



## Investigation of the effect of addition of Ce (Cerium) to Mg-4Sb-2Al alloy produced by high pressure die casting method

Levent Cenk Kumruoğlu<sup>1\*</sup>, Kübra İnce<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 31200 Iskenderun Hatay, Turkey

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 58100, Sivas, Turkey

### Highlights:

- HPDC method was applied on Rare Element modified Mg-4Sb-2Al magnesium alloy.
- Depending on the Ce ratio, the presence of CeSb and Mg<sub>12</sub>Ce intermetallics as well as Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> were detected by SEM and XRD.
- The tensile strength of the 1% Ce added alloy was found to be between 164-168 MPa and the elongation value was 13%.

### Keywords:

- High Pressure Die Cast
- Mg-4Sb-2Al
- Magnesium Alloys
- Cerium
- Mechanical Properties

### Article Info:

Research Article  
Received: 07.04.2021  
Accepted: 02.10.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.911073

### Acknowledgement:

This work was supported by the Sivas Cumhuriyet Uni. CÜBAP (M712) project. We thank Dr. Hüseyin ŞEVİK for his contribution.

### Correspondence:

Author: Levent Cenk Kumruoğlu  
e-mail: cenk.kumruoglu@iste.edu.tr  
phone: +90 0505 894 2801

### Graphical/Tabular Abstract

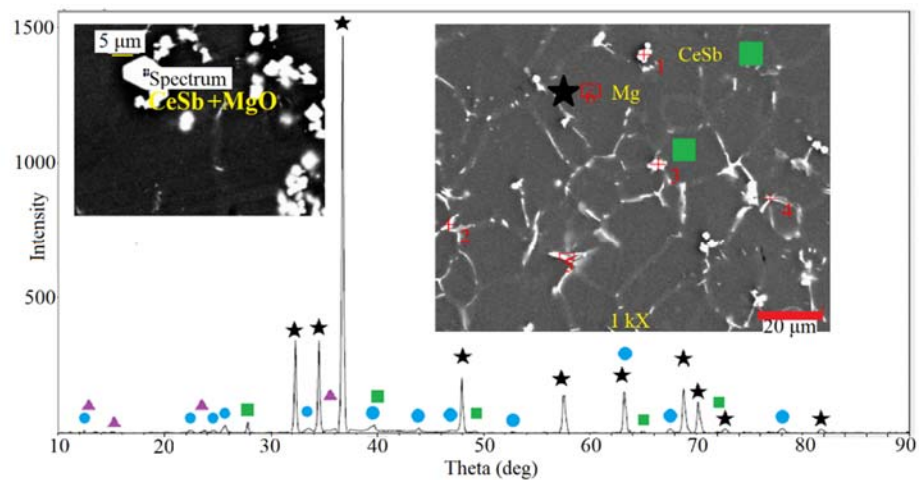


Figure A. XRD and SEM analysis of Mg-4Sb-2Al-1Ce alloy

**Purpose:** In this study, it was produced with HPDC by adding Cerium rare element to Mg-4Sb-2Al alloy. The effect of Ce on mechanical properties was explained by the theories of microstructural transformation and new phase formation.

### Theory and Methods:

Mg-4Sb-2Al alloy, which is a new generation alloy in Mg alloys, was developed and the existing properties were further improved by adding the alloy RE (Rare Element). In the selection of additive elements of the basic alloying element, Mg-4Sb-2Al alloy, its suitability to pressure casting (HPDC) technique, which is one of the most important production techniques especially for light metal casting industry, has been taken into consideration. Sb and Al elements as the alloying element were added to the Mg alloy and the main alloying element was produced. In the selection of these elements, approaches such as basic material science criteria, favorable flow and porosity properties for casting, compliance with strength enhancement criteria were taken as basis. 0.5wt.% -2wt.% Ce was added to the alloy and metallurgical investigations were carried out.

### Results:

The addition of Ce was chosen between wt. 0.5% and wt. 2% and the optimum Ce ratio was determined. It was understood that the added Ce also acts as a grain refiner and a new intermetallic CeSb was formed at the grain boundaries. wt. 1% Ce added alloy had a tensile strength of 164-168 MPa and an elongation of 13%. In the amount of 2% Ce added, the tensile strength of the alloy produced was found to be 16%, measured at values between 163-167 MPa.

### Conclusion:

It has been concluded that if the elongation criteria of Mg-4Sb-2Al alloys produced with HPDC are 12%, the alloy with 1% Ce addition will be an ideal engineering alloy on the basis of tensile strength, hardness and economy.



## Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen Mg-4Sb-2Al alaşımına Ce (Seryum) ilavesinin etkisinin incelenmesi

Levent Cenk Kumruoğlu<sup>1\*</sup>, Kübra İnce<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 31200 İskenderun Hatay, Türkiye

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 58100, Sivas, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Nadir Element (Ce) modifiyeli Mg-4Sb-2Al magnezyum alaşımına HPDC yöntemi uygulandı
- Ce oranına bağlı olarak, SEM ve XRD ile CeSb ve Mg<sub>12</sub>Ce intermetaliklerinin yanı sıra Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> fazı tespit edildi
- %1 Ce katkılı alaşımın çekme dayanımı 164-168 MPa arasında, uzama değeri ise %13 olarak bulundu

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.04.2021

Kabul: 02.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.911073

### Anahtar Kelimeler:

Yüksek basınçlı döküm,  
Mg-4Sb-2Al,  
magnezyum alaşımları,  
seryum,  
mekanik özellikler

### ÖZ

Bu çalışmada Mg-4Sb-2Al alaşımına, ağırlıkça %0,5, 1, 2 oranlarında Ce (seryum) elementi ilavesinin etkisi incelenmiştir. Döküm prosesi olarak yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılmıştır. Üretilmesi planlanan ürünler direk olarak çekme ve darbe numunesi şeklinde üretilmiştir ve çekme numuneleri yarı endüstriyel pilot ölçekli numuneleri temsil etmektedir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için çekme deneyleri, sertlik deneyleri, metalurjik ilişkiyi tespit etmek için ise metalografik inceleme, SEM ve XRD incelemeleri yapılmıştır. İlave edilen Ce oranına bağlı olarak mekanik özellikler artmıştır. Bu sonuçlara göre Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>, Mg<sub>12</sub>Ce, CeSb ve Mg fazlarının varlığı tespit edilmiştir. İlave edilen Ce oranının artmasına bağlı olarak yeni bir faz olan CeSb fazının şiddeti artmıştır. CeSb ve Mg<sub>3</sub>Sb<sub>3</sub> intermetalik fazlarının tane sınırlarında biriktiği anlaşılmıştır. Tane sınırlarında çubuğumsu bir şekilde birikim gösteren bu yapılar, dislokasyon hareketini engellemek ve ince taneli bir yapı oluşturmak sureti ile çekme mukavemetini ve sertlik değerlerini artırmıştır. Çekme mukavemeti değerleri %0,5 Ce, %1 Ce, %2 Ce ilave edilen alaşımlar için sırası ile 145-148 MPa, 164-168 MPa, 163-167 MPa aralığında, uzama yüzdeleri ise sırası ile %12, %13 ve %16 olarak tespit edilmiştir. Ce ilavesi ile sertlik değeri 48 BHN'den 54 BHN'e artmıştır.

## Investigation of the effect of addition of Ce (Cerium) to Mg-4Sb-2Al alloy produced by high pressure die casting method

### H I G H L I G H T S

- HPDC method was applied on Rare Element (Ce) modified Mg-4Sb-2Al magnesium alloy
- Depending on the Ce ratio, the presence of CeSb and Mg<sub>12</sub>Ce intermetallics as well as Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> were detected
- The tensile strength of the 1% Ce added alloy was found to be between 164-168 MPa and the elongation value was 13%

### Article Info

Research Article

Received: 07.04.2021

Accepted: 02.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.911073

### Keywords:

High pressure die casting,  
Mg-4Sb-2Al,  
magnesium alloys,  
cerium,  
mechanical properties

### ABSTRACT

In this study, the effect of the addition of Ce (cerium) element in the ratio of 0.5, 1, 2% by weight on Mg-4Sb-2Al alloy was investigated. High pressure die casting (HPDC) was used as the casting process. The cast alloys are produced directly in the form of tensile and test specimens, tensile specimens represent semi-industrial pilot scale specimens. Tensile and hardness tests were carried out to determine the mechanical properties, and metallographic examination, SEM and XRD studies to determine the metallurgical relationship. Mechanical properties have increased depending on the added Ce weight. According to these results, the presence of Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>, Mg<sub>12</sub>Ce, CeSb and Mg phases was determined. Depending on the increase in Ce added, the ratio of the new phase CeSb has increased. It was understood that the CeSb and Mg<sub>3</sub>Sb<sub>3</sub> intermetallic phases were concentrated at the grain boundaries. These structures, which accumulate in a rod form at the grain boundaries, increase the tensile strength and hardness values by preventing dislocation movement and creating a fine-grained structure. Tensile strength values are in the range 145-148 MPa, 164-168 MPa, 163-167 MPa for alloys with 0.5% Ce, 1% Ce, 2% Ce, respectively, and the elongation percentages are 12%, 13% and 16% respectively. With the addition of Ce, the hardness value increased from 48 BHN to 54 BHN.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

