri daha iyi indikatörler olarak görülmüş ve mukavemet açısından yine de umut verici olduğu yorumu yapılmıştır.

Seryum içeren numunelerimiz içerisinde oksit inklüzyon içeriği yeterince düşük olmasa da bu açıdan uygun bulunan Mg-2Zn-2Ce alaşımı üzerinde yüksek sıcaklıklarda (400°C ve 450°C) serbest şişme testleri de yapılmış olup deformasyon kapasitesi açısından tüm inklüzyon içeriklerine rağmen son derece yüksek deformasyon kapasitesi gösterdiği bulunmuştur. Bu perspektiften değerlendirildiğinde söz konusu seryumlu alaşımlarda mukavemet artışından ziyade deformasyon kapasitesindeki iyileşme nedeniyle önemli bir potansiyel olduğu vurgulanmalıdır.

Sn ve Pb elementlerinin istif hatası enerjisini düşürdüğü bilinmektedir [84]. Aynı nedenle özellikle piramidal kayma sistemini hareketlendirdiği için magnezyumda

deformasyon kabiliyetini artırdığı rapor edilmiştir [85,86]. Bizim çalışmamızda da bu etkinin incelenebilmesi amacıyla alaşımlarda kullanılmıştır. Mekanik özellikler açısından alaşımların metalurjik temizliğinin ergitme yöntemimiz nedeni ile düşük olması, yani inklüzyon sayılarının fazlalığı nedeniyle Sn ve Pb elementlerinin beklenen etkileri direkt gözlenememiş olsa da istif hatası enerjisini düşürdüklerini işaret eden önemli bir metalografik gözlem vardır. İstif hatası enerjisi düşükçe ikizlenmelerin de kolaylaştığı bilinmektedir [87]. İşte bu etki nedeniyle Sn ve Pb elementlerini birlikte içeren alaşımda tav ikizlerinin sayısı da diğer alaşımlara kıyasla çok daha fazla görülmüştür. Yalnızca Sn elementini içeren Mg-1Sn-1Y-2Zn-2Ce alaşımında ikizlenmelerin sayısının daha düşük olması ise bu alaşımdaki diğer elementlerin muhtemelen piramidal kayma düzlemlerinde Sn elementinin alabileceği yerleri işgal etmelerine bağlanmıştır.

## KAYNAKÇA

1. Friedrich, H. E., Mordike, B. L. (2006). *Magnesium Technology*. Springer.
2. Amaç, A. E., Şahin, C. (2009). Hibrit Elektrikli Araçlarda Yakıt Ekonomisinin Advisor İle Analizi. 3. Enerjinin Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK'09, 119-123.
3. Friedrich, H., Schumman, S. (2011). Research For a New Age Of Magnesium İn The Automotive İndustry. *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 276-281.
4. Mert, F., Özdemir, A. (2011). Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümü ve Otomotivdeki Uygulamaları. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), , Elazığ, Turkey.
5. Fleming, S. (2012). An Overview of Magnesium based Alloys for Aerospace and Automotive Applications. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, CT August.
6. Suwas, S., Gurao, N. P. (2008). Crystallographic Texture in Materials Review. *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol 88.
7. Gottstein, G., Sebal, R. (2001). Modelling of Recrystallization Textures", *Journal of Materials Processing Technology*. 117, 282-287.
8. Iwanaga, K., Tashiro, H., Okamoto, H., Shimizu, K. (2004). Improvement Of Formability From Room Temperature To Warm Temperature İn AZ-31 Magnesium Alloy. *Journal Of Materials Processing Technology* 155–156, 1313-1316.
9. Reed-Hill, R.E., Robertson, W.D. (1957). The Crystallographic Characteristics Of Fracture İn Magnesium Single Crystals. *Acta Metall*, 5:728–37.
10. Rao, G.S., Prasad, YVRK. (1982). Grain Boundary Strengthening İn Strongly Textured Magnesium Produced By Hot Rolling. *Metall Trans A*, 13:2219–26.
11. Sandlöbes, S., Zaefferer, S., Schestakow, I., Yi, S., Gonzalez-Martinez, R. (2011). *Acta Mater*. 59, 429–439.
12. Wonsiewicz, B.C., Backofen, W.A.(1967). *TMS-AIME*, 1422–1431.
13. Agnew, S.R., Duygulu, O.(2005). *Int. J. Plasticity* 21, 1161–1193.
14. Agnew, S.R., Tome, C.N., Brown, D.W., Holden, T.M., Vogel, S.C.(2003). *Scripta Mater*. 48, 1003–1008.
15. Luo, AA.(2002). *JOM*, 54(2), 42–8.

