



**T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Mg-4Sb-2Al
ALAŞIMINA Ce (SERİYUM) İLAVESİNİN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Kübra İNCE
(20169210005)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. L. Cenk KUMRUOĞLU

SİVAS

MAYIS 2019

Kübra İNCE' nin hazırladığı ve “BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Mg-4Sb-2Al ALAŞIMINA Ce (SERYUM) İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı Doç. Dr. L. Cenk KUMRUOĞLU
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi Doç. Dr. Hüseyin ŞEVİK
Mersin Üniversitesi

Jüri Üyesi Doç. Dr. Ali ÖZER
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından M-71 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Kübra İNCE, 2019

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

17/05/2019

Kübra İNCE

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamda, her türlü olanağı sağlayarak beni her zaman destekleyen, değerli bilgilerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam, Sayın Doç. Dr. Levent Cenk KUMRUOĞLU' na teşekkürlerimi sunuyorum.

Döküm, çekme ve sertlik deneylerinin yapılmasında desteğinden dolayı Mersin Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Sayın Doç. Dr. Hüseyin ŞEVİK' e;

Ayrıca bu çalışmamda mikroyapı analizlerinin incelenmesindeki yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Ali ÖZER'e ve CÜTAM'a;

Son olarak tezi hazırlama sürecimde her zaman yanımda olan maddi ve manevi her türlü destek sağlayan aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MG-4SB-2AL ALAŞIMINA CE (SERYUM) İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kübra İNCE

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. L. Cenk KUMRUOĞLU

2019, 70+xvi sayfa

Bu tez çalışmasında Mg-4Sb-2Al alaşımına, ağırlıkça % 0.5, 1, 2 oranlarında Ce (seryum) elementi ilavesinin etkisi incelenmiştir. Döküm prosesi olarak yüksek basınçlı kokil kalıba döküm yöntemi kullanılmıştır. Üretilmesi planlanan ürünler direkt olarak çekme ve darbe numunesi şeklinde üretilmiştir ve yarı endüstriyel pilot ölçekli numuneleri temsil etmektedir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için çekme ve sertlik deneyleri; metalurjik ilişkiyi tespit etmek için ise metalografik inceleme, elektron mikroskobu ve XRD incelemeleri yapılmıştır. İlave edilen Ce oranına bağlı olarak mekanik özellikler artmıştır. Tane sınırlarında ise CeSb, Mg₁₂Ce ve Mg₃Sb₂ intermetalikleri bulunmuştur. Tane sınırlarında çubuksal bir şekilde birikim gösteren bu yapılar, tane sınırında dislokasyon hareketini engellemek ve ince taneli bir yapı oluşturmak sureti ile çekme gerilim değerlerini artırmıştır. Ce ilave edilen alaşımın çekme mukavemeti 145-148 MPa arasında ve uzaması ise %12 olarak elde edilmiştir. %1 Ce ilaveli alaşımında çekme mukavemeti 164-168 MPa arasında uzama değeri ise %13 olarak bulunmuştur. İlave edilen %2 Ce miktarında ise üretilen alaşımın 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 alaşımın mühendislik anlamda daha verimli olacağı kanaatine

varılmıştır. İlave edilen Ce miktarına göre ana alaşımın 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 BHN, 49,8 BHN, 48,25 BHN, 54 BHN şeklindedir. Ana alaşım olan Mg-4Sb-2Al alaşımında ilave edilen Sb, ve bu alaşıma ilave edilen Ce' nin tane inceltici etkisinin olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüksek Basınçlı Döküm, Mg-4Sb-2Al, Magnezyum Alaşımları, Seryum



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Mg-4Sb-2Al ALLOY Ce (CERIUM) PRODUCED BY HIGH PRESSURE CASTING METHOD.

Kübra İNCE

Master of Science Thesis,

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Associate Prof. Dr. L. Cenk KUMRUOĞLU

2019, 70+xvi pages

In this thesis, the effect of addition of Ce (cerium) element (%wt. 0.5, 1, 2) on Mg-4Sb-2Al alloy was examined. As a casting process, high pressure die casting method was used. The specimens were produced directly as tensile and impact samples and represent semi-industrial pilot sized samples. In order to determine the mechanical properties of the produced samples, tensile tests, hardness tests, metallographic examination, electron microscopy and XRD studies were carried out to determine the metallurgical relationship. Depending on the added Ce ratio, the mechanical properties increased. CeSb, Mg₁₂Ce and Mg₃Sb₂ intermetallics were found in the grain boundaries. These structures, which accumulate in a rod-like manner at the boundaries of the grain, increased the tensile stress values by preventing dislocation in the grain boundary and forming a fine-grained structure. The tensile strength of the cerium added alloy was 145-148 MPa and the elongation was 12%. The tensile strength in the 1% Ce addition alloy was found to be between 13% and 164-168 MPa. In the amount of 2% Ce, the average alloy has a tensile value of 163-167 MPa and the total elongation percentage is 16%. According to these results, the highest values were obtained with the addition of 2% Ce, but if the basic elongation criteria were 12%, it was concluded that the engineering design of the alloy with 1% Ce addition would be more efficient. The hardness value of the main alloy was increased according to the amount of Cerium

added, these values were Mg-4Sb-2Al, Mg-4Sb-2Al-0.5Ce, Mg-4Sb-2Al-1Ce and Mg-4Sb-2Al- 2Ce 48 BHN, 49.8 BHN, 48.25 BHN, 54 BHN respectively. Antimony in Mg-4Sb-2Al base alloy and Cerium added to this alloy have a grain refining effect.

Keyword: High pressure die casting, Mg-4Sb-2Al, Magnesium alloys, Cerium



İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-------------|
| KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR | vi |
| ÖZET..... | vii |
| ABSTRACT | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xiii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiv |
| SİMGELER DİZİNİ | xv |
| KISALTMALAR DİZİNİ | xvi |
| | |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER..... | 5 |
| 2.1 Magnezyumun Genel Özellikleri | 5 |
| 2.1.1 Magnezyumun terimsel, mekanik ve fiziksel özellikleri | 6 |
| 2.2 Magnezyum Alaşımları | 7 |
| 2.3 Başlıca Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkisi | 8 |
| 2.3.1 Alüminyum (Aluminium) | 8 |
| 2.3.2 Kalsiyum (Calcium)..... | 10 |
| 2.3.3 Lityum (Lithium) | 10 |
| 2.3.4 Mangan (Manganese) | 10 |
| 2.3.5 Nadir Topraklar (Rare Earths) | 10 |
| 2.3.6 Silisyum (Silicon) | 10 |
| 2.3.7 Gümüş (Silver)..... | 11 |
| 2.3.8 Toryum (Thorium)..... | 11 |
| 2.3.9 İttriyum (Yttrium) | 11 |
| 2.3.10 Çinko (Zinc)..... | 11 |
| 2.3.11 Zirkonyum (Zirconium)..... | 11 |
| 2.3.12 Berilyum (Beryllium) | 11 |
| 2.3.13 Bakır (Copper) | 12 |
| 2.3.14 Demir (Iron)..... | 12 |
| 2.3.15 Nikel (Nickel) | 12 |
| 2.3.16 Kalay (Tin)..... | 12 |
| 2.3.17 Antimon (Antimony, Sb) | 12 |
| 2.4 Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımları | 13 |
| 2.5 Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri | 15 |
| 2.5.1. Basınçlı döküm | 17 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.1.1 Basınçlı dökümün avantajları..... | 20 |
| 2.5.1.2 Basınçlı dökümün sınırlamaları | 20 |
| 2.6 Basınçlı Döküm Yöntemleri..... | 21 |
| 2.6.1 Püskürtme döküm | 21 |
| 2.6.2 Pres döküm | 22 |
| 2.7 Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümü | 22 |
| 2.7.1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesi | 23 |
| 2.7.2 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesi..... | 26 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 28 |
| 3.1 Giriş | 28 |
| 3.2 Deney Cihaz ve Malzemeleri | 30 |
| 3.3 Mikroyapı İncelemeleri | 32 |
| 3.4 Mekanik Deneyler | 32 |
| 3.4.1 Sertlik deneyi | 32 |
| 3.4.2 Çekme deneyi | 33 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA..... | 34 |
| 4.1 XRD analiz sonuçları | 34 |
| 4.2 SEM-MAP Analiz Sonuçları..... | 38 |
| 4.3 SEM-EDS analiz sonuçları..... | 44 |
| 4.4 Optik ve SEM Mikroskop ve Tane Boyut İncelemeleri..... | 54 |
| 4.5 Sertlik Deney Sonuçları..... | 60 |
| 4.6 Çekme Deneyi Sonuçları..... | 62 |
| 5. SONUÇLAR | 65 |
| 5.1 Öneriler..... | 67 |
| KAYNAKLAR | 68 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 70 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı. | 9 |
| Şekil 2.2 Basınçlı döküm magnezyum parçaların 2004 sonu ABD'deki pazar payları | 23 |
| Şekil 2.3 Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası | 24 |
| Şekil 2.4 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası | 25 |
| Şekil 2.5 Sıkıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi | 25 |
| Şekil 2.6 Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası | 26 |
| Şekil 3.1 15kW kapasiteli indüksiyon ergitme ocağı | 30 |
| Şekil 3.2 100 ton kapasiteli soğuk kamaralı döküm cihazı..... | 31 |
| Şekil 3.3 Çekme numuneleri ve metalografik inceleme için 1 adet kare kesitli çubuk | 31 |
| Şekil 3.4 Brooks marka sertlik cihazı | 32 |
| Şekil 3.5 RAAGEN Çekme Cihazı..... | 33 |
| Şekil 4.1 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait XRD grafiği | 34 |
| Şekil 4.2 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait XRD grafiği..... | 35 |
| Şekil 4.3 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait XRD grafiği..... | 36 |
| Şekil 4.4 Mg-4Sb-2Al-2 Ce alaşımına ait XRD grafiği..... | 37 |
| Şekil 4.5 Mg-4Sb-2Al (DKS) alaşımına ait XRD grafiği..... | 38 |
| Şekil 4.6 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları | 39 |
| Şekil 4.7 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları..... | 40 |
| Şekil 4.8 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları..... | 42 |
| Şekil 4.9 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları..... | 43 |
| Şekil 4.10 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları | 45 |
| Şekil 4.11 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları | 46 |
| Şekil 4.12 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları | 49 |
| Şekil 4.13 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları | 50 |
| Şekil 4.14 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları (3kX büyütme) | 52 |
| Şekil 4.15 Optik mikroskop görüntüleri | 54 |
| Şekil 4.16 SEM görüntüleri | 56 |
| Şekil 4.17 SEM görüntüleri (1000X büyütme)..... | 57 |
| Şekil 4.18 SEM-BSE görüntüleri..... | 58 |
| Şekil 4.19 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımı, CeSb yoğun bölgelerin SEM-BSE görüntüsü | 59 |
| Şekil 4.20 Döküm ürünün yolluk kısmından alınan sertlik değerleri | 60 |
| Şekil 4.21 Döküm ürünün kare kesitli darbe numunesi kısmından alınan sertlik değerleri..... | 62 |
| Şekil 4.22 Çekme deneyi sonrasında ölçülen %uzama miktarları..... | 63 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1 Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı | 5 |
| Çizelge 2.2 Magnezyumun alaşımlandırılmasında kullanılan elementler ve simgeleri | 6 |
| Çizelge 2.3 Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları..... | 8 |
| Çizelge 2.4 Basınçlı döküm Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri | 13 |
| Çizelge 2.5 Basınçlı döküm alaşımlarının genel özellikleri | 15 |
| Çizelge 2.6 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi | 17 |
| Çizelge 3.1 Alaşımlara ait ağırlıkça yüzde kompozisyonları | 29 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|---------------------------------|--------------------|
| cm³/mol | Santimetre küp/mol |
| nm | Nanometre |
| °C | Santigrat Derece |
| α | Alfa |
| μm | Mikrometre |
| γ | Gama |



KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| HSP | : Hegzagonal sıkı paket kafes sistemi |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu |
| XRD | : X Işımları Difraksiyometresi |
| EDS | : Elektron Saçılım Spektroskopisi |
| ASTM | : Amerikan Standartları |
| HB | : Brinell Sertlik Birimi |
| DKS | : Düşük Kalıp Sıcaklığı |
| BHN | : Brinell Sertlik Numarası |
| BSE | : Backscattered Electrons |



1.GİRİŞ

Magnezyum, işlenebilen yer kabuğunda en çok bulunan sekizinci elementtir ayrıca bulunma yüzdesi alüminyum ve demirden sonra gelmektedir. Metallerin bulunma yüzdesi genel olarak imalat sektörü gibi masif oranda malzeme kullanılan alanlarda ön plana çıkmaktadır. Göller ve okyanuslar değerlendirmeye alınacak olursa; magnezyumun elde edilme potansiyeli diğer metallere oranla büyük bir fark yaratmaktadır ve tabiatta en fazla bulunan metal haline gelmektedir.

Metalik esaslı imalata uygun metaller arasında bir değerlendirme yapılacak olursa hafiflik bazında en ön plana çıkan metalin magnezyum (Mg) olduğu bilinmektedir. Mg ve alaşımları bazı plastik gurupları kadar hafif ve metalik özellikteki malzemeler kadar da dayanıklıdır. Magnezyumun, çelik ve çinkodan 3/4, alüminyumdan ise $\approx 1/3$ daha hafif olması, birçok imalat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. Magnezyumun $1,74 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluğu ve $\approx 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ' olan ergime sıcaklığı, çelik ve alüminyum gibi diğer konstrüksiyon metallerine göre, dökümde ve talaşlı imalata uygun olması, diğer metallere oranla önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir. Magnezyum metali, alüminyumdan daha hızlı dökülebilmekte ve mekanik olarak işlenebilmektedir [1].

Magnezyum alaşımları, $160\text{-}300 \text{ N/mm}^2$ çekme dayanımı, $80\text{-}190 \text{ N/mm}^2$ (%0,2) akma dayanımı ve % 2-15 kopma uzamasına sahip alaşımlardır. Geleneksel magnezyum alaşımları, 1900'lü yılların ilk çeyreğinde geliştirilmeye başlanmış ve 1930'lu yılların sonunda bir zirveye ulaşmıştır. İkinci pik ise 1950'lerde görülmektedir. Günümüzde, plastiklerin ve diğer imalat metallerinin yerine magnezyum alaşımlarının kullanılması, bu malzemeyi yeniden popüler hale getirmiştir [2].

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği ve spesifik dayanımı dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak magnezyumun, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır. Çin ve Avustralya'nın üretime girmesi ile fiyatlar

ekonomik seviyeler düşmüş ve neticesinde, magnezyum endüstriyel bir malzeme olarak kabul görmüştür [3].

Magnezyum doğada metal formunda bulunmamaktadır. Doğal metal formuna dönüştürmek için, ham maddeler (magnezit, dolomit, bisofit, karnelit, serpantin ve deniz suyu) kimyasal işlemlere tabi tutulur. Bu şekilde üretilen magnezyum genellikle birincil magnezyum olarak adlandırılır. Magnezyum metali ayrıca hurda malzemelerden geri dönüşüm yöntemiyle de elde edilir. Bu şekilde üretilen magnezyuma ise ikincil magnezyum adı verilir.

Magnezyumun basınçlı dökümü, magnezyum endüstrisi içinde, en hızlı büyüyen ve global ölçekte en çok gelişen segment olmuştur. Bu gelişim, çevre dostu arabalara olan talebin artması sonucu ortaya çıkmıştır. Dünya genelindeki dökümcüler, otomobil endüstrisinin taleplerini karşılamakta sıkıntı yaşamamışlardır. Ayrıca basınçlı döküm makine imalatçıları da, daha büyük ve karmaşık makinalar üreterek sektörün gelişimine katkıda bulunmuşlardır. Sıcak hazneli döküm makinaları ile makina üreticileri, magnezyum dökümü için yeni ve hızlı bir proses yaratmışlardır. 1985 yılında basınçlı döküm sektörünün magnezyum ihtiyacı yıllık 30.000 ton iken, 1997 yılında 95.000 ton ve 1999 yılında 145.000 tona yükselmiş ve yıllık artış ortalama %12 civarında olmuştur. 2006 sonu itibariyle ise bu ihtiyaç yıllık 375.000 ton ile zirveye ulaşmıştır [4].

Magnezyumun basınçlı dökümü için, ticari olarak kullanılan dört adet magnezyum alaşım sistemi vardır. Bunlar magnezyum-alüminyum-çinko-mangan (AZ) serisi, magnezyum- alüminyum-mangan (AM) serisi, magnezyum-alüminyum-silisyum-mangan (AS) serisi ve yeni geliştirilen magnezyum-alüminyum-nadir toprak-mangan (AE) serisidir [5].