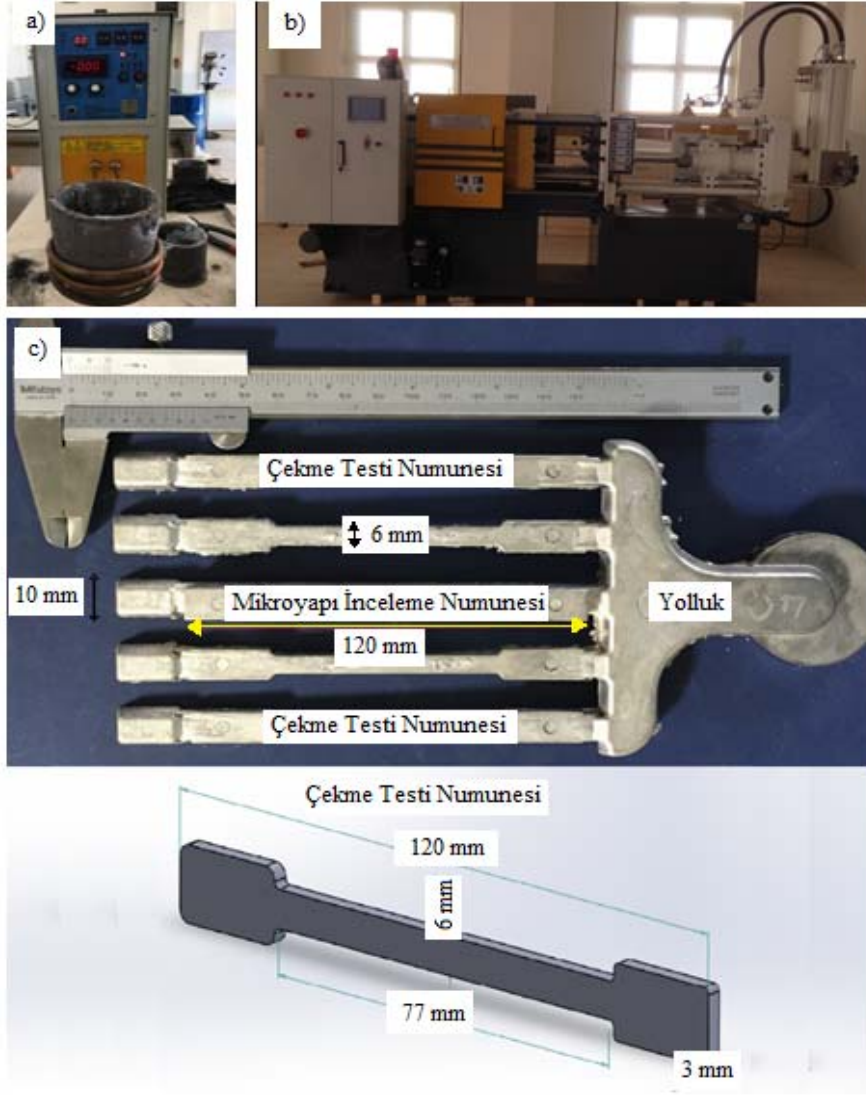
İmalatta kullanılan metaller arasında bir kıyaslama yaparsak en hafif metalin magnezyum (Mg) olduğu aşikârdır. Magnezyumun, çelik ve çinkodan %75, alüminyumdan ise  $\approx$ %33 daha hafif olması, özellikle yoğunluğun ön plana çıktığı imalat sektöründe kullanımına olanak sağlamaktadır.  $1,74 \text{ g/cm}^3$  olan yoğunluğu ve  $\approx 650 \text{ }^\circ\text{C}$  olan ergime sıcaklığı olan Mg, döküme elverişli ve talaşlı imalata uygundur [1]. Üretim hızının yüksek olmasından dolayı, basınçlı döküm Mg üretiminde yaygın bir teknik olmuştur. Bu yaygınlaşma, otomotiv sanayisinin karbon emisyonunu düşürme temayülü sonucu ortaya çıkmıştır [2, 3]. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi eşsiz ekonomik avantajlar sunmaktadır. Alüminyum ve çinkoya kıyasla magnezyum alaşımlarının hacimsel özgül ısısı daha düşüktür. Bu da dökümün daha hızlı soğuması, daha yüksek çalışma hızı ve daha az kalıp aşınması demektir [4, 5]. Mg'nin basınçlı dökümünde, ticari olarak dört farklı magnezyum alaşım sistemi kullanılır, bunlar (AZ) serisi, (AM) serisi, [6,7] (AS) serisi ve yeni geliştirilen (AE) sistemidir [8, 9]. Magnezyum alaşımlarında en yaygın olarak Mg-Al sistemi kullanılmaktadır. Bunun nedeni Al'nin ucuz olması ve mühendislik özelliklerine yaptığı önemli katkıdır. Mg-Al alaşımı  $437^\circ\text{C}$  gibi çok düşük sıcaklıkta ötektik reaksiyon göstermektedir. Ötektik reaksiyon,  $L \leftrightarrow \text{Mg}_{17}\text{Al}_{12} + \alpha(\text{Mg})$ , düşük sıcaklıkta meydana gelir ( $437^\circ\text{C}$ ). Ötektik çizgide Al'nin çözünürlüğü %12,7'dir, azalan sıcaklık ile Al'nin çözünürlüğü de azalır ve çözünebilirlik oda sıcaklığında yaklaşık %2 ye düşer. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sisteminin alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi [1, 6] sağlayabileceğini göstermektedir, [10, 11]. Mg-Al alaşımlarında %2 den daha fazla Al içerdiğinde mikro yapıda  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  intermetalikliği görülür. Eğer alaşımlarda Al içeriği %8'in üzerinde ise ağ yapısını tamamlamamış  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  intermetalikliği tane sınırları boyunca dağılım gösterir ve sünekliliğin azalmasına neden olur. Yaklaşık  $420^\circ\text{C}$ 'de çözünebilir alma işlemi  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  intermetalikliğinin çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir çekme mukavemeti ve sünekliliği artar.  $150^\circ\text{C}$  ile  $250^\circ\text{C}$  aralığında  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  intermetalikliği çökeltir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar [10]. Mg'a Sb ilavesi çok az sayıda çalışılmış olup halen tam olarak etkisi bilinmemektedir. İlave edilen Sb'nin Mg içinde katı çözünürlüğü olmayıp, tane sınırlarında  $\text{Mg}_3\text{Sb}_2$  intermetalikliği yapmaktadır. Çözünmenin olmaması elektronegativite farkı ile izah edilmektedir.  $\text{Mg}_3\text{Sb}_2$  intermetalik fazı ötektik reaksiyon sonucu oluşup, tane sınırları ve dendrit sınırları boyunca oluşmaktadır.  $\text{Mg}_3\text{Sb}_2$  intermetalik fazı tane sınırlarında meydana getirdiği gerilim nedeni ile dislokasyon hareketini yavaşlatmaktadır ve aynı zamanda iyi bir tane inceltici yani çekirdekleyici görev görmektedir. Literatürde %4 Sb'nin üzerinde ilave değerlerinin mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirtilmektedir [12]. Mg alaşımları incelendiğinde, Mg'nin en temel problemlerinden birisinin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki mekanik dayanımlarının düşük olmasıdır. Genel

alaşım elementlerinin birçoğunun Mg'ye etkisi çalışılmış olmasına rağmen bazı elementlerinin etkileri halen bilinmemektedir. Bu nedenle temel alaşımlama teoremleri çerçevesinde ve ısı işlemi ile etkileşim şartlarına bakılarak yeni elementlerin etkisi incelenmeye devam etmektedir. Bu alaşım elementlerinden birisi antimon (Sb)'dir. Mg'ye ilave edilen Sb, Mg ile magnezyumun hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerinin artırılması mümkün olmaktadır. Bu teoriye göre  $\text{Mg}_3\text{Sb}_2$  partikülleri, tane sınırlarında homojen bir şekilde dağılmaktadır, bu intermetalikler tane sınırlarındaki hareketi kilitlemek sureti ile akma ve sürünme direncini artırmaktadır [5, 13]. Bu çalışmada Mg-2Al alaşımına %4 Sb ilave edilmiş ve üçlü alaşım oluşturulmuştur. Üretilen Mg-4Sb-2Al alaşımına ağırlıkça %0,5, 1 ve 2 Ce ilavesi yapılarak mekanik değerlerdeki değişim incelenmiştir. Ce'nin oluşturduğu fazlar incelenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

Bu çalışmada Sb ve Ce'nin bu alaşımlama ve intermetalik oluşumundaki sinerjik etkisi incelenmiştir. Öncelikli olarak, Mg-4Sb-2Al ön alaşımı koruyucu atmosferde gravite döküm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar alaşımın, mikro yapısının kontrolü ve döküm ile imal edilip edilemeyeceği konusunda doğrulama çalışması niteliğindedir. Bu nedenle ön denemelerde Mg-4Sb-2Al alaşımları kompozisyon değerleri belirlenerek ergitme denemeleri yapılmıştır. Ergitme ve dökümde kullanılan 15 KW indüksiyon ocağı ve 100 Ton yüksek basınçlı döküm makinesi görüntüsü Şekil 1a, Şekil 1b'de verilmiştir. Ergime ve döküm sürecinde sıvı Mg-4Sb-2Al alaşımı %98 $\text{CO}_2$ +%2 $\text{SF}_6$  (Sülfür hegzaför) gaz karışımı ile korunmuştur. Ergitme SiC (Silisyum karbür) potada yapılmış böylece hem yüksek hızlarda ergitme gerçekleşmiş, hem de metalürjik kalite korunmuştur. Ergitmeden sonra mekanik ve indüksiyon karıştırma işlemi ile homojen alaşım elde edilmiştir. Daha sonra Şekil 1b'de görüldüğü gibi 100 Ton kapasiteli soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazında alaşımlar üretilmiştir. Numuneler Şekil 1c 4 adet çekme numunesi ve metalografik inceleme için bir kare kesitli çubuk şeklinde ASTM B557M-15 standartlarında üretilmiştir.