16. Mordike, B.L., Ebert, T. (2001). Magnesium Properties Applications Potential. *Materials Science and Engineering*, A302, 37–45.
17. Yamashita, A., Horita, Z., Langdon, T. G. (2001). Improving The Mechanical Properties of Magnesium and a Magnesium Alloy Through Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering*, A300, 142–147.
18. Mathaudhu, S. N., Luo, A. A., Neelameggham, N. R., Nyberg, E. A., Sillekens, W. H. Essential Readings in Magnesium Technology. Wiley (800) 762-2974.
19. Guo, Z. X. (2015). The Deformation and Processing of Structural Materials. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, P.30.
20. Azushima, A., Kopp, R., A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida. (2008). *CIRP Annals e Manuf. Technol.* 57, 716-735.
21. Abbott, T. (2009). Why Choose Magnesium? *Material Science Forum*, vol.618-619, pp.3-6.
22. Bhadeshia, H.K.D.H. (2007). Solid Solutions: The Hume-Rothery Rules". Retrieved.
23. Golmakaniyoon, S., Mahmudi, R. (2011), Comparison of the Effects of La- and Ce-Rich Rare Earth Additions on the Microstructure, Creep Resistance, and High-Temperature Mechanical Properties of Mg–6Zn–3Cu Cast Alloy. *Materials Science and Engineering A* 528, 5228–5233.
24. Stanford, N., Atwell, D., Beer, A., Davies, C., Barnett, M.R. (2008). *Scripta Mater.* 59, 772.
25. Stanford, N., Barnett, M.R. (2008). *Mater. Sci. Eng. A* 496, 399.
26. Chino, Y., Kado, M., Mabuchi, M. (2008). *Mater. Sci. Eng. A* 494, 343.
27. Beck, A. (1939), *Magnesium und seine Legierungen*, Springer Verlag, Berlin.
28. Ball, E.A., Prangnell, P.B. (1994). *Scripta Mater.* 31, 111.
29. Dobron, P., Bohlen, J , Chmelik, F, Pavel, L., Dietmar, L., Kainer, K. U. (2007). Acoustic Emission During Stress Relaxation Of Pure Magnesium And AZ Magnesium Alloys. *Materials Science and Engineering A* 462, 307–310.
30. <https://en.wikipedia.org/wiki/Mischmetal>
31. Islam, M. M., Mostafa, A. O., Medraj, M. (2014). Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data. *Journal of Materials*, Article ID 704283, 33.