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunmaktadır. Magnezyumun basınçlı döküm yöntemiyle üretiminde, alüminyum ve çinkoya kıyasla, aynı ağırlıktaki hammadde ile daha fazla ürün elde edilmektedir. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli imalatlar için ideal bir yöntemdir. 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 [6].

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm ile imalatı; elektronik parçalardan kamyonların şanzıman kutularına kadar çok geniş bir üretim segmentinde kendini kanıtlamış bir yöntemdir. Basınçlı döküm, yüksek üretim hacimlerinde, aynı tip parçaların imalatında kullanılan, kendini tekrarlama esasına dayanan bir yöntemdir. Proses, ergimiş metalin yüksek basınç altında çelik bir kalıba enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Basınçlı döküm, ergimiş magnezyumu tam ölçüde ve sorunsuz bir şekilde, mümkün olan en kısa çevrim süresinde, istenilen forma dönüştürme konusunda benzersiz bir yeteneğe sahiptir. Basınçlı döküm ile üretilen parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine benzer bir şekilde, genellikle herhangi bir talaşlı işleme gerek duyulmadan, son şeklinde üretilmektedir [7].

Magnezyum alaşımlarından dökülen parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine kıyasla daha yoğun yapılı ve boyutsal olarak daha kararlıdır. Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak ve uzay sanayi, spor ekipmanları, elektronik parça sektörü, bilgisayar parçaları, güç ünitesi komponentleri gibi birçok alanda yaygınlaşmış durumdadır. Genel olarak bakıldığında, döküm yolu ile şekillendirilen magnezyum alaşımlarının miktarında, özellikle 1995 yılından itibaren önemli artışlar gözlenmektedir. Magnezyum dökümünde meydana gelen küresel büyümenin içinde bulunduğumuz yüzyılda da hızlı bir şekilde gelişme göstereceği tahmin edilmektedir [8].

Son 30-40 yıl basınçlı döküm tekniğinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Metal ve kalıp sıcaklıkları, basınçlar, besleme hızları gibi döküm faktörlerinin kontrolleri ciddi bir aşama göstermiştir. Birkaç personel ile çalıştırılabilen dalma silindirli basınçlı döküm makinasından, tek bir personel gerektiren ve saatte yüzlerce döküm alınabilen tam otomatik piston tipi teknolojik makinalara kadar çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir [9].

Basınçlı döküm, hassas toleransları sağlayan bir teknik olmasına rağmen, döküm parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen birçok proses parametresi bulunmaktadır. Bu parametreler, parça-kalıp konstrüksiyonu ve kalıp toleransları ile alakalıdır. Ancak

parça kalitesini ve mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında, işlem parametreleri gelmektedir. Kalıp ve parça üretiminin doğruluğu; kalıbın bölme yüzeyine, maçaların yerleştirme sistematığına, kalıbın termal genişmesine, kalıp ara yüzeylerinin tam örtüşmesine ve koniklik açılarının derecesine bağlı olarak belirlenebilir. Kusursuz bir kalıp tasarlayıp imalatı gerçekleştirilse bile, döküm prosesi esnasında yanlış seçilen işlem parametreleri, doğru tasarlanmış parçaların bile hatalı ve yetersiz mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmesine sebep olabilmektedir. İşlem faktörlerini; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, dolun süresi, piston ve meme girişinde metal akış hızları, enjeksiyon basıncı (injection pressure) ve katılma sırasında uygulanan basınç (intensification pressure) oluşturmaktadır [1].

Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde işlem faktörleri; parça kalitesine, mekanik özelliklere, poroziteye ve hatalı parça üretime doğrudan etki etmektedir. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde uygulanan işlem parametreleri, 10 yıl öncesine kadar, etkilemiş yönleri açısından değerlendirilmemişti. Ancak 1995'ten bu yana, seçilen işlem faktörlerinin etkileri üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Daha önceki yıllarda alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü için yapılan araştırmalar, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm parametrelerini optimize etme çalışmalarına ışık tutmaktadır.

İşlem faktörleri (parametreleri) olarak incelenen unsurlar; katılma sırasında metale uygulanan basınç, meme giriş ve piston hızı (ikisi birbiri ile bağlantılıdır), kalıp sıcaklığı ve sıvı metalin ergitme veya döküm sıcaklığıdır. Bu parametrelerin yoğunluğa, mekanik özelliklere, poroziteye (gözenekliliğe), segregasyon oluşumuna ve çeşitli döküm hatalarına etkileri farklı deneysel ve teorik çalışmalar ile araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Magnezyumun Genel Özellikleri

Magnezyum elementi periyodik cetvelin II A grubunda yer alan toprak alkali metaldir. Atom numarası 12, atom ağırlığı 24,3050 g/mol'dür. Mg sembolü ile gösterilir. Atom çapı 0,32 nm ve atomik hacmi 14 cm³/mol'dür. Kristal yapısı hegzagonal sıkı pakettir (HSP). Şekil 2.1, birim hücredeki temel düzlemleri göstermektedir. Saf magnezyumun oda sıcaklığında hesaplanan kafes parametreleri; a = 0,3202 nm ve c = 0,5199 nm'dir. 1,6236 olan c/a oranı, ideal değere (1,633) oldukça yakındır. Bu nedenle magnezyumun, mükemmel sıkı paket yapıya sahip bir metal olarak düşünülebilir [10].

Çizelge 2.1 Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı

| Element | Al | Fe | Mg | Ti | Zn | Ni | Cu | Pb |
|---------|-----|-----|-----|------|------|-------|------|-------|
| % | 7,5 | 4,7 | 2,7 | 0,58 | 0,02 | 0,018 | 0,01 | 0,002 |

Magnezyum, Çizelge 2.1'den görüldüğü gibi yaklaşık olarak yer kabuğunun %2,7'sini oluşturur [11,12,13]. Çeşitli ham maddelerden magnezyum metali üretilebilmektedir. Magnezyum ve alaşımları, 1.74 kg/m³ düşük yoğunluğu ile tüm yapı malzemeleri arasında spesifik mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasından dolayı endüstride hakim olan alüminyum ve alaşımlarına bir alternatif olarak geliştirilmektedir [5]. Bu yoğunluk değerlerine göre polimerlere yaklaştığından ağırlığın önemli bir tasarım faktörü olduğu mühendislik uygulamaları için magnezyum alaşımları çok iyi bir tercih olmaktadır [14].

I. ve II. Dünya Savaşı yıllarında magnezyum alaşımlarının kullanımı artmaya başlamış fakat magnezyumun en önemli problemi oda sıcaklığında şekillendirilebilme kabiliyetinin oldukça düşük ve maliyetinin yüksek olması sebebiyle büyük ölçekli üretimler gerçekleştirmediği için çok fazla ilerleme olmamıştır. Son yıllarda yeni talepler bu durumu değiştirmeye başlamıştır [15]. Saf metalik magnezyum çoğu teknolojik uygulama için istenilen özellikleri sağlayamamaktadır. Magnezyumun alaşımlandırılması mukavemet, süneklilik, korozyon direnci, sürünme direnci gibi özellikleri elde etmek için gerçekleştirilir [16].

2.1.1 Magnezyumun terimsel, mekanik ve fiziksel özellikleri

Elementlerin veya bileşiklerin, başka elemen veya bileşiklerle alaşım oluşturmasıyla ortaya çıkan alaşımı standart bir dille ifade etme ihtiyacı doğmuştur. Amerikan standartları (ASTM), magnezyum alaşımlarının tanınmasında kullanılan bir simgeleme dizgesi geliştirmiştir. Bu dizgeye göre; magnezyum alaşımlarının simgeleri sırasıyla iki harf, iki rakam ve bir harf olmak üzere 5 birimdir, bu alaşımın temel simgesini oluşturur. Ayrıca alaşımın temel simgesinden bir kısa çizgi ile ayrılan işlem simgeleri vardır, bunlar alaşımın işlem durumunu belirtirler.

Magnezyum alaşımlarının temel simgelerinin ilk iki harfi, alaşımın bileşimindeki en önemli iki alaşım elementine aittir. En yüksek yüzde oranlısından düşüğe göre yan yana yazılırlar. Eğer iki elementin yüzde oranı eşit ise, elementin simgesinin alfabetik önceliğine göre sıralanır.

Çizelge 2.2 Magnezyumun alaşımlandırılmasında kullanılan elementler ve simgeleri

| | |
|------------------------------|-------------|
| B- bizmut | L- berilyum |
| C- bakır | M- mangan |
| D- kadmiyum | N- nikel |
| RE- nadir toprak elementleri | P- kurşun |
| F- demir | Q- gümüş |
| H- toryum | S- silis |
| K- zirkonyum | T- kalay |
| Z- çinko | |

Simgede üçüncü ve dördüncü birim olarak kullanılan iki rakam, harflerle belirtilen iki en önemli alaşım elementinin tam yüzde oranlarını simgeler. Eğer yüzde değeri kesirli ise bu, en yakın tam rakama dönüştürülür, en yakın çift rakama dönüştürülerek kullanılır. Örneğin, % 4.3, 4 olarak kullanılır [5,16].

2.2 Magnezyum Alaşımları

Magnezyum metali fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı saf olarak nadiren kullanılmaktadır. Magnezyumun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli alaşım elementleri ilave edilerek alaşım elde etme işlemi yaygın olarak

kullanılmaktadır. 1908 yılında magnezyum alaşımları için Alman firması “ Chemische Fabrik Griesheim” tarafından ilk çalışmalar yapılmasına rağmen magnezyum döküm alaşımlarının geliştirilmesi 1925 yılında yine Almanya’da gerçekleştirilmiştir [11,17,18].

1930 ile 1965 yılları arasında magnezyum- alüminyum- çinko- mangan içerikli kimyasal özellikleri üstün çeşitli alaşımlar ticari olarak kullanılmıştır. Bu alaşımlardan en yaygın olanı basınçlı döküm alaşımı olan AZ91 alaşımıdır. Buna bağlı olarak, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, ilk çalışmalar otomobiller içerisindeki aksamlar üzerine olmuştur; en bilinen örnek olarak VW – Beetle verilebilir.

Magnezyum alaşımları oldukça hafif bir metal olmanın yanında; iyi ısı iletkenliğine, titreşim sönümlene kapasitesine, düşük akustik empedans karakteristiğine sahiptir [19]. Ancak halen araştırmacılar magnezyum alaşımları üzerine hızlı soğutma, üretim teknolojileri, kompozitler, korozyona karşı koruma, geri dönüşüm ve alaşım geliştirme alanlarında çalışmaları sürdürmektedir [11].

Magnezyum alaşımları sahip olduğu fiziksel ve kimyasal avantajlara rağmen halen dünya pazarında yerini tam olarak alamamıştır ki avantajları ve kullanım sınırlamaları Çizelge 2.3.’de sunulmuştur [11,13,20].

Çizelge 2.3 Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları

| Avantajları | Dezavantajları |
|---|------------------------------|
| *Metaller arasında en düşük yoğunluğa sahip | *Birkaç Alaşıma Sahip Olması |

| | |
|--|--|
| *Yüksek spesifik mukavemet | *Düşük Süneklilik ve Tokluk (Oda sıcaklığı) |
| *Basınçlı döküm için iyi dökülebilirlik | *Yüksek Sıcaklıkta Limitli Özellikler (Sürünme Direnci Gibi) |
| *Yüksek hızda kolay işlenebilirlik | *Yüksek Kimyasal Reaksiyon |
| *İnert gaz altında iyi kaynaklanabilirlik | *Yüksek Döküm Çekilmesi |
| *Geliştirilmiş korozyon direnci | *Yüksek Üretim Maliyetleri |
| *Plastikler ile karşılaştırıldığında iyi mekanik özellik, daha iyi elektrik ve termal iletkenlik, geri dönüşüm | |

Magnezyum alaşımları genel olarak diğer metaller gibi şekillendirilebilir ve neredeyse tüm üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir. Kullanılan üretim yöntemlerinden bir tanesi de yüksek basınçlı döküm yöntemidir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı döküm, thixocasting, savurma döküm, sürekli döküm ve kum döküm olarak sıralanabilir. Magnezyum alaşıma oranla mükemmel dökülebilirlik kabiliyetine sahiptir. Farklı magnezyum alaşımları için farklı yöntemler uygulanmakta ve bu alaşımlar kullanılan alaşım elementine bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermektedir. Genellikle magnezyum alaşımları otomobil parçalarında, savunma ve uzay sanayinde, diz üstü bilgisayarlarda, kamera cep telefonu gibi elektronik aletlerin aksamlarında kullanılmak üzere basınçlı döküm tekniği ile üretilirler [11,21,22].

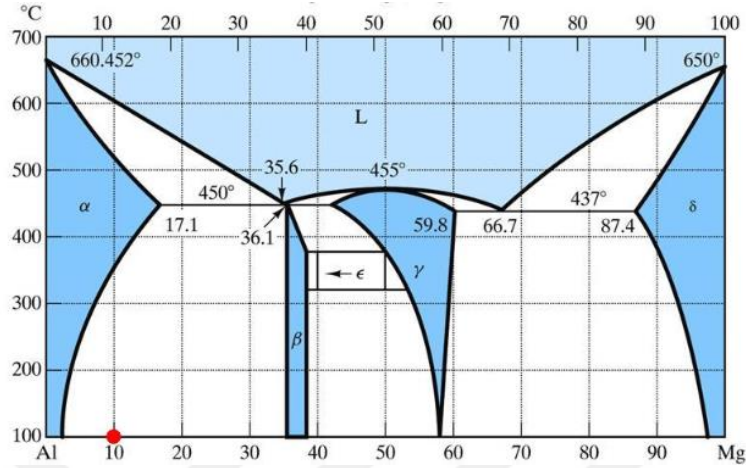
2.3 Başlıca Alaşım Elementlerinin Magnezyuma Etkisi

2.3.1 Alüminyum (Aluminium)

Magnezyum alaşımlarında en yaygın olarak Mg-Al sistemi kullanılmaktadır. Bunun nedeni doğada sık karşılaşılmasına bağlı olarak maliyetinin düşük olması ve göstermiş olduğu fiziksel ve kimyasal aktivitelerin mühendislik uygulamalarına yaptığı önemli katkıdır.

Şekil 2.1’de Mg-Al ikili denge diyagramı görülmektedir. Denge diyagramından da görüldüğü gibi 437°C gibi çok düşük sıcaklıkta ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ötektik reaksiyon, $L \leftrightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha(Mg)$, düşük sıcaklıkta meydana gelir (437°C). Bu ötektik sıcaklıkta alüminyumun maksimum çözünürlüğü %12,7’dir, azalan sıcaklık ile alüminyumun çözünürlüğü de keskin bir şekilde azalır ve eriyebilirlik oda sıcaklığında

yaklaşık %2'ye düşer. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sisteminin alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi sağlayabileceğini göstermektedir [16,1,23].



Şekil 2.1 Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı [24].

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere Mg-Al alaşımlarında %2'den daha fazla alüminyum içerdiği zaman döküm mikroyapısında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalitiği görülür. Eğer alaşımlarda alüminyum içeriği % 8'in üzerinde ise ağ yapısını tamamlamamış $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalitiği tane sınırları boyunca dağılım göstermesine bağlı faz farklılığından dolayı sünekliliğin azalmasına, kırılabilirliğin artmasına neden olur. Yaklaşık 420°C (373 K- 473 K aralığında) de çözelti işlemi $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalitiğinin çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir ve her iki durumda çekme mukavemeti ve sünekliliği artırır. 150°C ile 250°C aralığında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalitiği çökebilir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar. Buna karşın, Mg-Al alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmak için gerekli özellikleri taşımama durumu vardır. Çinko, mangan, silisyum gibi nadir elementleri Mg-Al alaşım sistemine ilave edilerek alaşımın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesi sağlanır [16].

2.3.2 Kalsiyum (Calcium)

Kalsiyumla alaşımlandırma, sürünme direnci yüksek fakat ucuz alaşımların geliştirilmesiyle ortaya çıktı. Böylece $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ile $Al_{12}Ca$ fazının yer değiştirmesi sağlandı. Diğer taraftan kalsiyum ergitmede veya sonraki işlem uygulamalarında,

deoksidan olarak görev yapmaktadır. Kalsiyum, sacların haddelenme kabiliyetini iyileştirirken; ağırlıkça %0,3'ü geçmesi kaynak kabiliyetini olumsuz etkilemektedir.