Üretilen Mg-4Sb-2Al alaşımına ağırlıkça üç farklı oranda (%0,5, 1, 2) Ce ilave edilmiştir. Ce ilavesi tekrardan ergitilen Mg-4Sb-2Al alaşımına sıvı fazda yapılmış ve sürekli olarak karıştırılmıştır. Bu sayede ilave Ce'nin tamamen eriyip sıvı banyoda dağılması sağlanmıştır. Üretilen numuneler ile ilgili veriler Tablo 1 de verilmektedir. Ayrıca bu çalışmada, ön alaşım olarak üretilen Mg-4Sb-2Al'nin dökümü ön ısıtma yapılmış ve yapılmamış olan kalıba yapılmış ve soğuk kalıptaki katılaşmanın mekanik ve mikro yapı üzerine etkisi de araştırılmıştır. Ön ısıtma işlemi kalıbın  $200^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılması sureti ile gerçekleştirilmiştir. Soğuk kalıba dökülmüş Mg-4Sb-2Al alaşımı ve Ce ilaveli kompozisyonları Tablo 1'de DKS (Düşük Kalıp Sıcaklığı) kısaltması ile ifade edilmiştir.



**Şekil 1.** (a) 15kW kapasiteli indüksiyon ergitme ocağı (b) 100 ton kapasiteli soğuk kamaralı basınçlı döküm makinesi (c) Çekme ve sertlik numunesi,  
(a)15kW capacity induction melting furnace (b) 100 ton capacity cold chamber high pressure die casting machine (c) Tensile and hardness sample

**Tablo 1.** Mg alaşımlarının elementel ağırlıkça kompozisyonları (Elementel %wt. composition of Mg alloys)

	Alaşım Kompozisyonu (ağ%)	Mg %	Sb %	Al %	Ce %
1	Mg-4Sb-2Al	94	4	2	-
2	Mg-4Sb-2Al-0,5Ce	93,5	4	2	0,5
3	Mg-4Sb-2Al-1Ce	93	4	2	1
4	Mg-4Sb-2Al-2Ce	92	4	2	2
5	Mg-4Sb-2Al (DKS)	94	4	2	-

### 2.1. Mikroyapı ve Faz İncelemeleri (Microstructure and Phase Studies)

Mikroyapı çalışmaları alan taramalı elektron mikroskopunda (SEM 6060 Jeol) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca faz analizleri için Rigaku marka XRD cihazı kullanılmıştır. Mikroyapı görüntüleri ise Nikon optik mikroskop ile

gerçekleştirilmiştir. SEM ve Optik Mikroskop numuneleri sırası ile 400, 800, 1000 ve 1200 grit SiC zımpara kağıdı ile zımparalandıktan sonra 0,05 µm alümina solüsyon ile parlatıldı ve son olarak asetik glikol (20 ml asetik asit, 1 ml nitrik asit, 60 ml etilen glikol, 19 ml distile su) ile hafifçe 10 saniye sürede dağlanarak tane sınırları ve faz yapıları ortaya çıkartıldı.

## 2.2. Sertlik Deneyleri (Hardness Tests)

Üretilen alaşımların makro sertlik deneyleri 31,25/2,5/30 kombinasyonuna sahip Brinell sertlik (HB) skalasında Brooks marka sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 2.3. Çekme Deneyleri (Tensile Tests)

Üretilen alaşımların çekme deneyleri RAAGEN marka universal çekme cihazında yapılmıştır. Her bir numunenin mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin hesaplanması için 4 adet numune kullanılmıştır ve elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak kabul edilmiştir. Çekme testleri oda sıcaklığında ve çekme hızı 0,2 mm/min olarak gerçekleştirilmiştir.

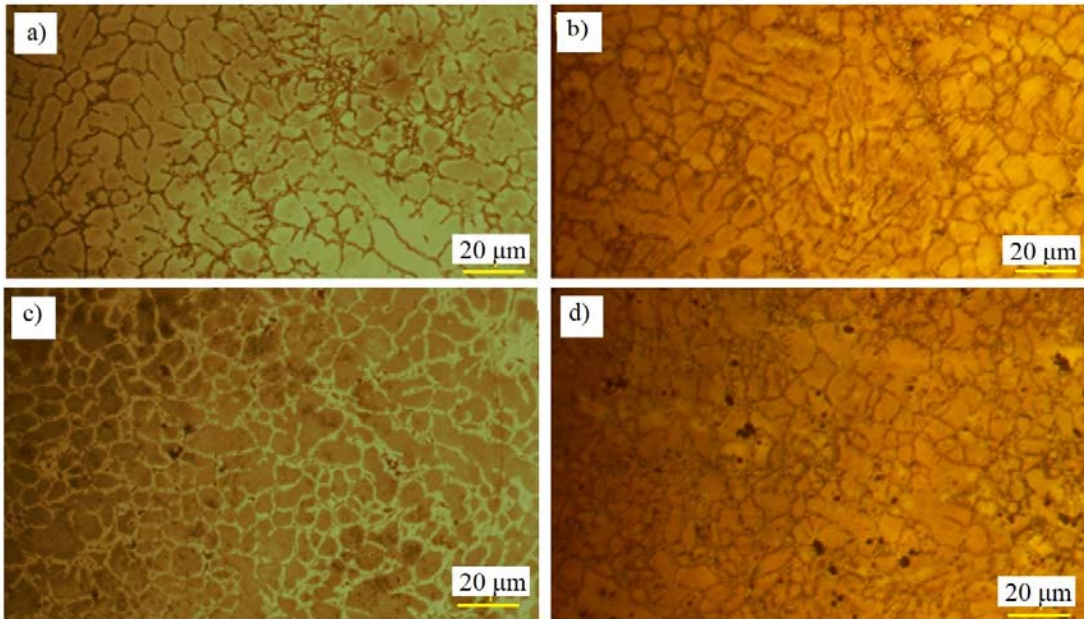
## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 3.1. Optik Mikroyapı ve Tane Boyutu İncelemeleri (Optical Microstructure and Grain Size Investigations)

Şekil 2’de verilen ve eşdeğer büyütmede çekilen optik mikroyapı görüntüleri, ana alaşıma ilave edilen Ce’nin tane inceltmede efektif olduğunu göstermektedir. Mg-4Sb-2Al de, ilave edilen Al’nin matris içinden ayrışarak tane sınırlarında Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetaliklerini oluşturmuştur.

Fakat bu tür alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması söz konusu ise, Al’nin düşük ergime sıcaklığı ve Mg içindeki yüksek difüzyon katsayısı nedeni ile interdentritik bölgelerde kabalaşma meyilinin olduğu vurgulanmalıdır. Bu durum 125°C üzerindeki sıcaklıklarda sürünme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda RE (Ce benzeri Nadir Element) ilavesinin bu tür alaşımlarda oluşan intermetaliklerin termal stabilitesini

artırdığı gözlenmiştir [14]. RE ilavesi ile üretilen metal kalıba basınçlı döküm uygulamaları da olumlu sonuç vermiş ve RE ilaveli alaşımların sürünme dayanımı artmıştır. Optik, SEM-EDS ve SEM-EDS analizi ile haritalama analiz çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde ilave edilen Sb’nin Mg içinde çözünürlüğünün olmamasına bağlı olarak matris tane içinden ötektik ayrışma reaksiyonu sonucunda dentritler arasındaki tane sınırları boyunca dağıldığı anlaşılmaktadır. Bu ayrışma sonucunda dentritler arası sınırda Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> fazı birikmektedir. Sb’nin %4’ ten fazla ilave edilmesi sonucunda tane kabalaşmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda ilave edilen Sb Çin yazısı ifadesi ile tabir edilen mikro yapıyı düzenlemektedir. Sb’nin bir diğer etkisi tane yapısını inceltmesidir. Bu durum oda sıcaklığında dahi mekanik özelliklerin artması sağlamaktadır [12]. Katılma sırasında 650°C’de α-Mg katılacaktır, bu sıcaklık magnezyumun ergime sıcaklığı olup, ilave edilen Sb miktarına göre, alaşımın katılma sıcaklığı düşmektedir. Ağırlıkça %39,4 Sb içeren Mg alaşımı ötektik sıcaklıkta olup, içerisinde %4 Sb olması durumunda da denge dışı katılmağa bağlı olarak içerisinde ötektik fazlar içermektedir. Mg-Sb faz diyagramına göre oluşması muhtemel faz Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> olup bu faz XRD ile tespit edilmiştir. Ancak alaşıma ilave edilen Ce’nin oluşturması muhtemel bir diğer intermetalik ise Mg<sub>12</sub>Ce olup bu intermetalik oluşma sıcaklığı ise (L<sub>1</sub> → α-Mg + Mg<sub>12</sub>Ce) reaksiyonu ile gerçekleşmekte ve Yang vd. [15] yaptığı DSC çalışmasına göre dönüşümü 580°C derece ikili ötektik reaksiyonun gerçekleştiği anlaşılmaktadır [15]. Buna göre katılmağa önce α-Mg, daha sonra Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> ve daha sonrada Mg<sub>12</sub>Ce ayrışması gerçekleşmektedir. Artan Ce oranı ile oluşan CeSb genelde homojen bir dağılım gösterdiği ancak yer yer kümelendiği gözlenmiştir. Buradaki kümelenme küresel formdaki CeSb intermetaliklerinin küre temas noktalarından birleşmesi şeklinde değil ayrı ayrı olan kürelerin yakın



Şekil 2. Optik mikroyapı görüntüleri a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce, c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce, (Optical microscope images a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce, c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce.)

mesafelerde toplanması şeklindedir. Oluşan bu CeSb küreleri ekseriyetle tane sınırlarında birikmiştir, tane sınırların süresiz bir çizgi formundan ziyade peş peşe gelecek şekilde dizilmiştir. CeSb küre boyutları 5 mikrometre ile 50 nanometre arasında değişmektedir. Ce ilavesi sonrasında mikroyapı ortalama tane boyutu ise 15-25 mikrometre arasındaki değerlerde değişmektedir.