32. Ball, E.A., Prangnell, P.B. (1994). *Scr. Metall. Mater.* 31, 111–116.
33. Hort, N., Huang, Y.D., Kainer, K.U. (2006), *Advanced Engineering Materials* 4, 235.
34. Hantzsche K., Bohlen J., Wendt J., Kainer K.U. (2010). Effect of Rare Earth Additions on Microstructure and Texture Development of Magnesium Alloy Sheets. *Scripta Materialia* 63, 725–730.
35. Mostafa A, Medraj M. (2014). Phase Equilibria of the Ce-Mg-Zn Ternary System at 300 °C. *Metals*, 4, 168-195.
36. Fei Z.D., Gang Q. F., Wei L., Liang S. G., Bing Z. X. (2011), Effects of Ce Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-6Zn-1Mn Alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 21, 703-710.
37. Qingxin Z. , Libo T., Liren C., Zhonghao J., Jian M., Hongjie Z. (2015). Effect of Ce/La microalloying on microstructural evolution of Mg-Zn-Ca alloy during solution treatment. *JOURNAL OF RARE EARTHS*, Vol. 33, No. 1, P. 70.
38. Golmakaniyoon S., Mahmudi R. (2015). Effect of aging treatment on the microstructure, creep resistance and high temperature mechanical properties of Mg–6Zn–3Cu alloy with La- and Ce rich rare earth additions. *Materials Science & Engineering A* 620, 301–308.
39. HyukPark S. , BongSun You , Mishra R., Sachdev A. (2014). Effects of extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–(Mn)–Ce/Gd alloys. *Materials Science&Engineering A*598, 396–406.
40. Du Y.Z. , Qiao X.G. , Zheng M.Y., Wua K., S.W.Xu. The microstructure, texture and mechanical properties of extruded Mg–5.3Zn–0.2Ca–0.5Ce (wt%) alloy. *Materials Science & Engineering A*620, 164–171.
41. Ming-li H., Hong-xiao L., Hua DING, Li BAO, Xiao-bin M., Shi-ming H. (2012). Intermetallics and phase relations of Mg\_Zn\_Ce alloys at 400 °C. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 539-545.
42. Zhang X., Kevorkov D., Pekguleryuz M.O. (2010). Study on the intermetallic phases in the Mg–Ce system Part II. Diffusion couple investigation. *Journal of Alloys and Compounds*, 501, 366–370.
43. Li W., Zhou H., Lin P., Zhao S. (2009). Microstructure and rolling capability of modified AZ31–Ce–Gd alloys. *Materials Characterization* 60, 1298–1304.



44. Sirong Y., Xianjun C., Zhiqiu H., Yaohui L (2010). Microstructure and mechanical properties of friction stir welding of AZ31B magnesium alloy added with cerium”, *JOURNAL OF RARE EARTHS*, Vol. 28, No. 2, Apr., p. 316.
45. Mercer W.E., Hill J.E.(1992), SAE Technical Paper 920073.
46. Rosalbino F., Angelini E., Negri S.D., Saccone A., Delfino S. (2006). *Intermetallic* 14, 1487.
47. Jonghyun K., Kawamura Y. (2013). Influence of Rare Earth Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Mg97Zn1Y1RE1 Alloys”, *Materials Science & Engineering A* 573, 62–66.
48. Asl, K. M., Masoudi, A., Khomamizadeh, F. (2010). The Effect Of Different Rare Earth Elements Content On Microstructure, Mechanical And Wear Behavior Of Mg–Al–Zn Alloy. *Materials Science and Engineering A* 527, 2027–2035.
49. Yang, M., Pan, F., Cheng, L., Shen, J. (2009), Effects of Cerium on as-cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg–3Sn–2Ca Magnesium Alloy. *Materials Science and Engineering, A* 512, 132–138.
50. Wu, T., Jin, L., Wu, W.X. , Gao, L. , Wang, J. , Zhang, Z.Y. , Dong, J. (2013). Improved Ductility Of Mg–Zn–Ce Alloy By Hot Pack-Rolling. *Materials Science & Engineering A* 584, 97–102.
51. Du, Y.Z. , Zheng, M.Y., Qiao, X.G., Wua, K., Liu, X.D., Wang, G.J., X.Y.Lv. (2013). Microstructure And Mechanical Properties Of Mg–Zn–Ca–Ce Alloy Processed By Semi-Continuous Casting. *Materials Science & Engineering A* 582, 134–139.
52. Zhiyong, Y., Zhaoguang, Z, Jinshan, Z, Yinghui, W. Effect Of Ce-Rich Rare Earth On Microstructure And Mechanical Properties Of Mg-10Zn-5Al-0.1Sb Magnesium Alloy. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China.
53. Sanjari, M., Farzadfar, S.F., Sakai, T., Utsunomiya, H., Essadiqi, E., In-HoJung, S.Yue. (2013). Microstructure And Texture Evolution Of Mg–Zn–Ce Magnesium Alloys Sheets And Associated Restoration Mechanisms During Annealing. *Materials Science & Engineering, A* 561,191–202.