2.3.3 Lityum (Lithium)

Magnezyum alaşımlarının yoğunluğunu düşüren tek alaşım elementidir. Ayrıca, oda sıcaklığında ağırlıkça %5,5 (hacimsel %17) gibi oldukça yüksek bir oranda magnezyum içinde çözünebilmektedir. Lityum ilavesi ile dayanım azalır fakat süneklik artar. Elastisite modülünde ise biraz iyileşme görülür.

2.3.4 Mangan (Manganese)

Mangan genellikle tek başına kullanılmaz fakat alüminyum gibi diğer elementlerle birlikte katılır. Bu durum $MnAl$, $MnAl_6$, $MnAl_4$ bileşiklerinin oluşmasına sebep olur. Mangan demirin çözünürlüğünü azaltarak, oldukça zararsız bileşikler oluşturur. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının akma dayanımını artırır ve tuzlu su korozyon direncini iyileştirir. Bazı alaşımlarda manganın alaşım içindeki maksimum yüzdesi ağırlıkça %1,5-2 civarındadır.

2.3.5 Nadir Topraklar (Rare Earths)

Nadir topraklar, magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık dayanımını ve sürünme direncini arttırmak için kullanılırlar. Genellikle Mischmetal (Mişmetal; seryum ağırlıklı olmak üzere, lantan ve neodyum içeren, toprak alkalilerden oluşan metalsel bileşik) veya Didymium (%85 neodyum ve %15 proseodyum) olarak ilave edilirler.

2.3.6 Silisyum (Silicon)

Silisyum, ergimiş alaşımların akıcılığını artırır. Demirle birlikte bulunduğu zaman ise korozyon direncini azaltır. Çok az alaşımda kullanılır (AS21 ve AS41).

2.3.7 Gümüş (Silver)

Gümüş, yaşlandırma setleştirmesi uygulamasını iyileştirir. Ayrıca toryum ve nadir toprakları içeren alaşımların (örneğin QE22 ve QH21), yüksek sıcaklık özelliklerini artırır.

2.3.8 Toryum (Thorium)

Toryum ilavesi, alaşımların sürünme direncini 350°C'ye kadar arttırır. Düküm kabiliyetini iyileştirir. Alaşımları, kaynak edilebilir özelliktedir. Toryumun radyoaktifliğinden dolayı kullanımını yavaş yavaş terk edilmektedir.

2.3.9 İttriyum (Yttrium)

İttriyum, nadir toprak elementleriyle birlikte yüksek sıcaklık dayanımını ve sürünme direncini, 300°C sıcaklığa kadar çıkarmak için kullanılır.

2.3.10 Çinko (Zinc)

Çinko, en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Genellikle alüminyumla birlikte alaşımlara katılır (örneğin AZ91). Bunun dışında zirkonyum, toryum ve nadir toprak elementleriyle beraber oluşturduğu alaşımlarda mevcuttur.

2.3.11 Zirkonyum (Zirconium)

Zirkonyum tane inceltici elementtir. Çinko, nadir toprak elementleri, toryum, itriyum veya bunların karışımını içeren alaşımlarda kullanılır. Fakat alüminyum veya mangan içeren alaşımlarda, bu elementlerle kararlı bileşikler oluşturduğu için kullanılmaz. Aynı zamanda demir, silisyum, karbon, azot, oksijen ve hidrojenle de ergimiş halde kararlı bileşikler oluşturmaktadır. Sadece çözülmüş haldeki zirkonyum tane inceltici olarak etkilidir.

2.3.12 Berilyum (Beryllium)

Berilyum, magnezyum alaşımları içinde çok az çözünürlüğe sahiptir. Ergimiş metal yüzeyinde oksidasyonu azaltmak için çok düşük miktarlarda (<30ppm) kullanılır. Berilyum miktarının artması, tane kabalaşmasına neden olur.

2.3.13 Bakır (Copper)

Bakır, alaşım içinde ağırlıkça %0,05'ten fazla bulunursa, korozyon özelliklerini kötü etkilemektedir. Bunun yanında yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirdiğinden, sınırlı miktarda kullanılmalıdır.

2.3.14 Demir (Iron)

Korozyon direncini azalttığı için çok zararlı bir katışıktır. İyi bir korozyon direnci için, maksimum demir miktarı ağırlıkça %0,005 olarak belirlenmiştir.

2.3.15 Nikel (Nickel)

Nikel de çok zararlı bir katışıktır. Çok küçük miktarları bile korozyon direncini oldukça düşürür. İyi bir korozyon direnci sağlamak için, ağırlıkça %0,005'lik değer, demirde olduğu gibi, üst sınır olarak belirlenmiştir.

2.3.16 Kalay (Tin)

Küçük miktardaki kalay, alüminyumla bileşik oluşturarak sünekliği iyileştirir ve dövme sırasında oluşan çatlak eğilimini düşürür. Görüldüğü gibi, üretim sırasında istenen özellikleri sağlayan çok az sayıda element vardır. Yeni ve daha iyi alaşımlar için araştırmalar sürmektedir (skandiyum, stronsiyum, terbiyum ve gadolinyum son günlerde incelenen elementler) [25].

2.3.17 Antimon (Antimony, Sb)

Mg elementine Sb ilavesi son yıllarda bir kaç makalede çalışılmış olup, halen tam olarak etkisi bilinmemektedir. Ancak ilave edilen Sb'nin Mg içinde katı çözünlülüğü olmayıp, tane sınırlarında Mg_3Sb_2 intermetalığı yapmak eğilimindedir. Çözünmenin olmaması elektronegativite farkı ile izah edilmektedir. Mg_3Sb_2 intermetalik fazı ötektik reaksiyon sonucu oluşup, tane sınırları ve dentrit sınırları boyunca oluşmaktadır. Mg_3Sb_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 [26].

2.4 Basınçlı Döküm Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımlarının üretiminde kullanılan, en yaygın üretim yöntemi basınçlı dökümdür. Yöntem yüksek bir üretim kapasitesine sahip olduğundan, oldukça benimsenmiştir. Parçaların hızlı soğuması ince taneli yapı oluşmasını sağlarken, gazların kaçmasını zorlaştırdığından dolayı poroziteye (gözenekliliğe) sebep olabilmektedir. Porozite ise parçaları, ısıl işlem ve kaynak edilebilirlik açısından

uygunsuz hale getirmektedir. Basınçlı döküm, düşük viskoziteye sahip alaşımların kullanıldığı, ince cidarlı parçaların üretimi için ideal bir yöntemdir. Tipik olarak kullanılan basınçlı döküm alaşımları, Çizelge 2.4' te mekanik özellikleriyle birlikte verilmiştir. En yaygın alaşım sistemleri, magnezyum- alüminyum esaslı olanlardır. Çizelge 2.4' te listelenen basınçlı döküm alaşımlarının tümü, alüminyumu ana alaşım elementi olarak içermektedir.

Alüminyum içeriğinin düşük olduğu durumlarda dayanım, katı çözelti sertleştirilmesi ile sağlanır. Daha yüksek alüminyum konsantrasyonlarında ise dayanım, Mg₁₇Al₁₂ oluşumuyla elde edilir. Mg₁₇Al₁₂ içeriğinin artması, sünekliği azaltır. İşin doğrusu, ağırlık %6 alüminyum içeren Mg-Al sistemi, porozite önlenemediği sürece, en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği alaşım mekanizmasıdır. Bu alaşımlara çökelti sertleştirilmesi ve yaşlandırma uygulanabilir.

Çizelge 2.4 Basınçlı döküm Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [6]

| | Al | Mn | Zn | Diğer | A.D. | Ç.D. | U. | S. |
|-------------|-----|------|-----|--------|----------------------|----------------------|-----|----|
| | | | | | (N/mm ²) | (N/mm ²) | (%) | HB |
| AE42 | 4.0 | 0.1 | ... | 2.5 RE | 145 | 230 | 11 | 60 |
| AM20 | 2.1 | 0.1 | ... | ... | 90 | 210 | 20 | 45 |
| AM50 | 4.9 | 0.26 | ... | ... | 125 | 230 | 15 | 60 |
| AM60 | 6.0 | 0.13 | ... | ... | 130 | 240 | 13 | 65 |
| AS21 | 2.2 | 0.1 | ... | 1.0 Si | 120 | 220 | 13 | 55 |
| AS41 | 4.2 | 0.2 | ... | 1.0 Si | 140 | 240 | 15 | 60 |
| AZ91 | 9.0 | 0.13 | 0.7 | ... | 160 | 250 | 7 | 70 |

A.D.: Akma Dayanımı; Ç.D.: Çekme Dayanımı; U.: Uzama; S.: Sertlik

Basınçlı döküm alaşımları için her zaman bir uzlaşma sağlanmalıdır: alüminyum içeriğinin azaltılması döküm kabiliyetini azaltacak ve sadece çok basit şekilli kalıplar doldurulabilecektir. Alüminyum miktarının artması ise döküm kabiliyetini ve dayanımı arttıracak fakat sünekliği azaltacaktır. Mg₁₇Al₁₂ ara bileşiği (intermetallic), tane sınırlarında süreksiz bir formda oluşur. Mg₁₇Al₁₂ yaklaşık 460°C'de ergir ve 110-120°C'de tane sınırlarının, kayma düzlemlerine ilave olarak, birbiri üzerinde

kaymalarına olanak sağlayacak şekilde yumuşamaya başlar [1]. Çizelge 2.4'te ayrıca, bütün alaşımların mangan içerdiği de görülmektedir. Mangan korozyon direncini arttırmasının yanı sıra, daha iyi süneklik ve kırılma tokluğu değerleri sağlar. İstenilen özellikleri elde etmek için; AM20, AM50 ve AM60'dan oluşan bir alaşım serisi mevcuttur. Özelliklerin iyileşmesi, $Mg_{17}Al_{12}$ ara bileşiğinin daha homojen dağılması ile elde edilir. Örneğin tane sınırlarındaki ara bileşik miktarı azaltılır. AS serisi AS21 ve AS41 alaşımları, tane sınırlarında ince yapıllı olarak oluşan ve sürünme dayanımını artıran Mg_2Si ara bileşiğine güvenmektedir. Bu bileşik aynı zamanda, $Mg_{17}Al_{12}$ miktarını düşürme konusunda da etkilidir. Mg_2Si ayrıca bazı alüminyum alaşımlarını sertleştirmek için de kullanılmaktadır. Mg_2Si ara bileşiğini elde edebilmek için, parça kesitinin izin verdiği oranda, hızlı soğutma yapılması gerekmektedir. AS21'in sürünme direnci, AS41'e kıyasla daha iyidir fakat buna karşılık, akıcılığı daha kötü ve dökümü daha zordur [6].

Çizelge 2.5 Basınçlı döküm alaşımlarının genel özellikleri [5]

| Alaşım | Genel Özellikler |
|---------------|--|
| AZ91D | En çok kullanılan basınçlı döküm alaşımıdır. Oda sıcaklığında iyi dayanım, iyi döküm kabiliyeti, iyi atmosferik stabilite ve |

| | |
|--------|--|
| | mükemmel tuzlu su korozyon direnci özelliklerine sahiptir. |
| AM60B | İyi uzama ve tokluk, mükemmel tuzlu su korozyon direnci, iyi akma ve çekme dayanımı özelliklerine sahiptir. |
| AS21X1 | Basınçlı döküm alaşımları içinde en iyi sürünme direncine sahip alaşımdır (AE alaşımlarıyla beraber). Oda sıcaklığındaki özellikleri iyi ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanışlıdır. |
| AS41XB | 175°C'ye kadar iyi sürünme direncine sahiptir. Oda sıcaklığındaki özellikleri iyi, tuzlu su korozyon direnci mükemmeldir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. |

AZ91 alaşımı, dayanım özelliklerini arttıran alüminyum ve çinko elementlerini içerir. Çinko ilavesi, mikroporozite eğilimini azaltır. Mg-Al alaşımlarının sürünme direncini arttırmak için yapılan diğer denemeler, kalsiyum ilavesini içermektedir. Fakat kalsiyum ilavesi, sürünmedeki iyileşme ile birlikte sıcak yırtılma eğilimine sebep olmaktadır. Basınçlı döküm alaşımlarının hiçbirisi zirkonyum içermemektedir. Çünkü zirkonyum, basınçlı döküm alaşımlarının hepsinde bulunan alüminyum ve mangan ile zararlı bileşikler oluşturmaktadır [6].

2.5 Magnezyum Alaşımlarının Döküm Yöntemleri

Magnezyum alaşımları için çok değişik döküm yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, kum kalıba döküm, hassas döküm, sürekli kalıba (kokil) döküm, düşük basınçlı döküm (low pressure die casting), vakumlu döküm, yarı-katı metal döküm (semisolid metal casting) ve sıkıştırma döküm (squeeze casting) yöntemleridir. Son yıllarda basınçlı döküm alaşımlarının kullanımı oldukça artmıştır. Özel bir parça için döküm yöntemi seçiminde; tasarım şekli, arzu edilen mekanik ve yüzeysel özellikler, üretilecek toplam parça sayısı ve alaşımların dökülebilirliği belirleyicidir. Dökümde kullanılacak çok fazla alaşım çeşidi bulunmasına rağmen, her alaşım her döküm yönteminde kullanıma uygun değildir.

Magnezyum alaşımlarının kum kalıba döküm yöntemiyle üretimi çok sayıda alaşıma uygulanabilmekte ve farklı boyutlarda parçalar elde edilebilmektedir. Ancak yöntem,

kalıp kumu ile ergiyik magnezyum arasındaki reaksiyonlardan dolayı inhibitör kullanımını gerekli kılar. Yüksek adetlerde parça üretimi için uygunken, yüzey bitirme ve tolerans değerleri açısından çok iyi özellikler sağlanamaz.

Kum kalıba döküm yöntemiyle sağlanamayan bazı özellikler, hassas dökümle sağlanabilir. Ancak hassas döküm yöntemi için parça başına maliyet ve ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Magnezyum alaşımlarının sürekli kalıba döküm yöntemiyle üretiminde ise, kalıbın tekrar kullanılabilmesi maliyetler açısından bir avantaj gibi gözükse de, kalıpların yüksek ilk yatırım maliyetlerinin amortismanı, bir kalıptan alınabilecek parça adediyle karşılanamayabilir. Yüzey bitirme özellikleri ve boyutsal toleranslar açısından iyi sonuçlar alınmasının yanında, çok sayıda alaşım türüne uygulanabilir bir yöntemdir [1].

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi diğer yöntemlerin sunamayacağı ekonomik avantajlar sunar. Magnezyum basınçlı döküm yöntemiyle üretildiğinde, alüminyum ve çinkoya kıyasla, aynı ağırlıktaki hammadde ile daha fazla ürün elde edilir. Otomasyona uygunluğu yönüyle, magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü, yüksek hacimli üretimler için ideal bir yöntemdir. 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.

Çizelge 2.6 Magnezyum alaşımları ile döküm yöntemlerinin mukayesesi [25]

| Karşılaştırılan Özellikler | Basınçlı Döküm | Kum Kalıba Döküm | Hassas Döküm | Sürekli Kalıba Dökü |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|

| | | | | m |
|---|---|---|---|----------|
| Uygun alaşım çeşitliliği | + | + | + | + |
| Değişken boyutlu parça üretilebilirliği | + | + | - | - |
| Yüzey bitirme zellikleri | + | - | + | + |
| Yüksek retim hacmine uygunluk | + | + | - | - |
| Parça başına birim maliyetler | + | + | - | - |
| Hassas toleransların elde edilmesi | + | - | + | + |
| İyi mekanik özelliklerin elde edilmesi | + | + | + | + |
| Karmaşık Şekli parça retimi | + | - | + | - |

Magnezyum alaşımlarına uygulanan farklı döküm yöntemleri, elde edilen özellikler, üretilebilen parça boyutları, yüksek üretim hacmine uygunluk gibi yönlerden karşılaştırıldığında; yöntemlerin üstün ve zayıf yönleri izelge 2.6'daki gibidir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, diğer döküm yöntemlerine kıyasla, oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

2.5.1 Basınçlı döküm

En eski metal döküm metotlarından biri ergimiş metalin yer çekimi etkisi altında kum kalıplar içine dökülmesidir. Bu metot çeşitli değişiklerle günümüz kum dkmhanelerinde hala kullanılmaktadır. Bir süre sonra daha keskin profil ve pürüzsüz yüzey gerektiren kuyumculuk sanatı, alçı ve seramik kalıp yöntemlerini geliştirmiştir. Bu metotlar kum kalıba dökümden daha yüksek kaliteli yüzeyler vermekle beraber, kum dökümlerde olduğu gibi parçanın çıkarılması için kalıbın bozulması olumsuzluğundan kurtulamamıştır.