### 3.2. EDS analiziyle elementel haritalama (Elemental mapping with EDS analysis)

SEM-EDS analizleri, mikro yapıda nasıl bir morfolojide katılma olduğunu tespitini ve intermetalik yapılar oluşup oluşmadığını sonuçlarını vermektedir. Ana alaşım olan Mg-4Sb-2Al'nin SEM-MAP analizi yapılmış, Mg, Al, Sb elementlerinin yapı içerisinde nasıl dağıldığı Şekil 3'de gösterilmiştir.

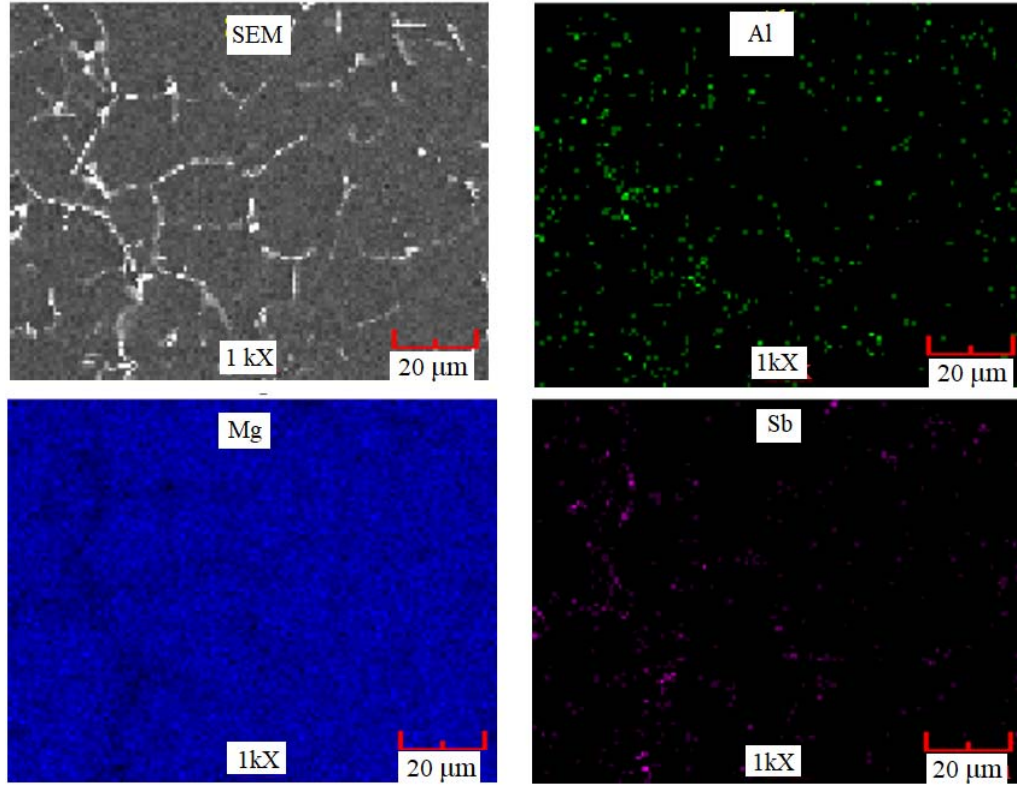
Şekil 4'de Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımına ilave edilen Ce'nin herhangi bir birikme göstermediği, ancak ilave edilen Sb'nin görüntüde beyaz çizgiler şeklinde gösterilen bölgede biriktiği tespit edilmiştir. Şekil 5'de ilave edilen Ce oranının %2 ye erişmesine bağlı olarak, artık mikro yapı içinde farklı

morfolojide yeni bir intermetalik formunun oluştuğu görülmektedir. Küresel formda olan bu intermetalik alanda daha çok Ce ve Sb elementlerinde yoğunlaşma oluştuğu tespit edilmiştir.

### 3.3. Taramalı elektron mikroskobu nokta analizi (Scanning electron microscope point analysis)

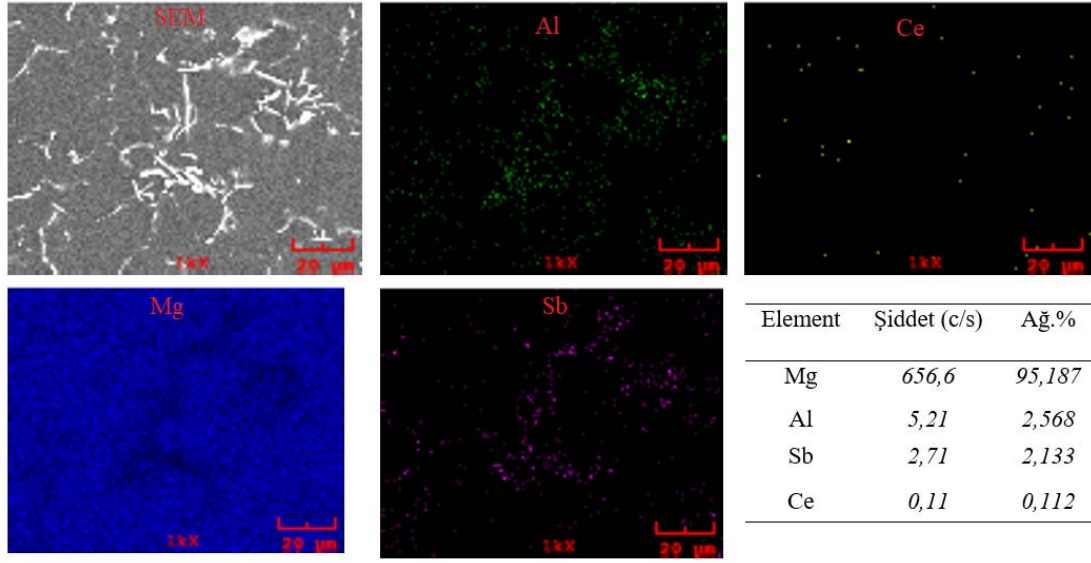
Mikro yapı nokta analizleri elementel mikrosegregasyon olan bölgeleri tespit etmek için kullanılmıştır. Şekil 6'da verilen ve 1 numaralı analizde tane sınırında oluşan büyük bir yapıda Sb ve Al birikimi tespit edilmiştir. Benzer durum tane sınır kavşağında meydana gelen intermetalikte gözlenmiş Sb ve Al yüksek oranda tespit edilmiştir. 3 numaralı analiz ise tane içinden alınmış olup,  $\alpha$ -Mg içinde ağırlık % 0,459 Al ve 0,964 Sb elementleri bulunmuştur. Bu durum ilave edilen alaşım elementlerinin tane içinde az miktarda çözündüğünü ortaya koymuştur.

Şekil 7'de ilave edilen %0,5 Ce ile üretilen Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımının görüntüleri verilmiştir. Görüntü ve EDS analizler eşleştirildiğinde iki farklı intermetalik formunun oluştuğu ve bunların farklı oranlarda elementler içerdiği

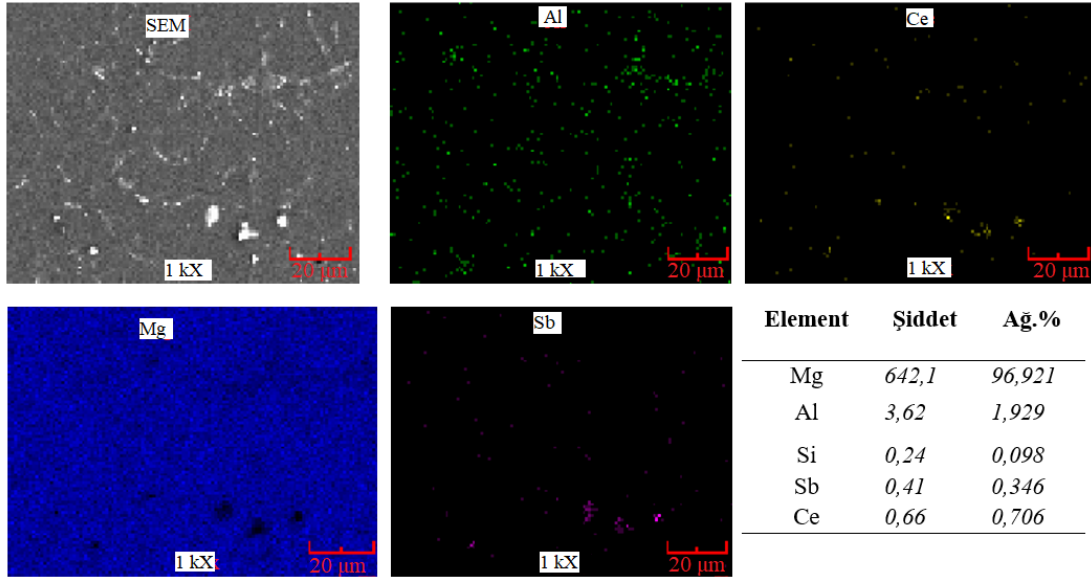


Element	Line	Şiddet (c/s)	Ağ.%
Mg	Ka	738,12	96,480
Al	Ka	3,52	1,594
Si	Ka	0,13	0,045
Sb	La	2,62	1,881