54. Zhoua, T., Chen, Z, Yang, M, Hu J, Xia, H. (2012). Investigation On Microstructure Characterization And Property Of Rapidly Solidified Mg–Zn–Ca–Ce–La Alloys. *Materials Characterization* 63, 77–82.
55. Mingbo, Y, Tingzhang, G, Caiyuan, Q, Fusheng, P, (2012). Microstructure, Tensile And Creep Properties Of As-Cast Mg-3.8Zn-2.2Ca-Xce (X=0, 0.5, 1 and 2 Wt.%) Magnesium Alloys”, *Journal Of Rare Earths*, Vol. 30, No. 2, P. 181.
56. Kai-Yang, Z, Xiao-Dong, P, Wei-Dong, X. (2010). Effects of Ce on Microstructure of Semi-Continuously Cast Mg-1.5Zn-0.2Zr Magnesium Alloy Ingots. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, s324-330.
57. Yang, M., Pan, F., Liang, X., Shen, J., Qin, C. (2011). Effects of Minor Zr and Sr on as-cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg–3Ce–1.2Mn–1Zn (wt%) Magnesium Alloy”, *J Mater Sci.* 46:3216–3224.
58. Jun, J.H., Kim, J.M., Park, B.K., Kim, K.T., Jung, W.J. (2005). *J. Mater. Sci.* 40 2659–2661.
59. Birbilis, N., Cavanaugh, M.K., Sudholz, A.D., Zhu, S.M., Easton, M.A., Gibson, M.A. (2010). *Corros. Sci.* 53, 168–176.
60. Huppmann, M., Müller, S., Reimers, W. (2010). Changes of the Texture and the Mechanical Properties of the Extruded Mg Alloy ME21 as a Function of the Process Parameters. *Materials Science and Engineering A* 528, 342–354.
61. Meyers, M.A., Vöhringer, V., Lubarda, A. (2001). *Acta Mater.* 49, 4025.
62. Barnett, M.R., Keshavarz, Z., Beer, A.G., Atwell, D. (2004). *Acta Mater.* 52, 5093.
63. Yi, S.B., Bohlen, J., Heinemann, F., Letzig, D. (2010). *Acta Mater.* 58 (2), 592–605.
64. Senn, J.W., Agnew, S.R. (2008). *Magnesium Technology*. TMS New Orleans, pp. 153–158.
65. Senn, J.W., Agnew, S.R. (2006). *Proc. Magnesium Technology in the Global Age*. Montreal, pp. 115–130.
66. Bach, Fr.-W., Behrens, B.-A., Rodman, M., Rossberg, A., Kurz, G. (2005). *JOM*, 57–61.