Çok sayıda parça dökmeye uygun, uzun ömürlü kalıp araştırmaları eski çağlardan beridir yapılmaktadır. Ortaçağda tabak, bardak, sürahi ve diğer mutfak eşyaları demir kalıplarda dklmştir. Yakın geçmişte 1800'lerde oyuncak kurşun askerlerinin dökümü izlemiştir, sonrasına menteşeli, açılabilen kalıplarda yer çekimi etkisi ile dökümler uygulanmıştır. Aynı yıllarda içi boş Őekillerin dökümü için yeni bir yöntem geliştirilmiş, bu metotla sıvı metal demir kalıba döküldükten sonra sıvı halde kalan içi

kısım boşaltılarak istenilen şekiller elde edilmiştir. Bu gelişmeler yer çekimine dayanmak yerine ergimiş metali basınç altında kalıba dökerek daha kısa zamanda iyi görünüş ve kaliteli döküm üretme çabalarına ışık tutmuştur [27].

1849'da Sturges, 1852'de Barr, 1856'da Helize, 1877'de Dusanbury ve diğerleri tarafından geliştirilen el tipi döküm makinalarının patentleri alınmıştır. Bunu Ottmar Mergenthaler'in Linotip makineyi geliştirmesi takip etmiştir. Bu makinede, ergimiş metale daldırılmış silindir içine dolan sıvı metal, bir piston yardımıyla kalıp içine basılmıştır. 20. yüzyılın başlarında ise ilk basınçlı döküm makinesinin patenti, H.H. Doehler tarafından alınmıştır. Bu makine, Mergenthaler'in Linotip makinesinin çalışma prensibine dayanmaktadır. Linotip makinesi ile başlayan basınçlı döküm çalışmalarından yararlanılarak, ilk endüstriyel uygulama, kurşun ve kalay alaşımlarının motor yataklarına basılması ile başlar. Bundan kısa bir süre sonra bu uygulama, metal parça üretiminde önemli bir faktör haline gelerek daha iyi mekanik özelliklere sahip alaşımların dökümlerine adapte edilmiştir.

Çinko alaşımları, kalay-kurşun alaşımlarına yakın ergime sıcaklığına sahip olduğu için ikinci olarak denenen alaşım ailesi oldu. 1915'te Doehler Pres Döküm Şirketi, ilk defa ticari alüminyum alaşımı parçaları meydana getirdi. Birinci Dünya Savaşında alüminyum alaşımlarından gaz maskesi, makineli tüfek, dürbün gibi sistemlerin parçaları üretildi. Magnezyumun alüminyumla olan alaşımları üzerindeki gelişmeler oldukça kayda değerdir. Bu metalin basınçlı döküm işlemleri, metalürjik gelişmelerin artmasını sağladı [9].

Genel olarak tarihten bu zamana bir skala çizilecek olursak, geçmişte yerçekimi ile günümüzde ise basınçlı döküm ile imalat popüler hale gelmiştir. Basınçlı döküm; ergimiş metale yüksek hız kazandırılarak, metelsel kalıba hızlı bir şekilde dolmasını sağlayan, hidrolik enerji kaynağına dayalı bir sistem olarak tanımlanabilir. Kısaca, sıvı metalin basınç etkisi altında metelsel kalıba doldurulması esasına dayanan döküm yöntemidir. Metal kalıp; enjeksiyon sırasında oluşan gerilimi soğurur, ergimiş metalin sahip olduğu ısıyı dağıtır ve de şekillendirilmiş parçanın uzaklaştırılmasına yardımcı olarak bir sonraki çevrim için hazırlık yapılmasını sağlar. Hidrolik enerji sistemi, ergimiş metalin pozisyonunu, hızını ve ivmelenmesini kontrol ederek, akış ve güç fonksiyonlarını optimize eder ve bu sistem sayesinde, ergimiş metal kalıp boşluğunu kusursuz bir şekilde doldurur ve katılaşma gerçekleşir [28].

Amerikan literatüründe yöntem Die Casting, Avrupa'da ise Pressure Die Casting olarak isimlendirilmekteydi. Son yıllarda gelişen diğer teknolojiler sebebiyle, kavram çatışmasını önlemek için yöntem, High Pressure Die Casting ismiyle anılmaya başlanmıştır. Basınçlı dökümde kalıp iki yarımından oluşur ve iki kalıp yarımını kapatılıp kilitlendikten sonra sıvı metal bir basma haznesine aktarılır. Bu hazne soğuk olabileceği gibi metal sıcaklığına ısıtılmış da olabilir. Haznedeki sıvı metal bir piston veya basınçlı hava vasıtasıyla kalıba doldurulur. Kalıp içerisindeki hava (gaz), dolum esnasında kalıp yüzeylerindeki havalandırma deliklerinden atılır. Kalıp gravürü (boşluğu) tamamen dolduktan sonra parça soğuyuncaya kadar basınç uygulanır. Sonra kalıp açılır ve döküm parçası alınır. Kalıp açık durumda iken içi temizlenir, yağlanır ve önceki işlemler tekrar edilir.

Basınçlı döküm, ağırlıkları birkaç gram ile 25 kg arasından değişen, nihai üretim şekline yakın parçaların, tam otomatik, yüksek verimli ve yüksek kapasiteli üretimine yönelik çok iyi yapılandırılmış bir döküm metodudur. Günümüzde demir dışı metallerden yapılmış parçalara olan talebin artışına paralel olarak basınçlı döküm makinaları gelişerek; hidrolik olarak çalışan, otomatik, elektronik kontrol sistemine sahip makinalar yapılmaktadır.

Genel döküm ekipmanlarının mekanik ve hidrolik kısımlarına ait temel prensiplerden 100 senedir faydalanılıyor olunmasına rağmen, basınçlı döküm işlemi hala çok hızlı bir gelişim süreci içerisinde yer almaktadır. Döküm donanımı imalatçıları günümüzde magnezyum, alüminyum, çinko ve bakır ağırlıklı alaşımları arzulanan şekle dönüştürmeye hazır tam otomatik döküm sistemleri üretmektedirler.

2.5.1.1 Basınçlı dökümün avantajları

- Metal kalıba (kokil) nazaran çok daha karmaşık şekilli parçaların dökümü mümkün olmaktadır.

- Kalıplar basınç altında doldurulduğundan, diğer döküm yöntemlerine göre daha ince cidarlı ve boyutsal hassasiyeti daha yüksek olan parçaların dökümü mümkündür.
- Dökülen parça boyutlarında bir değişim olmaksızın aynı kalıp ile binlerce parça imal edilebilir.
- Özellikle çok gözlü kalıplar kullanıldığında, üretim hızı diğer yöntemlerden çok daha fazladır.
- Parçalar yolluk ve çıkıcıların kesilmesi dışında hemen hiç yüzey işlemeye ihtiyaç göstermezler.
- Basınçlı dökümle üretilen parçaların mekanik özellikleri diğer döküm yöntemlerine göre daha yüksektir.
- Çok sayıda parça imalatı için birim parça maliyeti düşüktür. Ayrıca ince kesitlerin dökülebilmesi, malzeme maliyetini azaltır.
- Yoğunlukları farklı malzemeler aynı kalıpta dökülebilir (örneğin alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları).

2.5.1.2 Basınçlı dökümün sınırlamaları

- Dökülebilecek parça büyüklüğü sınırlıdır. Parça ağırlıkları nadiren 23 kg'ı geçer ve genellikle 4-5 kg ağırlığa kadar olan parçalar dökülebilmektedir.
- Basınçlı döküm kalıplarının dizaynı yapılırken, dökülecek parçanın şekline göre yolluk, maça ve hava çıkış deliklerinin yapımı ve yeri çok önemlidir. İyi tasarlanmayan kalıplarda gaz boşlukları meydana gelir.
- Basınçlı döküm makinaları oldukça pahalı sistemlerdir. Bu nedenle yöntem, az sayıda parça dökümü için ekonomik değildir.
- Ergime sıcaklıkları bakır alaşımlarınkinden daha yüksek olan (1000 °C) malzemeler bu yöntemle dökülemez [29].

Basınçlı döküm yöntemlerindeki çeşitlilik, sistemlerin farklı özelliklerinin birbirine tercih edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler arasında sıvı metalin akışı, kalıp boşluğundaki gazların uzaklaştırılması, ergimiş metalle hidrolik sistem arasında reaksiyon oluşması, enjeksiyon sırasında oluşan ısı kaybı sayılabilir. Mekanik dizayn, ısı kontrol ve hareket sistemlerine bakıldığında ise, farklı yöntemler ortak özelliklere

sahiptir. Basınçlı döküm yöntemleri, yerli literatürde püskürtme döküm ve pres döküm olarak ikiye ayrılmaktadır.

Basınçlı döküm makinasının temel fonksiyonu; iki kalıp yarısını tam ekseninde birbirine kilitli tutmak, yeteri kadar ergimiş metali basınç altında kalıp boşluğuna göndermek ve dökülmüş parçayı kalıptan çıkarmak için kalıbı açmaktır. Basınçlı döküm makinaları başlıca üç ana kısımdan meydana gelir;

1. Gövde; hareketli kısımları ve kalıbı taşıyan, onları en uygun pozisyonda tutarak her birinin fonksiyonunu yerine getirmesini sağlayan kısımdır.
2. Hareketli kısım; kalıbı açma ve kapama mekanizmasıdır. Bütün modern makinalarda bu açma kapama işlemi hidrolik olarak yapılmaktadır.
3. Enjeksiyon (makinanın ön kısmı); ergimiş metali yüksek hız ve basınç altında kalıp boşluğuna gönderir.

Basınçlı döküm makinaları, metal basma (enjeksiyon) sistemlerine göre sıcak kamaralı (hot chamber) ve soğuk kamaralı (cold chamber) olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde sıcak kamara tipi makinalar; yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların dökümünde ise soğuk kamaralı makinalar kullanılır. Her iki tip makinanın da gövdeleri (arka kısımları) birbirine benzemekle beraber, ön kısımları yani enjeksiyon sistemleri birbirinden farklıdır [9].

2.6 Basınçlı Döküm Yöntemleri

2.6.1 Püskürtme döküm

Ergime dereceleri düşük kurşun (Pb), kalay (Sn) ve çinko (Zn) esaslı alaşımların, ergime sıcaklıklarının oldukça üzerindeki bir sıcaklıkta, yüksek bir basınçla kalıp içine püskürtülerek kalıbın doldurulması yöntemidir. Sıvı metal hava basıncıyla veya bir piston-silindir düzeneği ile memeden kalıp içine püskürtülür.

2.6.2 Pres döküm

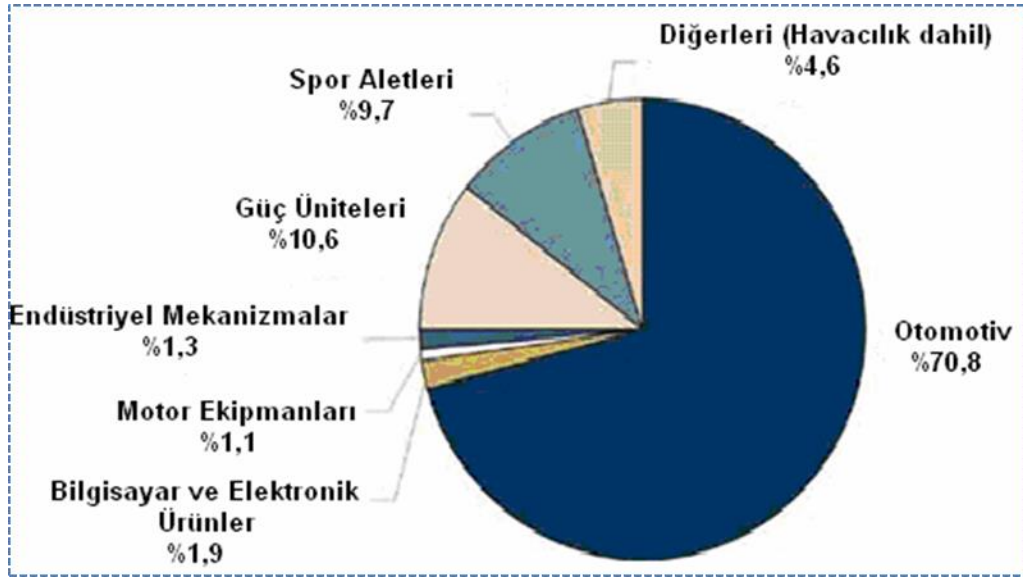
Ergime sıcaklıkları yüksek olan alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) alaşımlarının ergime fırınından alınarak döküm makinasının haznesine doldurulup,

bir piston vasıtasıyla kalıp boşluğuna basılması yöntemidir. Pres dökümde, döküm sıcaklığı ve döküm hızı püskürtme döküme göre oldukça düşüktür. Likidüs eğrisi civarında bir sıcaklıkta işlem gerçekleştirilir [29].

2.7 Magnezyum Alaşımının Basınçlı Dökümü

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm ile imalatı; elektronik parçalardan kamyonların şanzıman kutularına kadar çok geniş bir üretim hacminde kendini kanıtlamış bir yöntemdir. Basınçlı döküm, yüksek üretim hacimlerinde, aynı tip parçaların imalatında kullanılan, kendini tekrarlama esasına dayanan bir yöntemdir. Proses, ergimiş metalin yüksek basınç altında çelik bir kalıba enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir. Basınçlı döküm yönteminde, ergimiş metalin yüksek sıcaklık ve basınç altında enjekte edilmesi için kullanılan kalıp, aynı zamanda parçanın kalıptan çıkacak katılığa (sertliğe) kadar soğutulmasını da, hızlı bir şekilde sağlamaktadır. Basınçlı döküm, ergimiş magnezyumu tam ölçüde ve sorunsuz bir şekilde, mümkün olan en kısa çevrim süresinde, istenilen forma dönüştürme konusunda benzersiz bir yeteneğe sahiptir. Basınçlı döküm ile parçalar, plastik enjeksiyon yöntemine benzer bir şekilde, genellikle herhangi bir talaşlı işleme gerek duyulmadan, son şeklinde üretilmektedir. Magnezyum alaşımlarından dökülen parçalar, plastik malzemelere göre daha sıkı yapılı ve boyutsal olarak daha kararlı özelliklere sahiptir.

Magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi, özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere uçak ve uzay sanayi, spor ekipmanları, elektronik parça sektörü, bilgisayar parçaları, güç ünitesi komponentleri gibi birçok alanda yaygınlaşmış durumdadır. 2004 sonu itibarıyla, basınçlı döküm magnezyum parçalarının ABD'deki pazar payları Şekil 4.1'de verilmiştir.

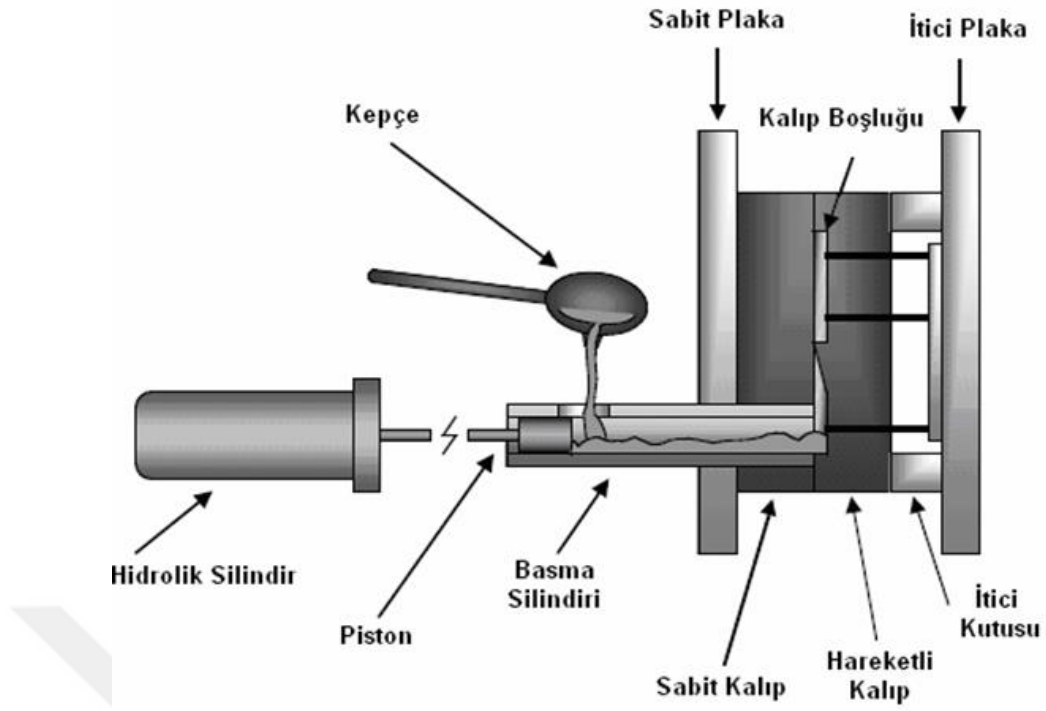


Şekil 2.2 Basınçlı döküm magnezyum parçaların 2004 sonu itibariyle ABD'deki pazar payları [30]

Tasarımcı açısından basınçlı döküm ürünler için yapılan üretim planındaki esneklik ve özgürlük, diğer bütün metal işleme yöntemlerine göre daha fazladır. Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümünde genel olarak, sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır [6].