Şekil 3. Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM-EDS harita analiz sonuçları ( SEM field analysis results of Mg-4Sb-2Al alloy)



Şekil 4. Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımına ait SEM harita analiz sonuçları ( SEM field analysis results of Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alloy)

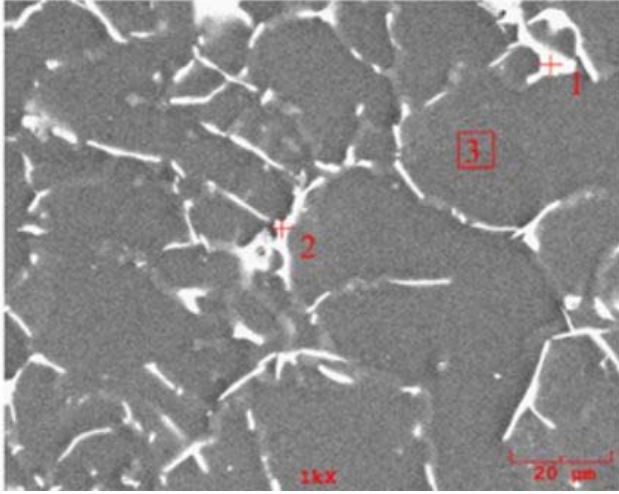


Şekil 5. Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM harita analiz sonuçları ( SEM field analysis results of Mg-4Sb-2Al-2Ce alloy)

anlaşılmıştır. Analiz 1 ve 3 benzer yapıda olup farklı formlarda elips geometrisinde oluşmuştur. Bu elips şekilli intermetaliklerin Ce içeriği %1,2-1,45 arasındadır. Diğer çubuk şeklindeki intermetaliklerde ise Sb oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

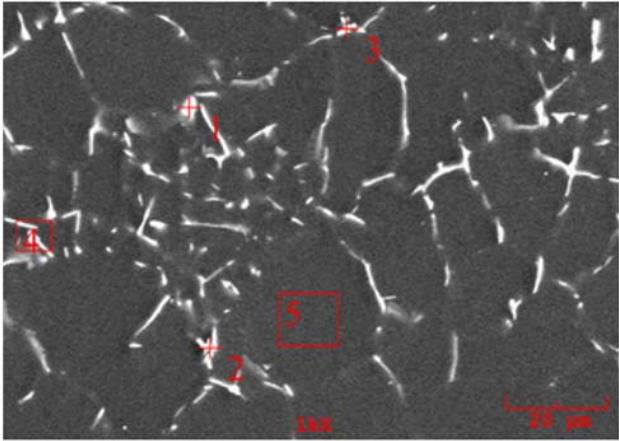
%1 Ce ilave edilen alaşımda elips yapılar daha bariz gözlenmiş ve yine çubuksal (needle) Sb içeren intermetalikler tespit edilmiştir (Şekil 8). Analiz 1 ve 3 de elips formunda CeSb intermetaligi tespit edilmiştir. Analiz 2 ve 4 de ise  $Mg_3Sb_2$  intermetaligi (çubuk ve plaka formunda) tespit edilmiştir. Burada EDS analizinde görünüm Al'nin ise  $Mg_{17}Al_{13}$  formunda yine tane sınırlarında biriktiği düşünülmektedir. Analiz 5 plaka veya lamel formunda bir intermetalik olup boyut olarak 2 ve 4' ten daha büyüktür ve içerisinde daha fazla alaşım elementi barındırmaktadır. Bu

durumda oluşan intermetalik sıvı fazdan katılma esnasında daha fazla alaşım elementi tüketmiştir. Oluşan bu intermetalikler ekseriyetle tane sınırlarında birikmiştir. Mg-Sb ve Mg-Al alaşımlarının ötektik noktalarının sırası ile  $629^{\circ}C$  ve  $437^{\circ}C$  derece olduğu göz önüne alınırsa ilk katılarak  $\alpha$ -Mg fazından sonra olan intermetaligin  $Mg_3Sb_2$  olması beklenmektedir. Bu durum ilk kristal çekirdeklerinin  $Mg_3Sb_2$  intermetaliginden olduğu, diğer intermetaliklerin ise bu çekirdekler etrafında oluştuğu anlamına gelmektedir. Çekirdeklenme noktalarının fazla olması alaşımın kaba dentritler şeklinde ve Çin yazısı formunda oluşmasını önlemiştir. Ayrıca ilave edilen Ce'de tane inceltici etkidir. Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımında Ce ilavesinin etkisi bariz bir şekilde artmıştır. Elips formundaki CeSb fazların sayısı artmıştır. Ayrıca daha önce verilen XRD grafiklerinin de bu durum piklerin şiddetinin bariz artması şeklindedir.



1	Ağ.%	At.%	2	Ağ.%	At.%	3	Ağ.%	At.%
Mg	87,584	94,770	Mg	82,107	92,97	Mg	98,578	99,389
Al	3,351	3,265	Al	3,751	3,825	Al	0,459	0,417
Sb	9,065	1,957	Sb	14,142	3,195	Sb	0,964	0,194
	100	100		100	100		100	100

**Şekil 6.** Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları (SEM-EDS point analysis results of Mg-4Sb-2Al alloy)

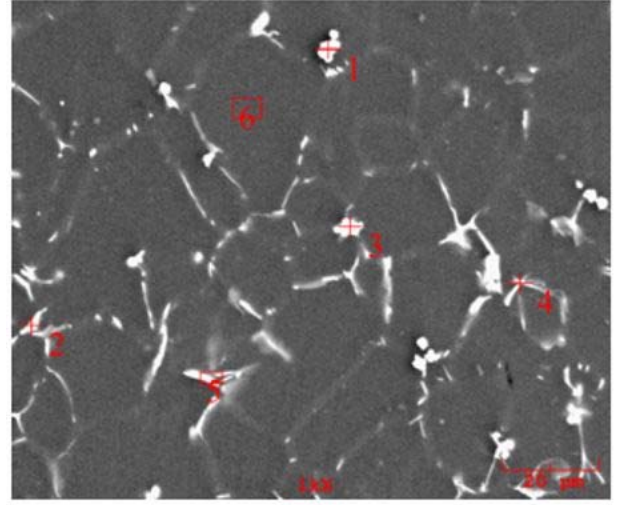


1	Ağ.%	At.%	2	Ağ.%	At.%	3	Ağ.%	At.%
Mg	82,272	92,87	Mg	87,933	93,54	Mg	82,05	93,66
Al	3,999	4,066	Al	5,256	5,035	Al	4,204	4,276
Sb	12,511	2,81	Sb	5,984	1,270	Sb	12,28	2,768
Ce	1,218	0,23	Ce	0,827	0,15	Ce	1,45	0,28
4	Ağ.%	At.%	5	Ağ.%	At.%	6	Ağ.%	At.%
Mg	88,84	94,351	Mg	98,7	99,48	Mg	98,045	99,257
Al	4,436	4,243	Al	0,388	0,352	Al	0,535	0,488
Sb	6,022	1,276	Sb	0,272	0,054	Sb	0,241	0,049
Ce	0,70	0,128	Ce	0,64	0,11	Ce	1,179	0,207

**Şekil 7.** Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımı SEM-EDS nokta analizleri (SEM-EDS point analysis of Mg-4Sb-2Al 0.5Ce)

Her iki analiz, oluşan bu CeSb fazına kuvvetli kanıtlar oluşturmaktadır. Ayrıca SEM görüntüsünden anlaşılacağı üzere elips formundan küresel forma bir geçiş gözlenmiştir. Bu durum matris içindeki küresel formdaki intermetaliklerin sünekliliği olumlu yönde etkilemektedir. Analiz 1, CeSb intermetalikliğini göstermektedir. Analiz 1 deki atomik yüzde verilerine Sb ve Ce'nin yaklaşık olarak birebir eşleşmesi

CeSb intermetalikliği ile örtüşmektedir. Ancak EDS analizlerinde CeSb fazları arasındaki atomik oran Analiz 6'da farklılık arz etmektedir. Burada fazla Ce'nin olduğu görülmektedir. Bu Ce'nin Mg ile intermetalik yapma eğilimi vardır. Yang ve arkadaşları [16] Mg-3Sn-1 Mn alaşımına ağ%0,87 Ce ilave etmiş ve SEM analizlerinde Mg<sub>12</sub>Ce intermetalikliğini tespit etmişlerdir. Yang'ın yaptığı çalışmadaki Mg<sub>12</sub>Ce faz yapısı bulduğumuz görüntüler ile benzerlik göstermektedir. Benzer şekilde yapığımız XRD çalışmalarında 2θ 28-32 arasında tespit edilen düşük şiddetli piklerin de Mg<sub>12</sub>Ce [8] intermetalikliğine ait olduğu düşünülmektedir [17, 18].