67. Liu, W, Cao, F, Chang, L, Zhang Z. (2009). Effect of Rare Earth Element Ce and La on Corrosion Behavior of AM60 Magnesium Alloy” *Corrosion Science* 51, 1334–1343.
68. Bohlen, J., Yi, S., Letzig, D., Kainer, K. U. (2010), Effect of Rare Earth Elements on the Microstructure and Texture Development in Magnesium–Manganese Alloys During Extrusion. *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 7092–7098.
69. Ming-bo, Y, Yan-long, M, Fu-sheng, P. (2009). Effects Of Little Ce Addition On As-Cast Microstructure and Creep Properties Of Mg-3Sn-2Ca Magnesium Alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19,1087-1092.
70. Tardif, S., Tremblay, R., Dubé, D. (2010), Influence Of Cerium On The Microstructure and Mechanical Properties Of ZA104 and ZA104 + 0.3Ca Magnesium Alloys. *Materials Science and Engineering A*, 527,7519–7529.
71. Mendis, C.L., Muddle, B.C., Nie, J.F. (2006), *Philos. Mag.* 86 (12), 755.
72. Luo, A. A., Wu, W., Mishra, R. K., Jin, L., Sachdev, A. K., Ding, W. (2010). Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Magnesium-Aluminum-Cerium Alloy Tubes. *Metallurgical and Materials Transactions A Volume 41a*, 2663.
73. Yuan, G.Y., Liu Z.L., Wang, Q.D., Ding, W.J. (2002). Microstructure Refinement of Mg–Al–Zn–Si alloys. *Mater. Lett.* 56, 53–58.
74. Liu, S.F, Li, B, Wang, X.H., Su, W., Han, H. (2009), Refinement Effect of Cerium, Calcium and Strontium in AZ91 Magnesium Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3999 – 4004.
75. Zhou, H., Zeng, X., Liu, L., Zhang, Y., Zhu, Y., Ding, W. (2004). Effect of Cerium on Microstructures and Mechanical Properties of AZ61 Wrought Magnesium Alloy. *Journal of Materials Science*, 39, 7061 – 7066.
76. Villars, P. and Calvert, L. D., Pearsons. (1996). *Handbook of Crystallographic Data Intermetallic Phases,*” 2nd ed. (ASM International Materials Park, Oh) Vol. 1, p. 1016.
77. Li, Y. and Jones, H. (1996). *Mater. Sci. Tech.*, 12(8), 651.
78. Wei, L. Y., Dunlop, G. L. and Westengen, H. J . (1996). *Mater. Sci.* 31(2), 387.

79. Li-bin, W., Xu-he, L., Rui-zhi, W., Chong-liang, C., Jing-huai, Z., Mi-lin, Z. (2012). Microstructure and Tensile Properties of Mg-Li-Al-Zn Based Alloys with Ce Addition. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 779-785.
80. Wu, R.Z., Deng, Y.S., Zhang, M.L. (2009). Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5Li-3Al-2Zn-xRE Alloys. *J Mater Sci*, 44: 4132-4139.
81. Zhang, M L, Wu, R.Z., Wang, T. (2009). Microstructure and Mechanical Properties of Mg-8Li-(0-3)Ce Alloys [J]. *J Mater Sci*, 44:1237-1240.
82. Langelier, B., Nasiri, A.M., Lee, S.Y., Gharghour, M.A., Esmaili, S. (2015). Improving Microstructure and Ductility in the Mg-Zn Alloy System by Combinational Ce-Ca Microalloying. *Materials Science&Engineering A620*, 76-84.
83. Kim, W. J., Chung, S. W., Chung, C. S., Kum, D. (2001). Superplasticity In Thin Magnesium Alloy Sheets And Deformation Mechanism Maps For Magnesium Alloys At Elevated Temperatures. *Acta mater.* 49, 3337-3345.
84. Zhang, H.Y., , Wang, H.Y., Wang, C., Liu, G.J., Jiang, Q.C. (2013) First-Principles Calculations of Generalized Stacking Fault Energy in Mg Alloys with Sn, Pb And Sn+Pb Dopings. *Materials Science&Engineering*, A584,82-87.
85. Wang, H.Y, Zhang, N., Wang, C., Jiang, Q.C. (2011). *Scr. Mater.* 65, 723.
86. Wang, H.Y., Nan, X.L., Zhang, N., Wang, C., Wang, J.G., Jiang, Q.C. (2012). *Chem. Phys. Mater.* 132, 248.
87. Kaya, A.A. (2013). Physical Metallurgy of Magnesium Alloys, in 'Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy', Editors: Prof. Mihriban O. Pekguleryuz, Prof. Karl Kainer, Prof. A. Arslan Kaya, , Woodhead Publishing, Cambridge, England, ISBN: 978-0-85709-088-1, pp.33-84.