2.7.1 Soğuk kamaralı basınçlı döküm prosesi

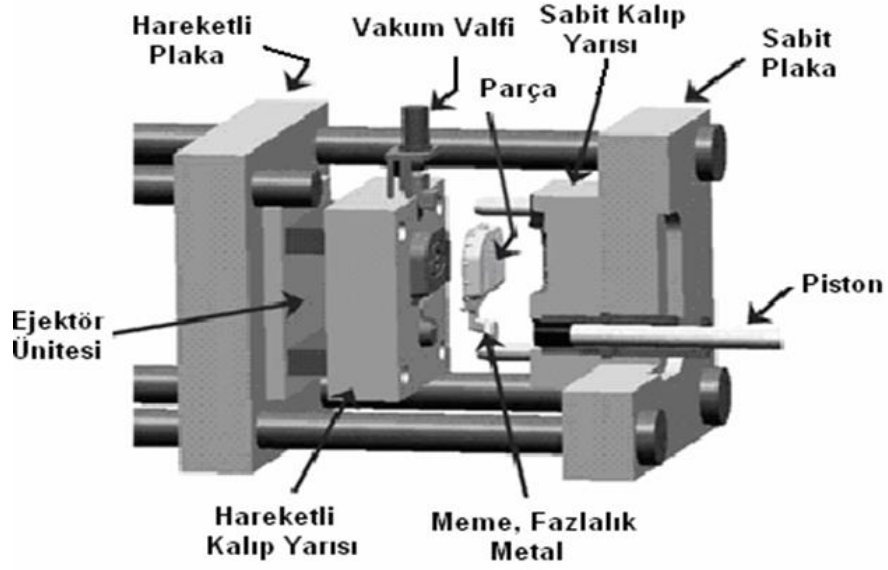
Soğuk kamara tipi basınçlı döküm makinalarında, ergimiş metal soğuk hazne silindrine döküm ağızı veya döküm deliği vasıtasıyla aktarılır. Hidrolik olarak çalışan pistonun ileriye doğru hareketiyle, döküm deliği kapanır ve kilitlemiş kalıp içine sıvı metal yüksek basınç altında enjekte edilir (Şekil 2.3). Enjeksiyon sırasında uygulanan basınç 30-100 MPa arasında değişmektedir. Soğuk kamaralı makinalarla döküm yaparken, kalıp boşluğunu doldurması gerekenden daha fazla ergimiş metal, silindir içerisine aktarılır. Bu fazlalık sıvı metal, kalıp boşluğundaki alaşımı, katılaşma süresince yeterli miktarda basınç altında tutmaya yardımcı olur. Fazlalık metal (artık metal) döküm parçası ile birlikte dışarı itilir ve daha sonra parçadan ayrılır.



Şekil 2.3 Soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası [31]

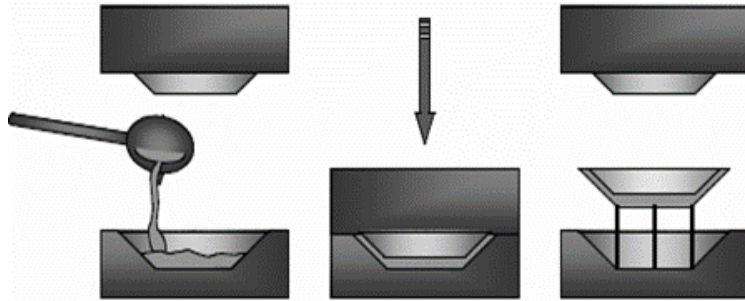
Vakumlu basınçlı döküm (vacuum die casting) prosesi, geleneksel yöntemin modifiye edilmiş halidir. Bu yöntemde, kalıp boşluğundaki hava, alaşım enjekte edilmeden önce boşaltılır (Şekil 2.4). Vakumlu basınçlı döküm yöntemi, gereken basıncın azalması ve enjeksiyon hızının yükseltilebilmesi sayesinde, parçaların hızlı dolum (quick fill) adı verilen şekilde üretilmelerine olanak sağlar.

Geleneksel basınçlı döküm kalıpları ile vakum etkisi, kalıp içinde yaklaşık 35 kPa negatif basınç ile sağlanmaktadır. Özel olarak hazırlanmış iç kısmı sızdırmaz (contalı) kalıplarla çalışılırsa, istenilen vakum etkisi, kalıp içindeki 10 kPa'dan az olan negatif basınç ile elde edilmektedir. Bu yöntem, geniş yüzeyli ve ince kesitli parçaların, derin kanatçıkların ve de dar ve kör boşlukların hatasız dökümlerine olanak sağlar.



Şekil 2.4 Vakumlu soğuk kamaralı basınçlı döküm makinası [6]

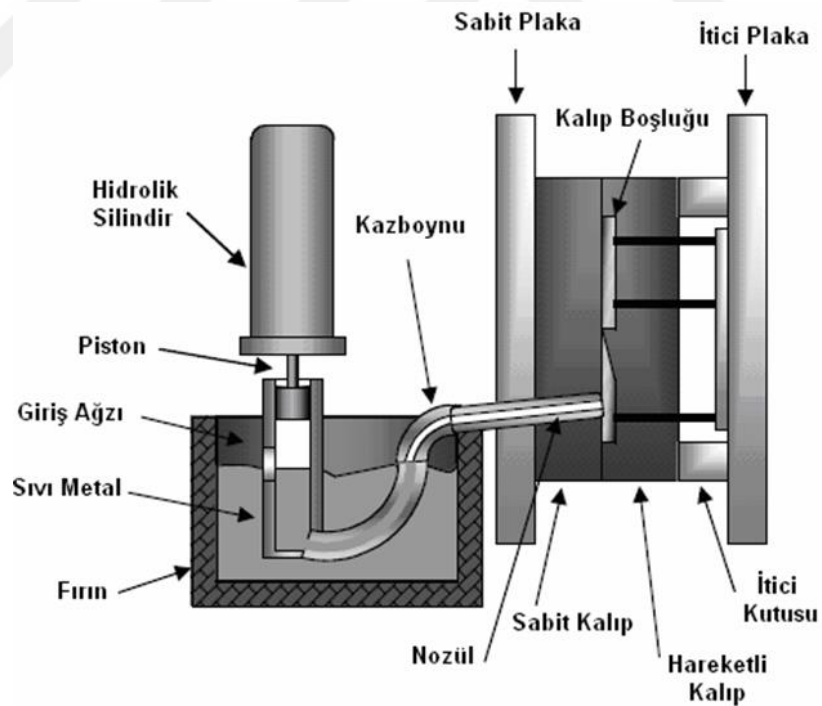
Sıkıştırma döküm (squeeze casting) yöntemi (Şekil 2.5), basınçlı döküm sektöründe son zamanlarda ilgi gören bir prosestir. Yöntem ergimiş metalin türbülanssız ve gaz kalıntıları olmaksızın, yüksek hidrolik basınç altında şekillendirilmesi esasına dayanmaktadır. Sonuç olarak ısıl işlem görmeye uygun, kalın kesitli ve düşük poroziteli parçalar üretilir. Üretim maliyetleri geleneksel basınçlı dökümden oldukça fazladır. Sıkıştırma döküm ile üretilmiş parçalar, kokil kalıba döküm yöntemine alternatif olmaktadır. Ayrıca yüksek mukavemetli dökme demir uygulamalarında tercih edilen bir yöntemdir [31].



Şekil 2.5 Sıkıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi [31]

2.7.2 Sıcak kamaralı basınçlı döküm prosesi

Sıcak kamaralı makinada (Şekil 2.6) enjeksiyon mekanizması, makinaya bağlı bir fırın içerisine daldırılmış durumdadır. Pistonun yükselmesi ile birlikte, ergimiş metalin silindire dolmasına izin verecek şekilde bir kapı açılır. Piston aşağıya doğru hareket edince, sıvı metalin silindire aktığı ağız kapanır. Daha sonra piston ergiyik metale baskı yaparak, kazboynu ve nozülünden (memeden) geçerek kalıbı doldurmasını sağlar. Metalin katılaşmasının ardından, piston aşağı konumdayken, kalıp yarıları açılarak bitmiş döküm parçası dışarı çıkartılır. Sıcak kamaralı makinaların operasyon hızları oldukça yüksektir. Çevrim süreleri; ağırlığı 10 g'dan az olan parçalar için 1 s'nin altındayken, 1 kg ve üzerindeki ağırlığa sahip parçalar için 30 s civarında gerçekleşmektedir. Kalıpların dolumu oldukça hızlıdır (normal şartlarda 5-50 ms) ve ergimiş metale uygulanan enjeksiyon basıncı 15 ile 40 MPa arasında değişmektedir. Bununla beraber modern teknoloji, bu değerlerin çok hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamakta ve böylelikle ince ayrıntılı, dar toleranslı ve yüksek mukavemetli döküm parçaları üretilmektedir [31].



Şekil 2.6 Sıcak kamaralı basınçlı döküm makinası [31]

Sıcak kamaralı makinanın operasyonu, soğuk kamaralı makinaya göre daha hızlıdır. Bunun sebebi; sıcak kamaralı makinada, katılma sırasında ekstra sıkıştırma (dosing operation veya intensification) operasyonunun olmayışı (parça, katılma süresince belirli bir basınç altında tutulur ancak bu basınç soğuk kamaralı yöntemde olduğu gibi çok yüksek değerlerde olmayıp daha düşük değerlerdedir) ve yolluktaki katılma süresinin daha kısa oluşudur. Böylelikle daha hızlı çalışma imkânı sağlanmaktadır. Özellikle kilitleme kuvveti 5 MN'a kadar olan küçük makinalar için işlem süreleri çok kısadır. Çevrim süresi, parçanın maksimum cidar kalınlığına (wall thickness) bağlı olarak değişmektedir. Soğuk kamaralı yöntemde kullanılan alaşımlardan farklı olarak, sıcak kamaralı makinalarda kullanılan alaşımlar, düşük ergime sıcaklığına sahip olanlar ile sınırlanmıştır. Bu yöntemde en çok kullanılanı da AZ91D alaşımıdır. Soğuk kamaralı makinalar ise, piston-silindir düzenekleri ergimiş metal içine daldırılmadığından ve sıvı metalle çok daha kısa süreyle temas halinde olduğundan, yüksek ergime sıcaklığına sahip magnezyum alaşımlarıyla kullanılmaları sorun yaratmamaktadır. Basınçlı döküm makinaları genellikle hidrolik enerji ile çalışırlar. Ama özellikle küçük boyutlardaki sıcak kamaralı makinalar için elektrik enerjisi alternatif olarak kullanılmaktadır [31].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Yukarıda magnezyum alaşımları ile ilgili verilen genel literatür ve döküm yöntemleri incelendiğinde, magnezyumun en temel problemlerinden bazıları düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık dayanımlarının düşük olmasıdır. Son yıllarda araştırmacılar mekanik özelliklerin artırılmasında bu tür oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık dayanımlarına odaklanmaktadır. Genel alaşım elementlerinin birçoğunun Mg'ye etkisi çalışılmış olmasına rağmen bazı elementlerinin etkileri halen bilinmemektedir. Bu nedenle temel alaşımlama teoremleri çerçevesinde ve ısıl işlem ile etkileşim şartlarına bakılarak yeni elementlerin etkisi incelenmeye devam etmektedir. Bu alaşım elementlerinden birisi antimon(Sb)'dur. Mg'ye ilave edilen Sb ile magnezyumun hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerinin artırılması mümkün olmaktadır. Bu teoriye göre Mg_3Sb_2 partikülleri, tane sınırlarında homojen bir şekilde dağılmaktadır. Bu intermetalikler tane sınırlarındaki hareketi kilitlemek sureti ile akma ve sürünme direncini artırmaktadır [32]. Bu tür çalışmalar AZ91 alaşımlarına uygulanmış olmasına rağmen, alüminyum içeren alaşımlara olan etkisi yaygın bir şekilde irdelenmemiştir. Bir diğer yeni nesil alaşımlar ise RE (nadir elementler) ile yapılan alaşımlardır. Örneğin seryum, Mg alaşımlarının yüksek sıcaklık mekanik dayanımlarını, oluşturdukları kararlı intermetalikler sayesinde artırmaktadır.

Bu çalışmada Sb ve Ce'nin bu doğrultudaki sinerjik etkisi incelenmiştir. Öncelikli olarak, Mg-4Sb-2Al ön alaşımının üretimi koruyucu atmosferde basınçlı döküm yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar alaşımının, mikro yapısının kontrolü ve döküm ile imal edilip edilemeyeceği konusunda doğrulama çalışması niteliğindedir. Bilindiği üzere döküm imalat yöntemi, seri üretim ve ekonomik olması nedeni ve sağladığı mühendislik avantajları nedeni ile vazgeçilmez yöntemlerden biridir. Ancak döküm ile imalatın zorlukları da mevcuttur. Prosesin kontrol edilmesinin zorluğu ve katılma sürecinde teorik hesaplamaların sapmalara uğramasının nedeni; Scheil eşitliğine göre alaşımların katılabilirken segregasyona uğramasıdır. Bu ise farklı elementlerin ergime sıcaklıkları ve sıvı metal içerisindeki mobilitesinden ileri gelmektedir. Bu segregasyon direkt olarak ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Bu nedenle tüm döküm işlemlerinin

katılaştırılması işlemi iyi bir deney sistematığı ve tasarımı ile kontrol edilmelidir. Bu nedenle proje başlangıcında, ön denemelerde Mg-4Sb-2Al alaşımları için metaller uygun ağırlıklarda kesilip, miligram hassasiyette tartılıp, alaşım için ideal kompozisyon değerleri belirlenerek ergitme denemeleri yapılmıştır. Ergitme sürecinde atmosfer kontrol edilmiştir. Atmosferin kontrol edilmesi özel bir gaz ile sağlanmış olup, bu gaz karışımı ergitme sistemine son derece hassas ve kontrollü bir şekilde verilmiştir. Fakat bu tür sistemlerin yüksek maliyetli olması nedeniyle, mevcut bütçe değerlerinin yetersiz oluşu gaz koruma sistematığının düzenlenmesi sürecini uzatmıştır. Bu süreçler sonucunda mikroyapı kontrolü için alaşımlar geliştirilmiş ve bu alaşımlar ile ilgili mikroyapı resimleri aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 3.1 Alaşımlara ait ağırlıkça yüzde kompozisyonları

| | ALAŞIM KOMPOZİSYONU | 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 | - |

Bu çalışmada Mg-4Sb-2Al alaşımının üretimi CO₂+%2SF₆ gaz karışımı altında koruyucu atmosfer kullanılarak döküm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonrasında 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 ergiyip sıvı banyoda dağılması sağlanmıştır. Üretilen numuneler ile ilgili veriler Çizelge 3.1 de verilmektedir. Ayrıca bu çalışmada, ön alaşım olarak üretilen Mg-4Sb-2Al nin dökümü ön ısıtılma yapılmamış olan kalıba yapılmış ve soğuk kalıptaki katılaştırmanın mekanik ve mikroyapı üzerine bir tesirinin olup olmayacağı sorusuna cevap aranmıştır. Bu tür soğuk kalıba dökülmüş numune Çizelge 3.1'de ve tartışma bölümünde DKS kısaltması ile ifade edilmiştir.