1	Ağ.%	At.%	2	Ağ.%	At.%	3	Ağ.%	At.%
Mg	40,180	77,236	Mg	78,182	92,14	Mg	24,287	62,57
Al	0,943	1,6326	Al	3,319	3,52	Al	0,612	1,42
Sb	29,913	11,475	Sb	17,902	4,21	Sb	36,357	18,69
Ce	28,964	9,6555	Ce	0597	0,12	Ce	38,745	17,31
4	Ağ.%	At.%	5	Ağ.%	At.%	6	Ağ.%	At.%
Mg	88,637	95,822	Mg	83,567	92,933	Mg	98,045	99,257
Al	2,299	2,238	Al	4,427	4,434	Al	0,535	0,488
Sb	8,512	1,836	Sb	10,910	2,421	Sb	0,241	0,049
Ce	0,552	0,103	Ce	1,096	0,211	Ce	1,179	0,207

**Şekil 8.** Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizleri,

(SEM-EDS point analysis of Mg-4Sb-2Al-1Ce alloy)

### 3.4. XRD analiz sonuçları (XRD analysis results)

Üretilen tüm döküm alaşımlarının dökülmüş halinin XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri sonuçlarına göre oluşan yeni fazlar aşağıda tartışılmıştır. Mg-4Sb-2Al alaşımı XRD analizinde, Mg element ve Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> fazları çözümlenmiştir ve ilgili pikler Şekil 9'da verilmiştir.

Bu fazlara ait kart numaraları sırası ile (01-089-7195> Mg – Magnesium), (01-071-0404> Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> - Magnesium antimonide) şeklindedir. Mg alaşımına ilave edilen Al'nin oda sıcaklığında çözünürlüğü ağ%2,1 iken ötektik sıcaklık olan 437°C'de ağ.%12,6'dır. Mg-Al alaşımının ötektik kompozisyonu olan ağ.%32,3 Al ise α-(Mg) ve intermetalik γ fazı olarak bilinen Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> den oluşmaktadır. Bu yüzden, primer α-(Mg) oluşturabilmek için birçok ticari Mg



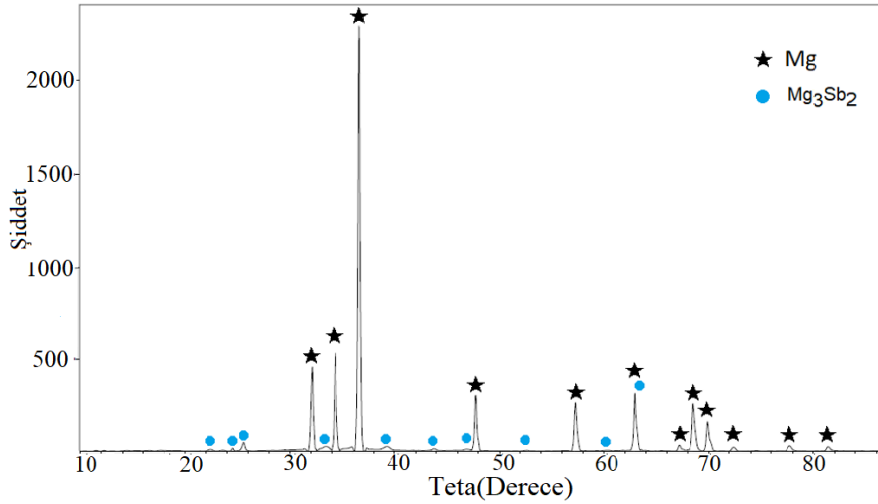
alaşımının Al içeriği maksimum katı çözünebilirlik sınırının altında tutulmaktadır [17, 19]. Mg alaşımlarının katılaşması sırasında ilave edilen %2 Al oranlarında dahi ötektik kompozisyon olabilmektedir. Bu oluşum denge dışı katılaşma şartlarında meydana gelmekte ve Scheil eşitliği [20] ile ispatlanmaktadır. Al alaşımının magnezyumun sünekliliğini artırdığı bilinmektedir. Ancak katı çözünebilirlik sınırlarının üzerinde ilave edilen Al, Mg' nin basınçlı dökümde dökülebilirlik özelliğini artırsa da, oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliklerinin keskin yapısı nedeni ile [1, 5] magnezyumun sünekliliğini azaltmaktadır, [7, 21]. Bu nedenle bu çalışmada seçilen %2'lik Al oranı çok kritik bir değer olarak tercih edilmiştir. %2 Al ilavesi oluşan  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliklerinin az miktarda ve homojen dağılması nedeni ile çekme deneyi esnasında bariz bir çentik etkisi yapmamıştır. Şekil 3'de verilen Mg-4Sb-2Al alaşımının XRD pikleri incelendiğinde  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının oluşmadığı tespit edilmiştir. Öte yandan ilave edilen ağırlık %4 Sb' nin katılaşma sırasında ayrılarak  $Mg_3Sb_2$  fazını oluşturduğu anlaşılmıştır. Mg-Sb faz diyagramı göz önüne alındığında Sb'nin Mg içerisinde katı çözünebilirliğinin olmadığı bilinmektedir. İlave edilen Sb'nin termodinamik olarak  $Mg_3Sb_2$  fazını oluşturma

eğilimi vardır. Nitekim üretilen %4 Sb ilaveli alaşımda Mg metali tercihli olarak Sb ile intermetalik faz yapmıştır [22].

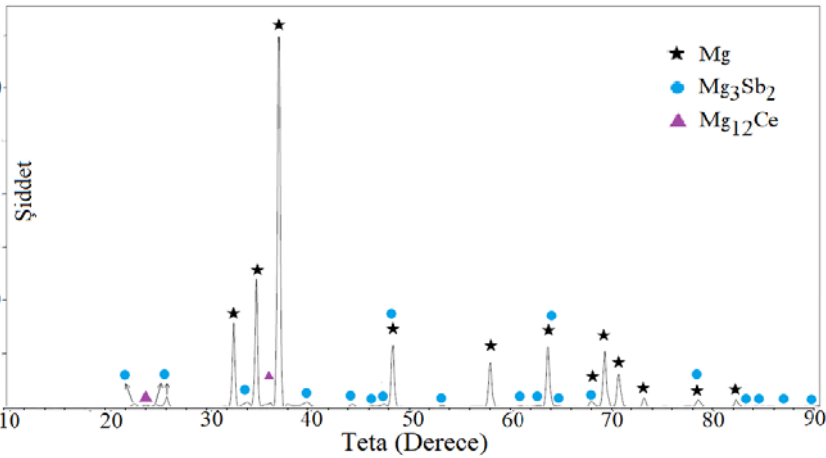
Şekil 10'da Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımının XRD analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre  $Mg_3Sb_2$ ,  $Mg_{12}Ce$  ve Mg fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Şekil 11'de Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımının XRD analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre  $Mg_3Sb_2$ ,  $Mg_{12}Ce$ , CeSb ve Mg fazlarının varlığı tespit edilmiştir. İlave edilen Ce oranının artmasına bağlı olarak yeni bir faz olan CeSb fazının varlığı tespit edilmiştir.

Şekil 12'de Mg-4Sb-2Al-2 Ce alaşımına ait XRD grafiğinde CeSb fazı aynı  $2\theta$  açı değerlerinde ve daha yüksek şiddetlerde tespit edilmiştir. Pikler uzama göstermiş, şiddetleri artmış ve gürültüler daha da azalmıştır. Bu durum artan Ce miktarı ile CeSb fazının daha yüksek miktarda oluştuğunun göstergesidir. CeSb fazına ilaveten  $Mg_{12}Ce$  fazının [23] da varlığı tespit edilmiştir.

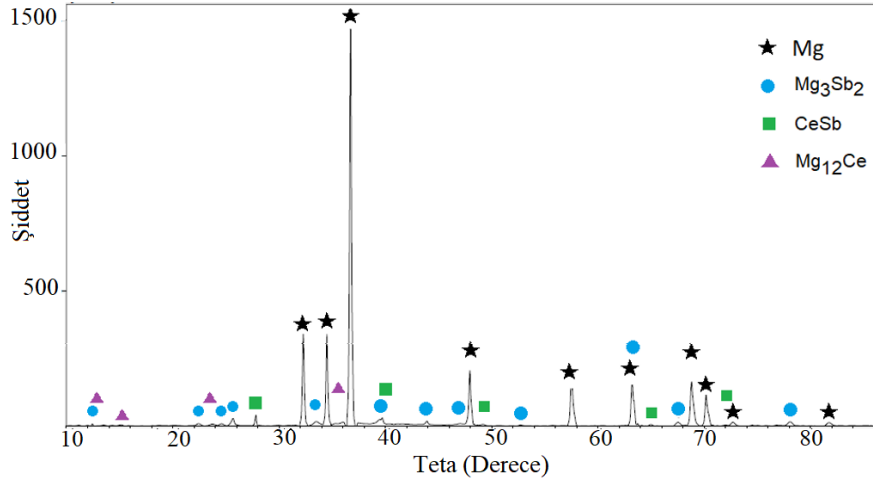
Mg-4Sb-2Al (DKS) Alaşımına ait XRD grafiği Şekil 13'de verilmiştir. Bu alaşım Ce içermemektedir. Şekil 9 ile tek



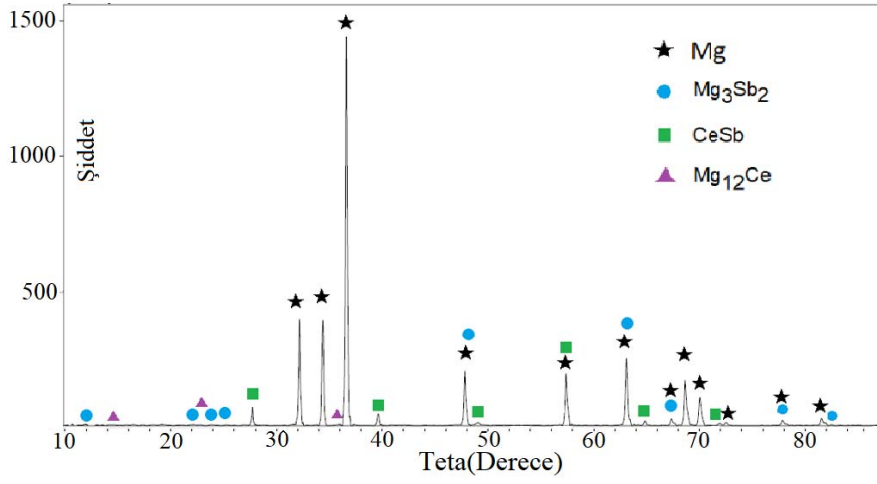
Şekil 9. Mg-4Sb-2Al alaşımına ait XRD grafiği (XRD graph of Mg-4Sb-2Al)



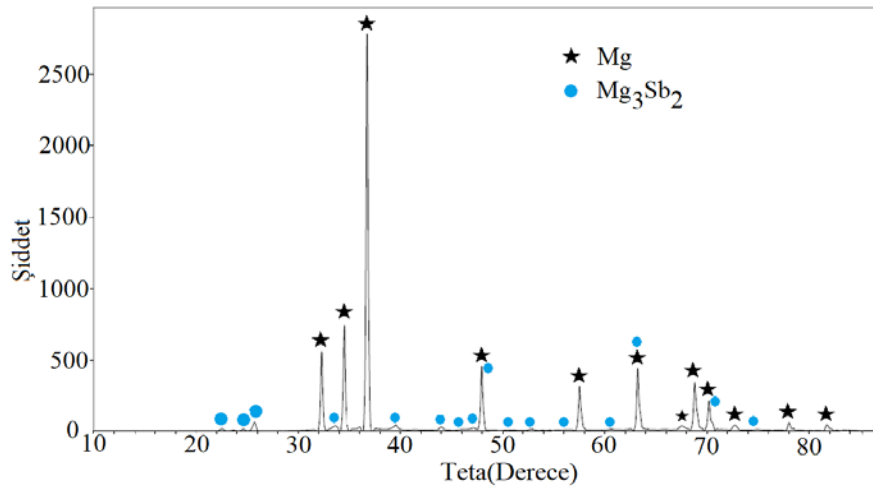
Şekil 10. Mg-4Sb-2Al-0,5Ce alaşımına ait XRD grafiği (XRD graph of Mg-4Sb-2Al0.5Ce)



Şekil 11. Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait XRD grafiği ((XRD graph of Mg-4Sb-2Al-1Ce))



Şekil 12. Mg-4Sb-2Al-2 Ce alaşımına ait XRD grafiği ((XRD graph of Mg-4Sb-2Al-2Ce))



Şekil 13. Mg-4Sb-2Al (DKS) alaşımına ait XRD grafiği (XRD graph of DKS Mg-4Sb-2Al)

farkı daha düşük sıcaklıklara ısıtılan bir kalıba dökülmesidir. Bu alaşıma ait XRD grafiklerinde de  $\alpha$ -Mg ve  $Mg_3Sb_2$  fazına

rastlanmıştır[24]. Faz analizi bakımından ciddi bir fark tespit edilmemiştir.

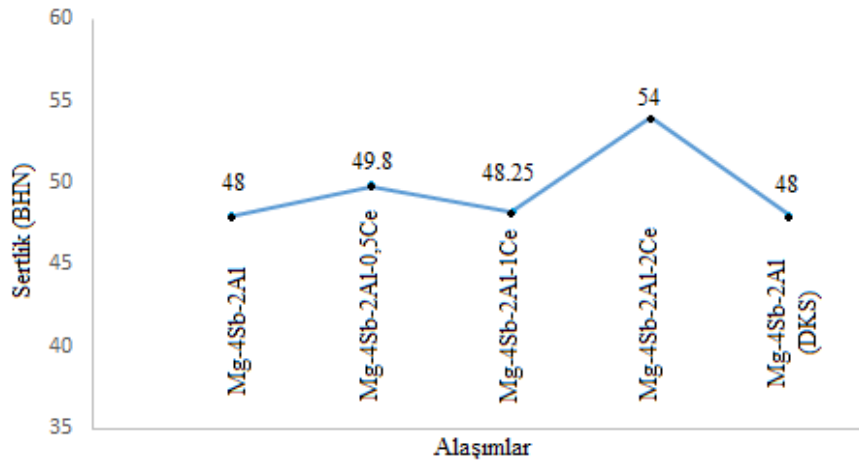
### 3.5. Sertlik Deney Sonuçları (Hardness Test Results)

Uygulanan sertlik deneyleri neticesinde ilave edilen Ce oranına bağlı olarak sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum tane sınırlarındaki intermetaliklerin deformasyona karşı gösterdiği dirençten ve ilave edilen alaşım elementinin tane inceltici görev yapmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 14). Sertlik 48 BHN'den 54 BHN'ye yükseltilmiştir. Ce ilavesi ile sertlik değerlerindeki artış lineer olmayan bir şekilde artmıştır. Buradaki farklılık dökümlü üretilen birçok alaşımda kabul edilen sapmalar olarak değerlendirilebilir. Ayrıca dördü çukme numunesinde orta kısma yerleştirilen kare kesitli numunenin basınçlı döküm sırasında gaz boşluklarının ilerlemesinin çukme numunesine göre daha yüksek olması mümkündür, yani bir nevi gaz cebi olarak görev yapabilmektedir. Sertlik deneyleri bu kare kesitli numuneye uygulanmış sertlik değer sonuçları Şekil 14'de verilmiştir. Ancak %0,5 ve daha değerlerde Ce ilavesi ile alt tane oluşumu teorisi literatürde mevcuttur. Oluşan alt taneler mekanik dayanımı, tane sınırı dayanım artırma mekanizması prensibine göre artırmaktadır [25]. Ancak ilave edilen daha fazla Ce oranlarında alt tane büyüklüğü limit değerlere ulaşmakta ve alt taneden ziyade mikroyapıdaki genel tane boyutu ortalamasına denk gelmektedir. İlave edilen Ce miktarının %1 ve daha fazlasında ise Ce ile Mg, Sb, Al nin oluşturduğu intermetalik yapılar önem kazanmakta ve yapılar nihai sertlik artışlarının nedeni olarak gösterilmektedir. Elips formunda oluşan CeSb intermetalikleri ve Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> intermetalikleri (çubuk ve plaka formunda) sertlik artışında önemli derecede etkili olmuştur ve bu fazlar elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde tespit edilmiştir. %1 Ce ilave edilen alaşımın sertlik değerinde Mg-4Sb-2Al ye göre artış görülmesine rağmen %0,5Ce ilave edilen numuneye göre düşüş göstermiştir. Ancak çukme testi numunelerinden alınan sertlik değerlerinde %1Ce ilave edilen numunenin sertlik değerinin ortalama 51,4 BHN olduğu tespit edilmiştir. Özetle artan seryum oranına bağlı olarak çukme test numunelerinden alınan sertlik değerlerinin sürekli artış gösterdiği anlaşılmıştır.

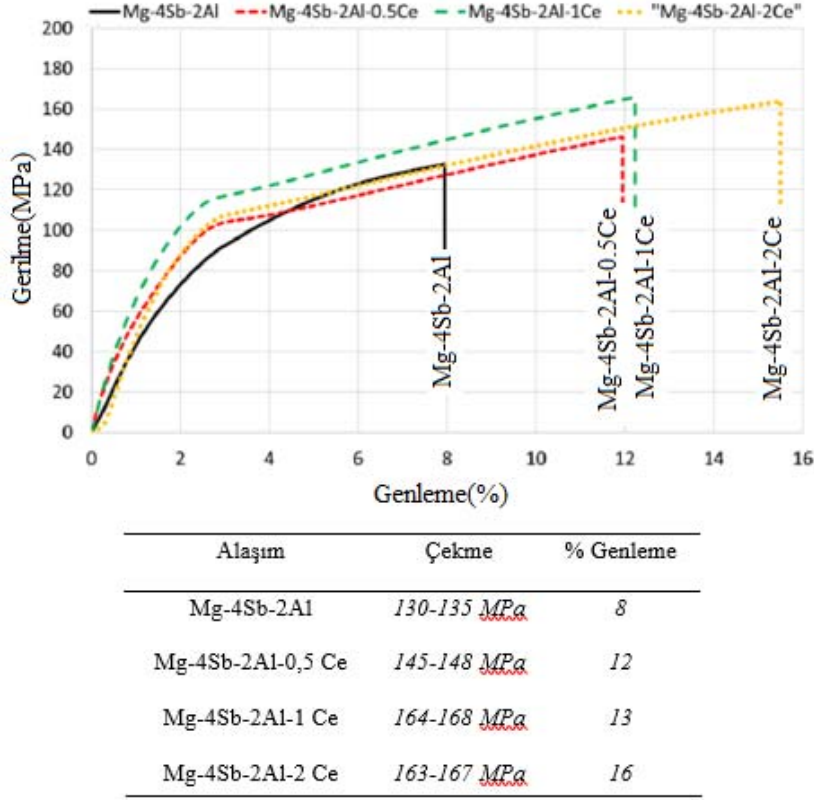
### 3.6. Çukme Deneyi Sonuçları (Tensile Test Results)

Yapılan çukme testleri sonucunda ilave edilen Ce ile alaşımın çukme mukavemeti ve sünekliliği artış göstermiştir. İlgili çukme deney grafikleri ve genleme miktarları Şekil 15'de verilmektedir. Ce ilave edilen alaşımdaki çukme dayanımın artması tane inceltici görev yapması ve Hall-Patch bağıntısı [26] gereğince izah edilmektedir. Ayrıca dendrit kolları arası mesafenin de küçülmesi bir diğer etken olup, oluşan CeSb yapısının ekseri elips formunda olması da uzamanın yüksek değerlere çıkmasına neden olmuştur. İkinci faz partiküllerinin tane sınırlarında düzenli bir şekilde dağılması veya dizilmesi ile tane sınırlarında engel görevi görerek dislokasyon hareketini güçleştirdiği böylece mekanik özellikleri artırdığı iyi bilinmektedir [15]. Aynı zamanda oluşan Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub> fazı da tane inceltici olarak davranmış ve yine tane sınırlarında kararlı bir intermetalik faz olarak birikim yapmıştır. Ayrıca Mg<sub>12</sub>Ce fazının da artan Ce oranlarında olduğu bu fazında dislokasyonların özellikle tane sınırlarında hareketine engel teşkil ettiği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, Ce ilavesi ile tane boyutunun küçülmesi ve ikincil dendrit kol aralıklarının kısılması ve intermetalik fazların dendrit boşluklarında birikerek çentik etkisini azaltması, gibi mukavemet artırma mekanizmalarının çalışması ile çukme dayanımının süneklilikten taviz vermeden yükseldiği anlaşılmıştır.