3.2 Deney Cihaz ve Malzemeleri

Mg-4Sb-2Al alaşımının üretilmesi için saf Mg, Sb ve Al kullanılmıştır. Ergitme işlemi Şekil 3.1’de görüldüğü gibi 15 kW kapasiteli indüksiyon fırınında SiC pota içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 15kW kapasiteli indüksiyon ergitme ocağı

Bu sayede hem yüksek hızlarda ergitme gerçekleşmiş, hem de metalurjik kalite yüksek saflıkta tutulmuştur. Ergitme işlemi gerçekleştirildikten sonra karıştırma işlemi ile homojen karışım elde edilmiştir. Ayrıca ergitmenin indüksiyon ile gerçekleştirilmesi de metal banyosunun daha verimli bir Şekilde karıştırılmasına katkı sağlamıştır. Daha sonra Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 100 Ton kapasiteli soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazında alaşımlar üretilmiştir. Numuneler Şekil 3.3’te görüldüğü gibi 4 adet çekme numunesi ve metalografik inceleme için 1 adet kare kesitli ubuk Şeklinde retilmiştir. Magnezyum esaslı malzemelerin soğuk kamara haznesine dökümü esnasında da oksitlenmenin gerçekleşmemesi için koruyucu atmosfer olarak %98 CO₂ ve %2 SF₆ (sülfür hekzaflorid) karışım gazı kullanılmıştır.



Şekil 3.2 100 ton kapasiteli soğuk kamaralı döküm cihazı



Şekil 3.3 Çekme numuneleri ve metalografik inceleme için 1 adet kare kesitli çubuk

3.3 Mikroyapı İncelemeleri

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

3.4 Mekanik Deneyler

3.4.1 Sertlik deneyi

Üretilen alaşımların makro sertlik deneyleri 31.25/2.5/30 kombinasyonuna sahip Brinell sertlik (HB) skalasında Brooks marka sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm alaşım sınıflarından alınan numuneler 50x50x10mm boyutlarında hazırlanmış ve alaşımların Brinell sertliği, üzerine 31.25 kg'lık yük uygulanarak ve çapı 2.5 mm olan bilye ile ölçülmüştür. Yük 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Her bir alaşım örneğinin sertliği okunan beş değer ortalaması şeklinde alınmıştır. Şekil 3.4'te sertlik deneylerinde kullanılan Brooks marka sertlik cihazı görülmektedir.



Şekil 3.4 Brooks marka sertlik cihazı

3.4.2 Çekme deneyi

Üretilen alaşımların çekme deneyleri RAAGEN marka üniversal 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/dk olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te çekme mukavemeti deneylerinde kullanılan bilgisayarlı çekme cihazı görülmektedir.

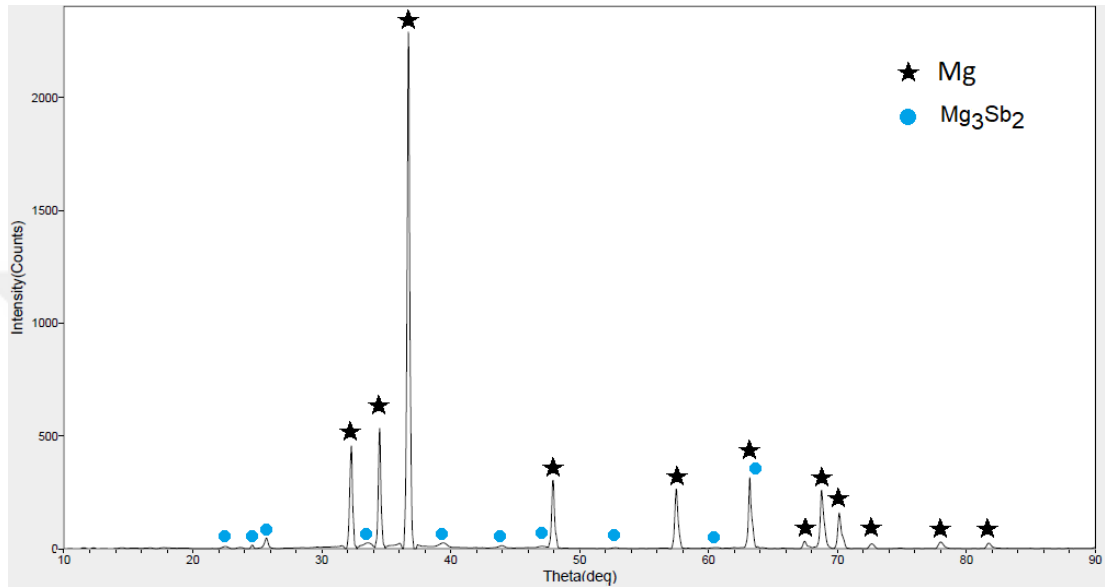


Şekil 3.5 RAAGEN Çekme Cihazı

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 XRD analiz sonuçları

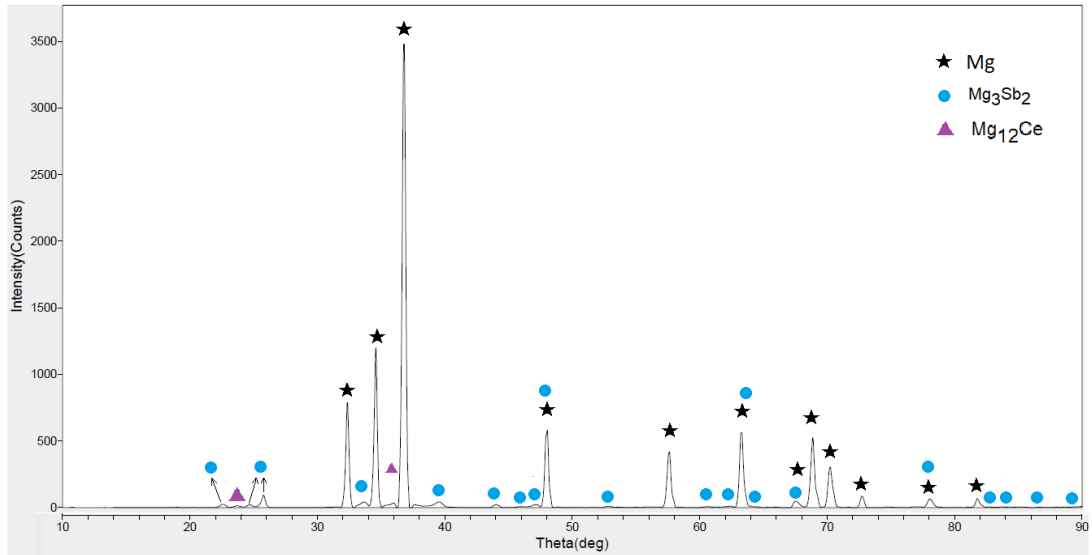
Üretilen tüm döküm alaşımlarının dökülmüş halinin XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri sonuçlarına göre oluşan yeni fazlar aşağıda tartışılmıştır.



Şekil 4.1 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait XRD grafiği

Ana döküm alaşımı olan Mg-4Sb-2Al bileşimindeki alaşımına ait XRD verileri, Şekil 4.1’de verilmektedir. Ana alaşımın Mg ve Mg_3Sb_2 fazlarından oluştuğu anlaşılmıştır. Bu fazlara ait kart numaraları sırası ile (01-089-7195> Mg – Magnesium), (01-071-0404> Mg_3Sb_2 - Magnesium antimonide) şeklindedir. Magnezyuma, alaşım elementi ilavesi bazında en çok tercih edilen element Al’dır. Mg alaşımına ilave edilen Alüminyumun çözünürlüğü oda sıcaklığında ağırlık %2.1 iken ötektik sıcaklık olan $437^{\circ}C$ ’de ağırlık %12.6’dır. Mg-Al alaşımının ötektik kompozisyonu olan ağırlık %32.3 Al ise α -(Mg) ve intermetalik γ fazı olarak bilinen $Mg_{17}Al_{12}$ den oluşmaktadır. Bu yüzden, primer α -(Mg) oluşturabilmek için birçok ticari Mg alaşımının Al içeriği maksimum katı çözünebilirlik sınırının altında tutulmaktadır [33]. Mg alaşımlarının katılaşması sırasında ilave edilen %2 Al oranlarında dahi ötektik kompozisyon olabilmektedir. Bu oluşum denge dışı katılaşma esnasında Scheil eşitliğinden hesaplanabileceği üzere oluşmaktadır. İlave edilen Al alaşımının magnezyumun sünekliğini arttırdığı

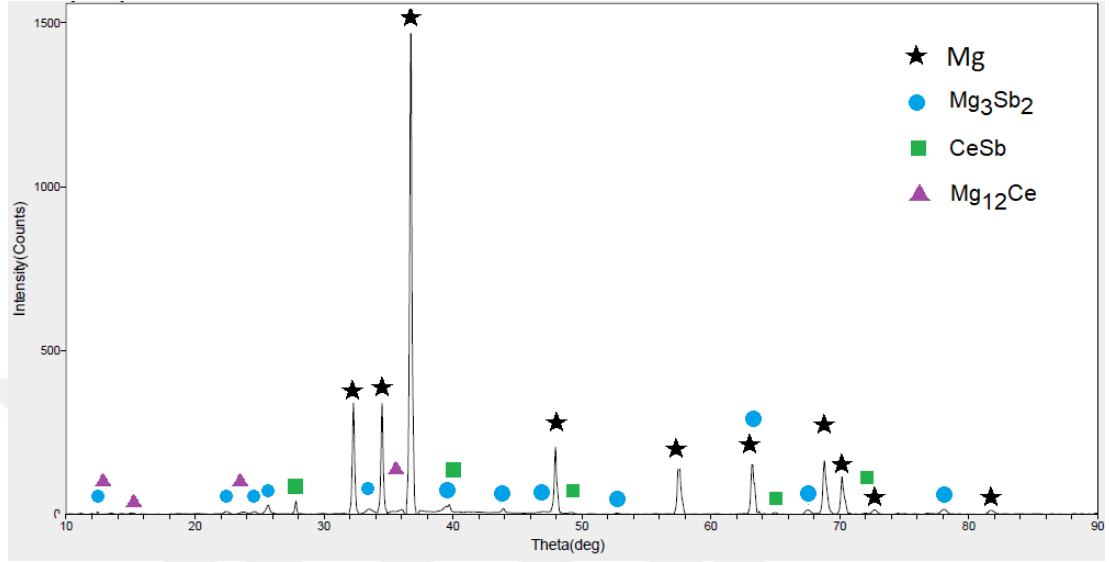
bilinmektedir. Ancak katı çözünebilirlik sınırlarının üzerinde ilave edilen Al, Mg'nin basınçlı dökümde dökülebilirlik özelliğini arttırsa da, oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalığının lamelsi ve kesikli yapısı nedeni ile magnezyumun sünekliğini azaltmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada seçilen %2'lik Al oranı çok kritik bir değer olarak tercih edilmiştir. %2 Al ilave edilse dahi oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliklerinin çok az oranda ve düzgün dağılması nedeni ile çekme deneyi esnasında kırılma tokluğunu düşürecek şekilde bir çentik etkisi yapmamaktadır. Şekil 4.1'de verilen alaşımın XRD analizi incelendiğinde $Mg_{17}Al_{12}$ pikleri ve Al pikleri tespit edilememiştir. Bunun nedeni ilave edilen Al'nin kafes içinde çözünmesi ve oda sıcaklığında kafeste %2 çözünebilirlik limitinin olmasıdır. Bu oranda ilave edilen Al, piklere ait genişliği değiştirebilmekte ancak yeni bir pik olarak ortaya çıkmamaktadır. Öte yandan ilave edilen ağırlık %4 Sb'nin katılma sırasında ayrışarak 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 oluşturmaya meyilli vardır. Nitekim üretilen %4 Sb ilaveli alaşımda Mg metali tercihli olarak Sb ile intermetalik faz yapmıştır[34].



Şekil 4.2 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait XRD grafiği

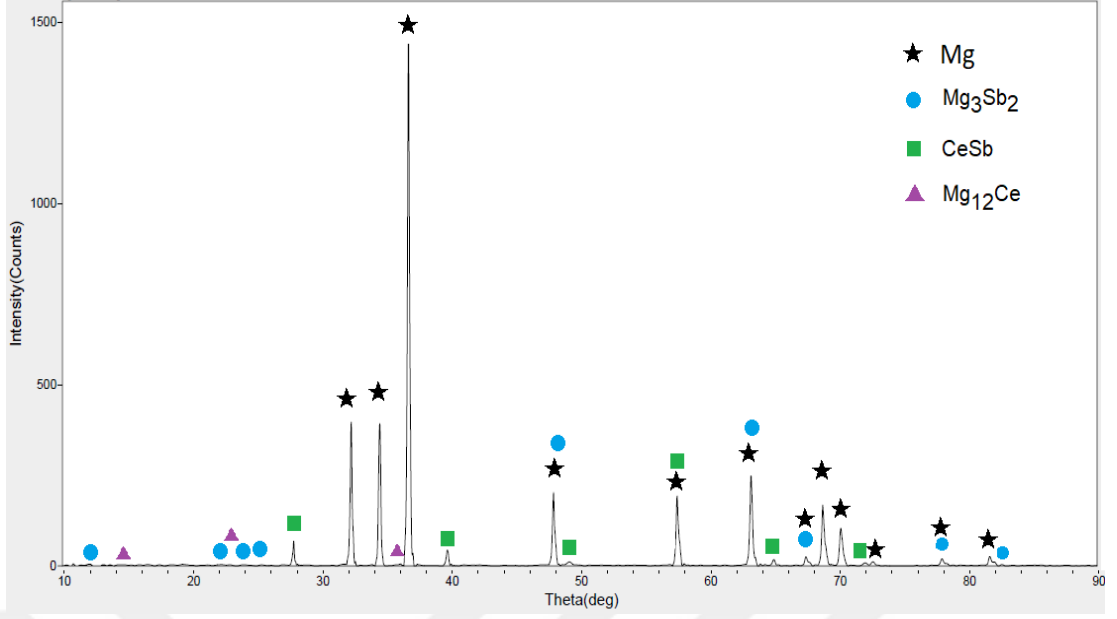
Şekil 4.2'de Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımının XRD analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre Mg_3Sb_2 , $Mg_{12}Ce$ ve Mg fazlarının varlığı tespit edilmiştir. $Mg_{12}Ce$ fazı XRD piklerinde düşük yükseklikte pikler oluşturmaktadır. Bu piklerin detaylı analizi yapılmıştır ve $Mg_{12}Ce$ 'ye yakın değerlerde olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle

literatür incelenmiş ve ilgili 2θ 23-24 derece arasındaki ve 2θ 36 derecedeki piklerin $Mg_{12}Ce$ fazı şeklinde tanımlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle burada $Mg_{12}Ce$ pikinin olduğu düşünülmektedir.



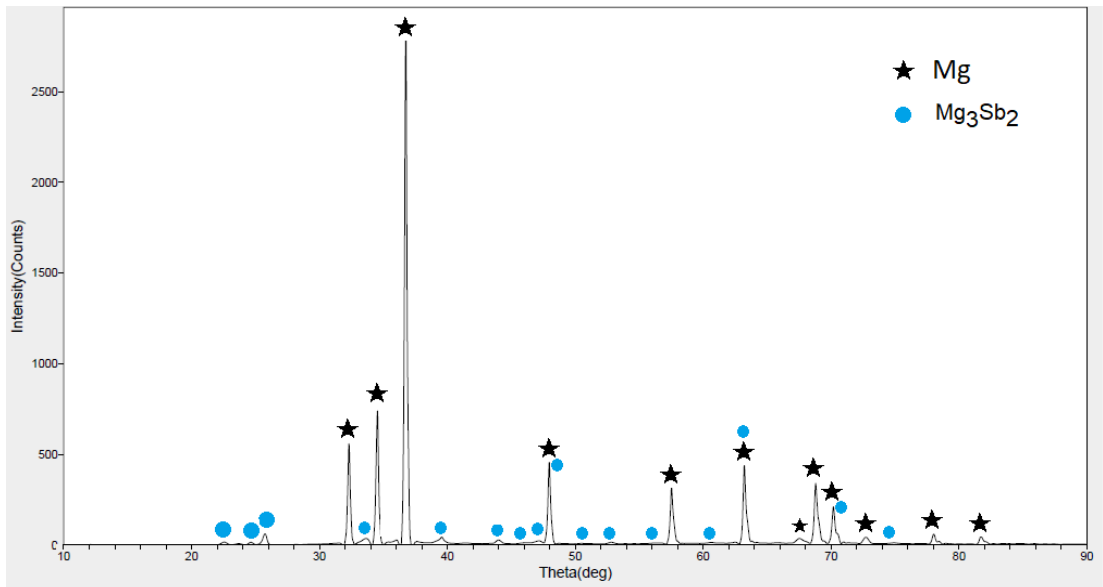
Şekil 4.3 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait XRD grafiği

Şekil 4.3'te 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. Oluşan bu fazlar kafes içinde çözünmemekte ve tane sınırlarında yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle XRD analizinde daha bariz pik şiddetleri vermektedir. İlave edilen Ce oranının artmasına bağlı olarak yüksek ergime sıcaklığına sahip olan CeSb fazının varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca %0.5 Ce ilave edilen alaşıma kıyasla %1 Ce ilave edilen alaşımda ana Mg piklerinin şiddetinin düştüğü, 2θ 28 derecede bağımsız yeni bir CeSb pikinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 2θ 48 derecede ikinci bir CeSb pikinin varlığı tespit edilmiştir. Bu iki pik ile beraber (2θ 38 derecedeki pik gibi) CeSb olarak tanımlanan diğer pikler de CeSb fazının oluştuğunu işaret etmektedir. Bu fazlar XRD grafiğinde gösterilmiştir. Ayrıca ilave edilen Ce oranının artması ile oluşan CeSb fazına ait XRD pik verileri Şekil 4.4'teki analizden daha bariz bir şekilde anlaşılmaktadır. 2θ 38 ve 2θ 65 derecedeki pikler gürültülü bir görüntüden daha bariz bir pik formuna dönüşmüş ve şiddetleri göreceli olarak artış göstermiştir.



Şekil 4.4 Mg-4Sb-2Al-2 Ce alaşımına ait XRD grafiği

Şekil 4.4'te Mg-4Sb-2Al-2 Ce alaşımına ait XRD grafiğinde CeSb fazı aynı 2θ 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 oranlarda oluştuğunun göstergesidir. CeSb fazına ilaveten $Mg_{12}Ce$ fazının da varlığı gürültü formunda tespit edilmiştir. Yani ciddi bir pik şiddet düşüşü gerçekleşmiştir. Artan Ce oranı ile CeSb intermetalığının daha baskın bir yapıda olduğu anlaşılmıştır. Bu durum oluşum serbest enerjisi ile ilgili olabilmektedir.

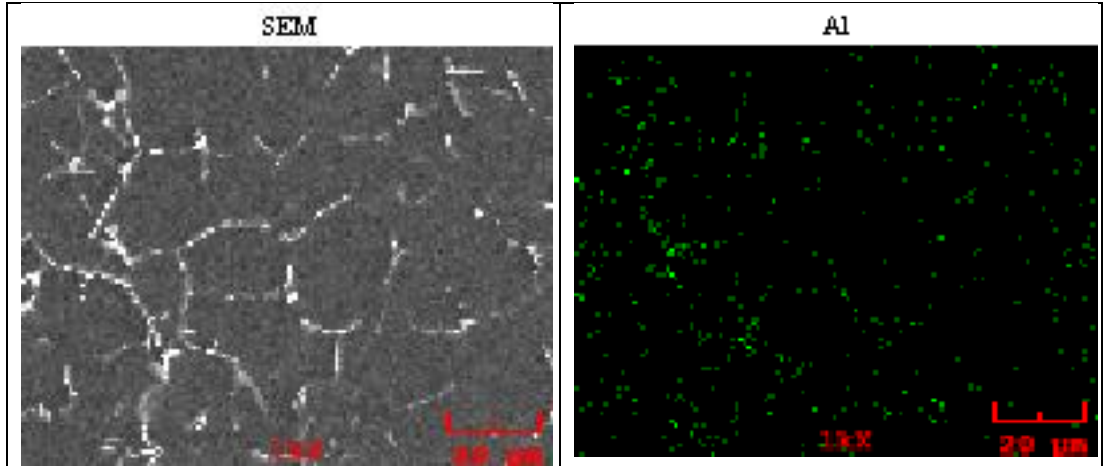


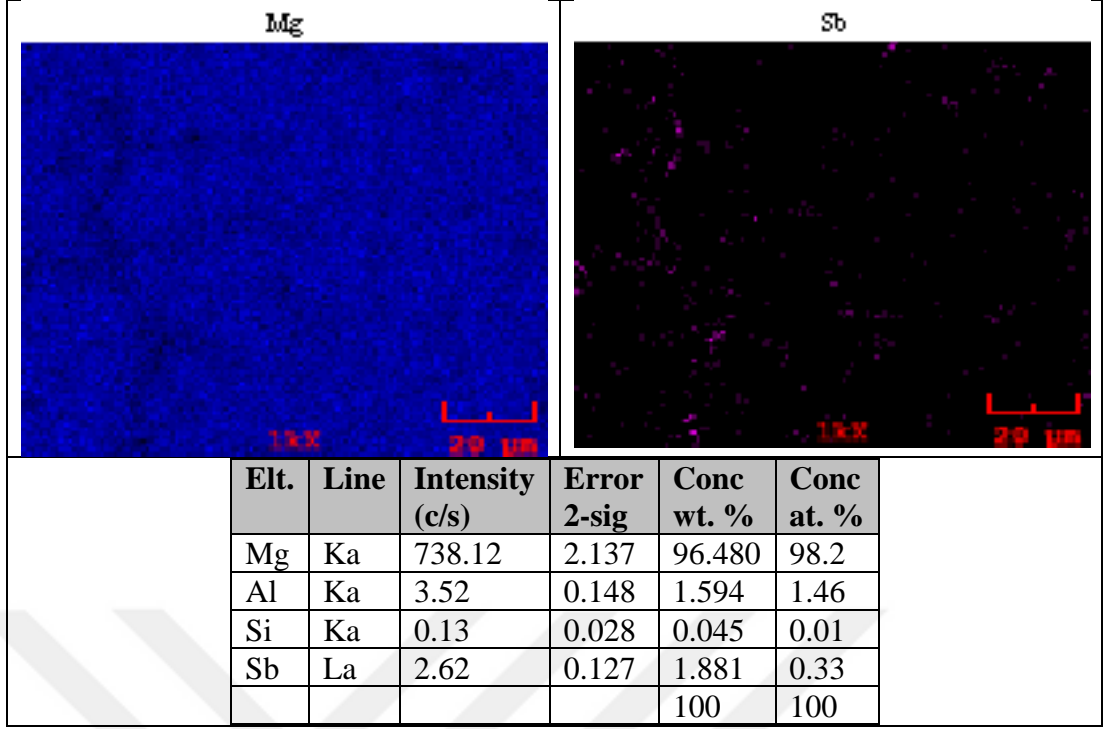
Şekil 4.5 Mg-4Sb-2Al (DKS) alaşımına ait XRD grafiği

Mg-4Sb-2Al (DKS) alaşımına ait XRD grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu alaşım Ce içermemektedir. Şekil 4.1 ile tek farkı daha düşük sıcaklıklara ısıtılan bir kalıba dökülmesidir. Düşük sıcaklığa dökülen numunelerde kalıp sıcaklığı yaklaşık 120°C olup, bu deneme kalıp akışının düşük sıcaklıklarda mümkün olup olmayacağı ve sıcaklığın mekanik özelliklere etki edip etmeyeceği hususunun anlaşılması amacı ile yapılmıştır. Bu alaşıma ait XRD grafiklerinde de α -Mg ve Mg_3Sb_2 fazına rastlanmıştır. Faz analizi bakımından ciddi bir fark bulunamamıştır. Mekanik özellikler ise deneysel çalışmalar bölümünde verilmiştir.



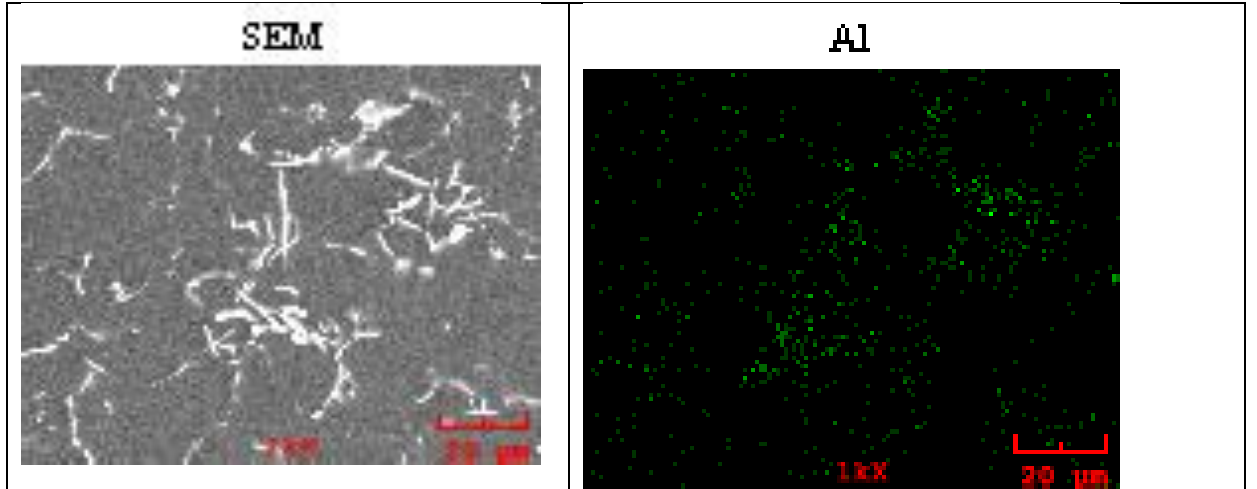
4.2 SEM-MAP Analiz Sonuçları

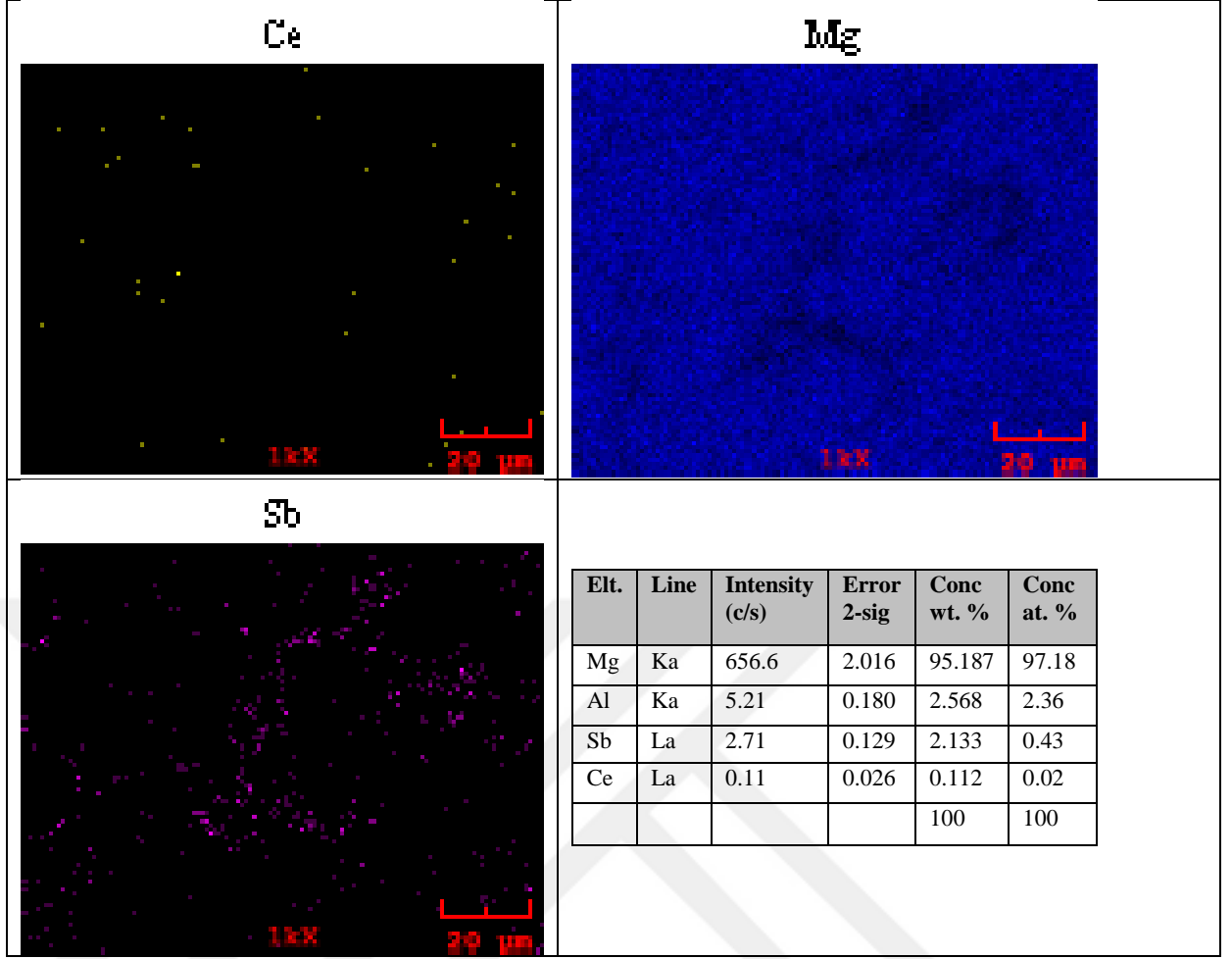




Şekil 4.6 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları

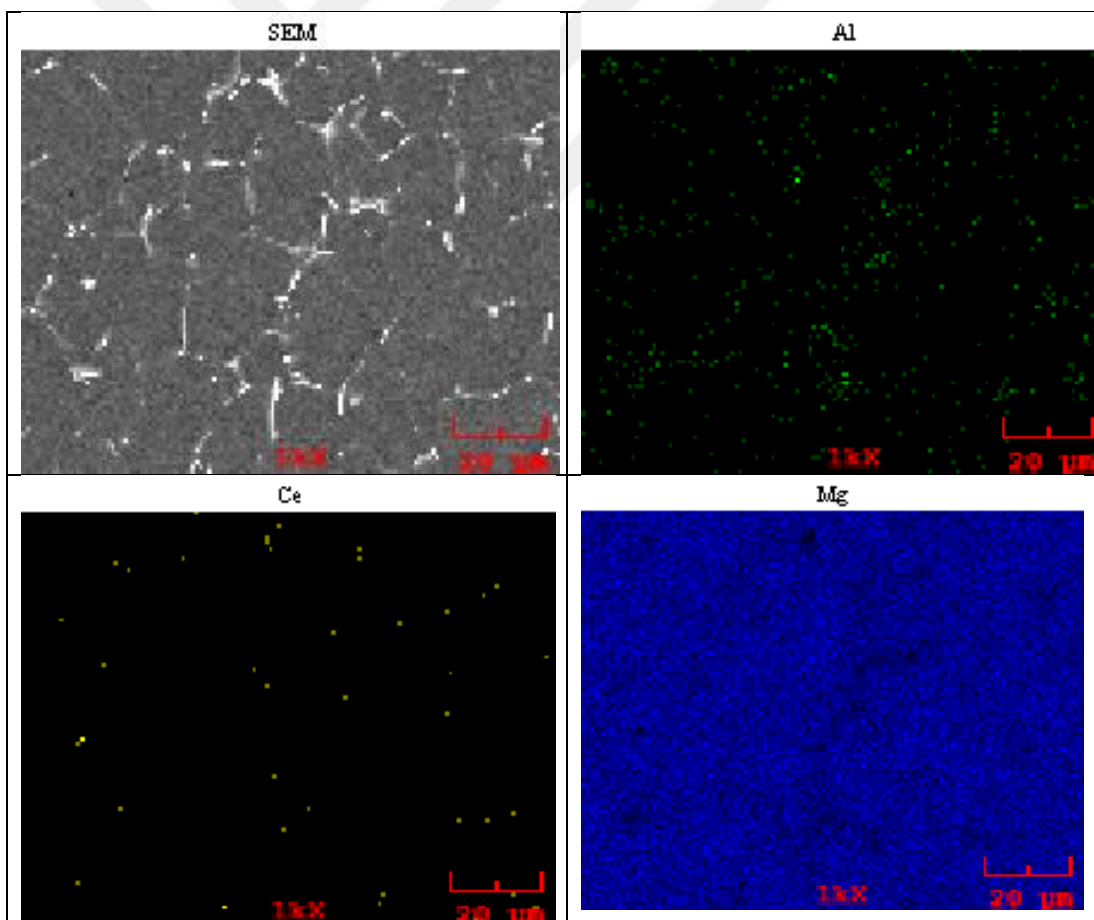
SEM-EDS analizleri, mikroyapıda nasıl bir morfolojide katılma olduğunu tespitini ve intermetalik yapılar oluşup oluşmadığının sonuçlarını vermektedir. Şekil 4.6'da MAP analizi yapılmış, Mg, Al, Sb elementlerinin yapı içerisinde nasıl dağıldığı gösterilmiştir. Mikroyapı fotoğrafına göre Al ve Sb yer yer benzer bölgelerde öbelenmiştir. SEM görüntüsü bu öbelenmiş bölgelerden çekilmiştir. MAP analizleri sonuçlarına göre Al elementi bu öbekler etrafında noktasal olarak saçılmış durumdadır. Benzer etki Sb'de de gözlenmiştir.