Bilindiği üzere tane sınırlarında biriken ikincil fazlar ve intermetalikler dislokasyon hareketini sınırlamakta ve dislokasyonun ilerlemesi için engel teşkil etmektedir. Bu nedenle de tane sınırlarında biriken intermetalikler, mukavemeti artırmaktadır. SEM analizleri ile şekil ve elementel yüzdeleri verilen nadir element esaslı intermetalik fazların ara yüzeyde uyumlu bir yapı teşkil etmesi ve ekseri olarak keskin köşelere sahip olmaması artan Ce ile sünekliliğin ve mukavemetin birlikte artmasına neden olmuştur. Ayrıca tane içinde çözünen Ce da katı çözelti sertleşmesi mekanizması gereği olağan bir mukavemet artışına neden olabilmektedir.



Şekil 14. Döküm ürünün kare kesitli darbe numunesi kısmından ölçülen sertlik değerleri, (Hardness values measured from the square-section impact sample part of the cast product)



Şekil 15. Gerilme ve genleme grafiği ve tablosu (Stress and strain graph, and table)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Üretilen ana alaşıım olan Mg-4Sb-2Al'nin içinde Sb'nin çözünürlüğünün olmamasına bağlı olarak ötektik ayrışma ile Sb, tane sınırlarına sürüklenmiş ve tane sınırlarında  $Mg_3Sb_2$  formunda intermetalik fazlar oluşturmuştur. Bu fazın varlığı SEM ve XRD teknikleri ile ispatlanmıştır. Bu ana alaşıımın çekme testleri sonucunda %8 uzama gösterdiği ve 130 MPa çekme mukavemeti değerine sahip olduğu ölçülmüştür. Ana alaşıım olan Mg-4Sb-2Al alaşıımına ilave edilen Seryum'un tane inceltici etkisinin olduğu anlaşılmıştır.

Mg-4Sb-Al alaşıımına sırası ile %0,5, %1 ve %2 oranlarında Ce ilave edilmiştir. İlave edilen Ce, ana alaşıımın tane yapısını inceltmiş ve daha küçük taneli bir yapı oluşumuna katkıda bulunmuştur. Artan Ce oranına bağlı olarak,  $Mg_2Sb_2$  nin yanı sıra CeSb ve  $Mg_{12}Ce$  intermetaliklerinin varlığı SEM ve XRD ile tespit edilmiştir.

Sırası ile %0,5 Ce ilave edilen alaşıımın çekme mukavemeti 145-148 MPa arasında ve uzaması ise %12 olarak elde edilmiştir. %1 Ce ilaveli alaşıımda çekme mukavemeti 164-168 MPa arasında uzama değeri ise %13 olarak bulunmuştur. İlave edilen %2 Ce miktarında ise üretilen alaşıımın çekme değeri 163-167 MPa arasındaki değerlerde ölçülmüş toplam uzama yüzdesi ise %16 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek değerler %2 Ce ilavesi ile elde edilmiş, ancak temel uzama kriterlerinin %12 olması

durumunda ise %1 Ce ilaveli alaşıımın mühendislik anlamda daha verimli olacağı kanaatine varılmıştır.

İlave edilen Ce miktarına göre ana alaşıımın sertlik değeri artış göstermiştir, bu değerler Mg-4Sb-2Al, Mg-4Sb-2Al-%0,5Ce, Mg-4Sb-2Al-%1Ce ve Mg-4Sb-2Al-%2 Ce için sırası ile 48- 49,8-48,25 ve 54 BHN şeklindedir. Bu sonuçlara göre en yüksek sertlik değeri %2 Ce ilavesi ile elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makale Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (CÜBAP) M-712 Kodlu Proje ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Avedesian, M., and Baker, H., ASM International Handbook Committee, ASM Specialty Handbook., Magnesium and Magnesium Alloys, ISBN: 978-0-87170-657-7 s. 350, 1999.
2. Joost W. J. and Krajewski, P.E., Towards magnesium alloys for high-volume automotive applications, Scripta Materialia, 128, 107-112, 2017.
3. [https://www.intlmag.org/page/app\\_automotive\\_ima](https://www.intlmag.org/page/app_automotive_ima) (International Magnesium Association). Erişim tarihi Mar. 23, 2021.

4. Pan F., Yang M., and Chen X., A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys, *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 1211-1221, Ara. 2016.
5. Friedrich H. E. and Mordike B. L., *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1, 677, 2006.
6. ASM International Handbook Committee, USA, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM Handbook, 2, 1328, 1996.
7. Sankaran K. K. and Mishra R. S., *Magnesium Alloys, Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures*, Elsevier, (Chapter 7), 345-383, 2017.
8. Polmear I., StJohn D., Nie J.-F., and Qian M., *Magnesium Alloys-Light Alloys (Fifth Edition)*, Boston: Butterworth-Heinemann, 287-367, 2017.
9. Hamdy Makhlof A. S., Chapter 15 - Intelligent Stannate-Based Coatings of Self-Healing Functionality for Magnesium Alloys, *Intelligent Coatings for Corrosion Control*, 537-555, 2015.
10. Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications, NAP.edu. doi: 10.17226/13157, National Research Council. 2011.
11. *International Journal of Automotive Technology and Management (IJATM)* Inderscience Publishers - linking academia, business and industry through research". <https://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijatm&csid=4f0403jupauj0vm4r4aelsqr24> (erişim Mar. 23, 2021).
12. Rajeshkumar R., Jayaraj J., Srinivasan A., Pillai U.T.S., Investigation on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Sb and Mg-Sb-Si alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 81-88, 2017.
13. Nayyeri G., Mahmudi R., Effects of Sb Additions On The Microstructure And Impression Creep Behavior Of A Cast Mg-5sn Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (3), 669-678, 2010.
14. Tekumalla S., Seetharaman S., Almajid A., Gupta M., Mechanical Properties of Magnesium-Rare Earth Alloy Systems: A Review, *Metals*, 5 (1), 1-39, 2015.
15. Yang M., Zhang J., Guo T., Effects of Ca addition on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn (wt.%) magnesium alloy, *Materials & Design*, 52, 274-283, 2013.
16. Yang M., Qin C., Pan F., Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-3Sn-1Mn magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (10), 2168-2174, 2011.
17. Khan M.N., Solidification study of commercial magnesium alloy, Master Tezi, Concordia University, Montreal, [http://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/d/d1/Nazhmul's\\_thesis.pdf](http://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/d/d1/Nazhmul's_thesis.pdf) s. 105. October 2009.
18. Lu X., Zhao G., Zhou J., Zhang C., Yu J., Microstructure and Mechanical Properties of the As-Cast and As-Homogenized Mg-Zn-Sn-Mn-Ca Alloy Fabricated by Semicontinuous Casting, *Materials (Basel)*, 11 (5), 703, 2018.
19. Vinarçık E.J., *High Integrity Die Casting Processes*, Wiley, ISBN 0-471-20131-6, 2002.
20. Basak C.B., Krishnan M., Applicability of Scheil-Gulliver solidification model in real alloy: a case study with Cu-9wt%Ni-6wt%Sn alloy, *Philosophical Magazine Letters*, 95 (7), 376-383, 2015.
21. Dini H., Andersson N.E., Jarfors A.E.W., Effect of Mg17Al12 Fraction on Mechanical Properties of Mg-9%Al-1%Zn Cast Alloy, *Metals*, 6, 10, 2016.
22. Okamoto H., Mg-Sb (Magnesium-Antimony), *J. Phase Equilib. Diffus.*, 31 (6), 574-574, 2010.
23. Miller A., I. The crystal structure of the intermetallic compound Mg12Ce. II. Reaction products of gamma-picoline and iodine, California Institute of Technology, doi: 10.7907/B4C7-XS45, 1957, 2019.
24. Li B., Long W., Zhou X., The effect of Ti on the microstructure and mechanical properties of (Ti+Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>)/Mg composites, *Advanced Composites Letters*, 29, 1-8, 2020.
25. Hu G., Zhu C., Xu D., Dong P., Chen K., Effect of cerium on microstructure, mechanical properties and corrosion properties of Al-Zn-Mg alloy, *Journal of Rare Earths*, 39 (2), 208-216, 2021.
26. Yu H., Xin Y., Wang M., Liu Q., Hall-Petch relationship in Mg alloys: A review, *Journal of Materials Science & Technology*, 34 (2), 248-256, 2018.