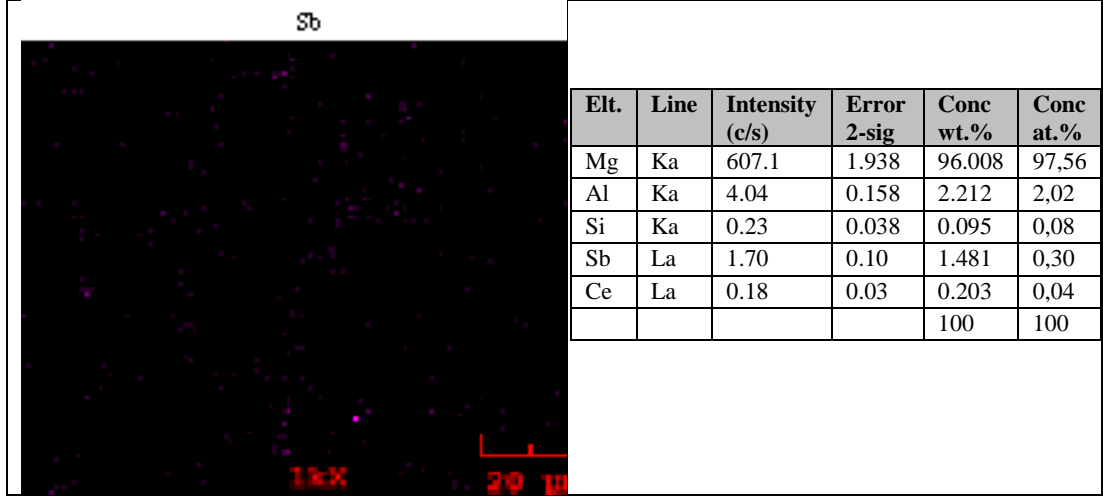




Şekil 4.7 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları

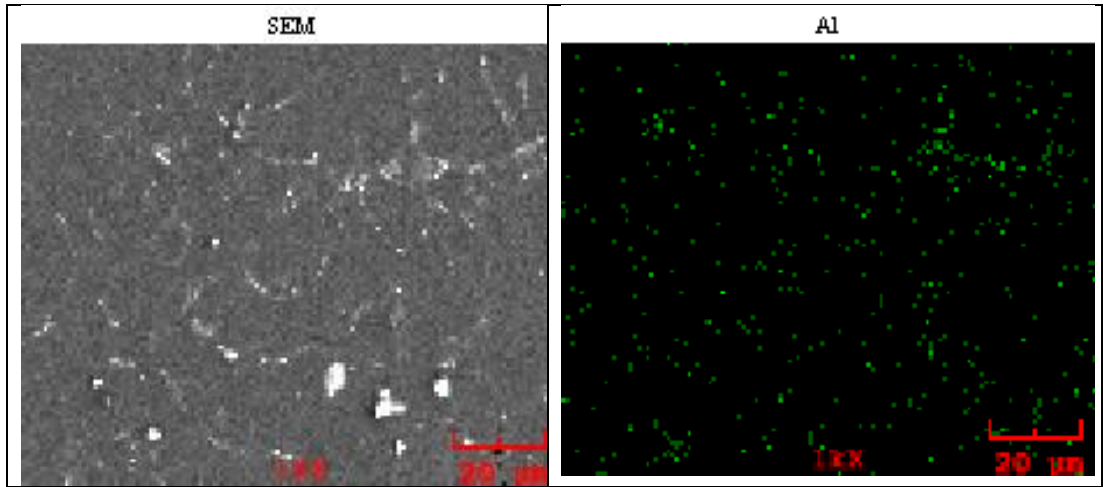
Şekil 4.7’de Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ilave edilen Ce’nin herhangi bir birikme göstermediği, ancak ilave edilen Sb’nin görüntüde beyaz çizgiler şeklinde gösterilen bölgede ve tane içlerinde biriktiği tespit edilmiştir. Ce ilavesinin tane sınırlarında birikmesi beklenen bir sonuçtur, zira Mg içinde Ce’nin çözünürlüğü yoktur. Yani Mg-HCP içinde Ce, atomik olarak herhangi bir kafes noktasına yerleşmemektedir. Ancak tane sınırlarında birikmesi mümkün olmaktadır. Mikroyapı fotoğrafı esas alındığında ve MAP analizi sonuçlarına göre Al ve Sb benzer bölgelerde birikim göstermiştir.

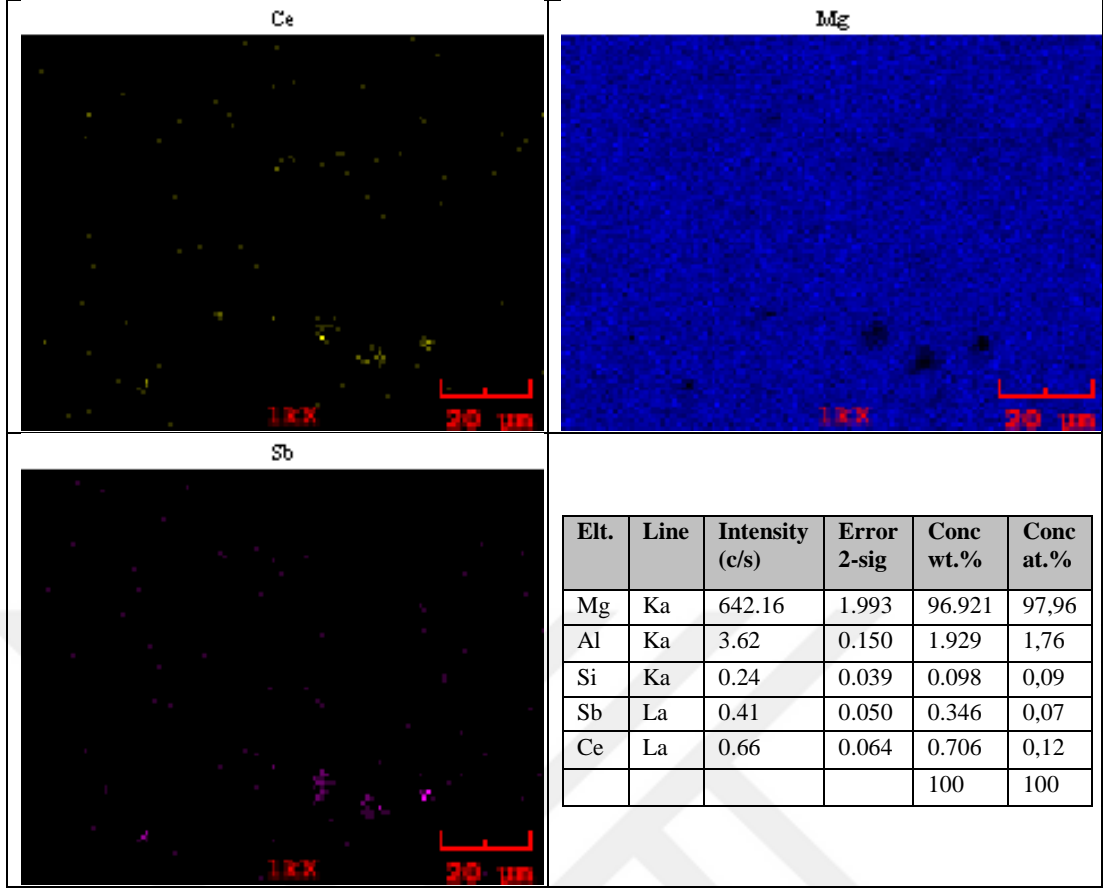




Şekil 4.8 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları

Şekil 4.8'deki mikroyapı daha homojen bir mikroyapının oluştuğunu göstermektedir. Ancak tane sınırlarında beyaz ile gösterilen sınır çizgilerinde Sb ve Al'nin hafif bir birikim yaptığı görülmüştür. Al ile Sb direkt intermetalik tane sınırlarında ve iğnesel yapıda olduğu için ıslatma yok da denilebilir. Ayrıca Sb iğneleri izlerken, Al'nin daha dağınık ve tane içlerinde de Mg'deki çözünürlüğünden dolayı varlığı gözlemlenmiştir. Mg'nin Sb'ye afinitesinin daha yüksek ve faz oluşum sıcaklığının yüksek olması nedeni ile Mg-Sb faz oluşumları daha erken gerçekleşmektedir. Ayrıca tanelerin daha ince yapıda olduğu gözlemlenmiştir, bu durum Ce'nin tane inceltici etkisinin daha belirgin bir hale geldiğine işaret etmektedir.

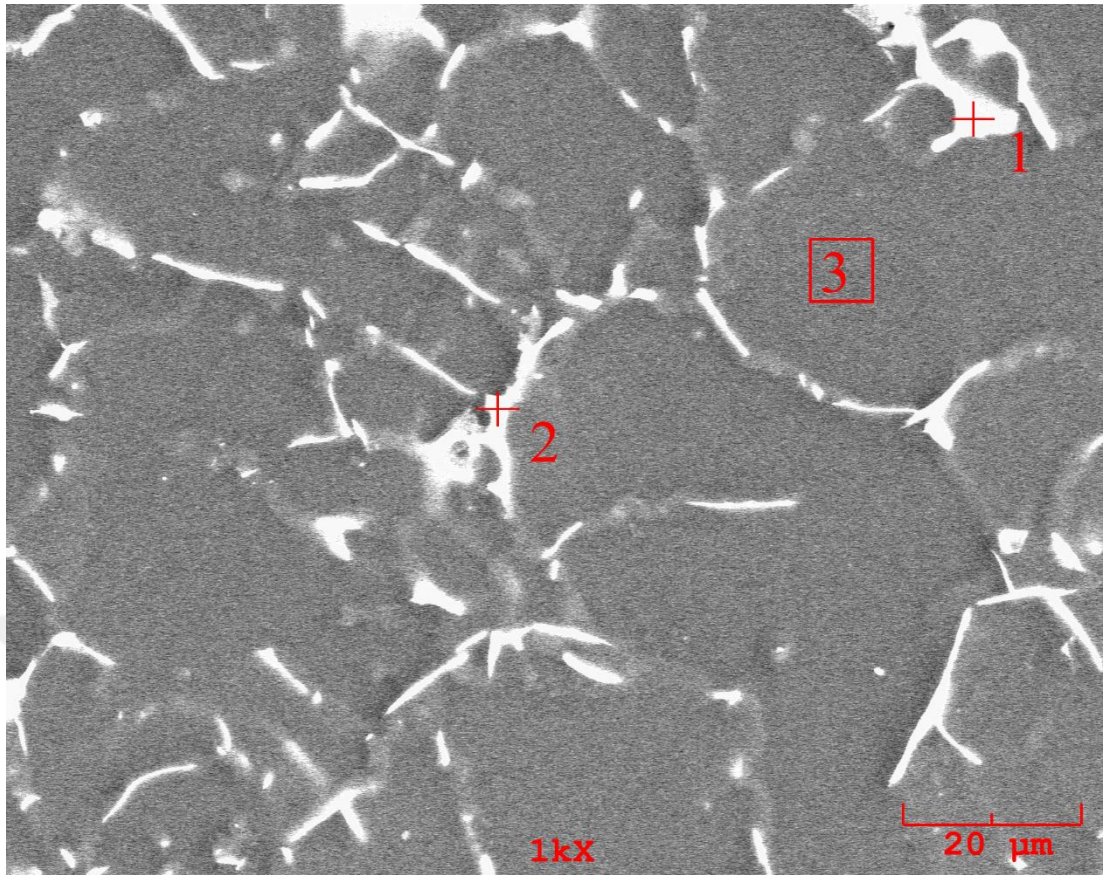




Şekil 4.9 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM alan analiz sonuçları

Sekil 4.9'da ilave edilen Ce oranının %2'ye erişmesine bağı olarak, artık mikroyapı içinde farklı morfolojide yeni bir intermetalik formunun oluştuğı görülmektedir. Küresel formda olan bu intermetalik alanda daha çok Ce ve Sb görüntülerinde yoğunlaşma olduğu tespit edilmiştir.

4.3 SEM-EDS analiz sonuçları

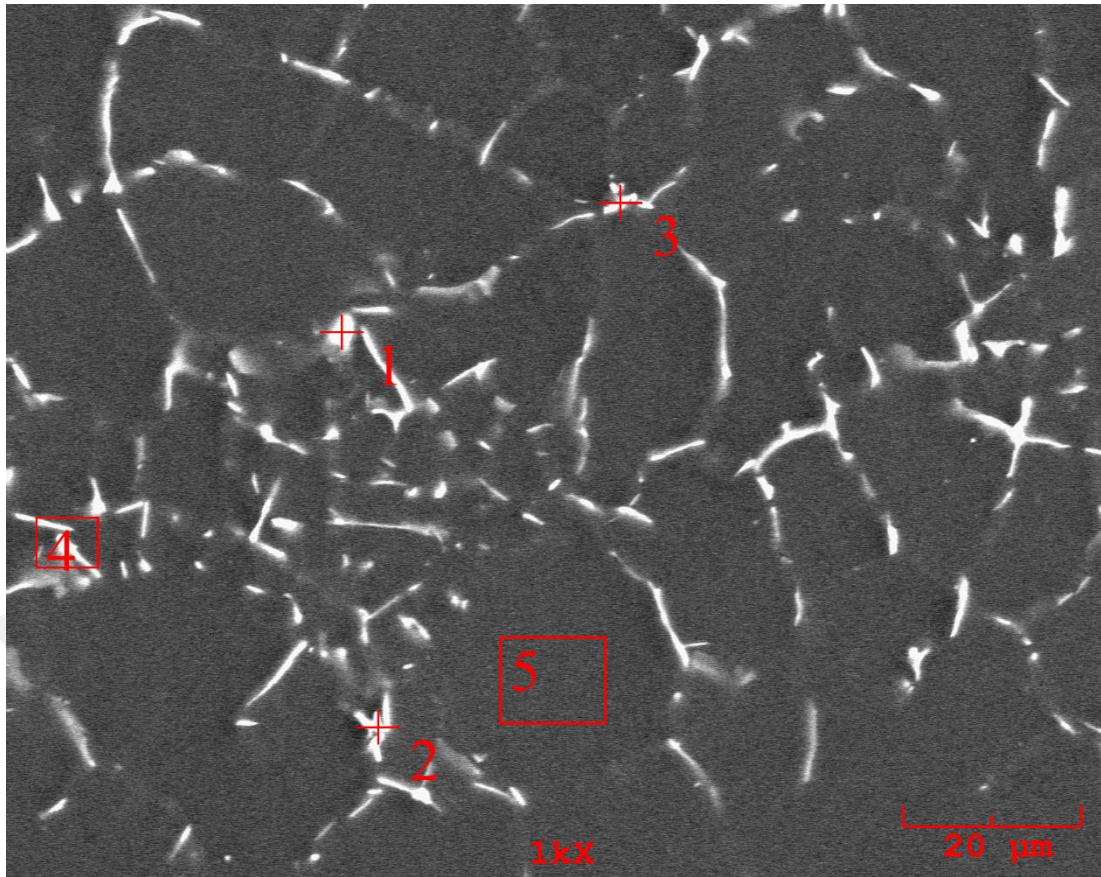


| | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
|-----------------|------|------|-----------------|-------------|------------|------------|
| Analiz 1 | Mg | Ka | 703.32 | 16.770 | 87.584 | 94,7707 |
| | Al | Ka | 9.57 | 1.956 | 3.351 | 3,265789 |
| | Sb | La | 15.47 | 2.487 | 9.065 | 1,957577 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |
| | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
| Analiz 2 | Mg | Ka | 678.08 | 16.464 | 82.107 | 92,97246 |
| | Al | Ka | 12.45 | 2.231 | 3.751 | 3,825477 |

| | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|----------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | Sb | La | 27.31 | 3.304 | 14.142 | 3,195852 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 3 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 1,000.28 | 19.999 | 98.578 | 99,389 |
| | Al | Ka | 1.29 | 0.719 | 0.459 | 0,417 |
| | Sb | La | 1.75 | 0.835 | 0.964 | 0,194 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

Şekil 4.10 Mg-4Sb-2Al alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları

Mikro yapıdaki dağılım incelenmesini takiben yapılan nokta analizleri elementel yığılmaların olduğu bölgeleri tespit etmek için kullanılmıştır. Şekil 4.10’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. Burada AlSb intermetaliti oluşma ihtimali bulunmaktadır. 3 numaralı analiz ise tane içinden alınmış olup, α -Mg içinde ağ. %0.459 Al ve %0.964 Sb elementleri bulunmuştur. Bu durum ilave edilen alaşım elementlerinin tane içinde çözüldüğünü ortaya koymuştur.

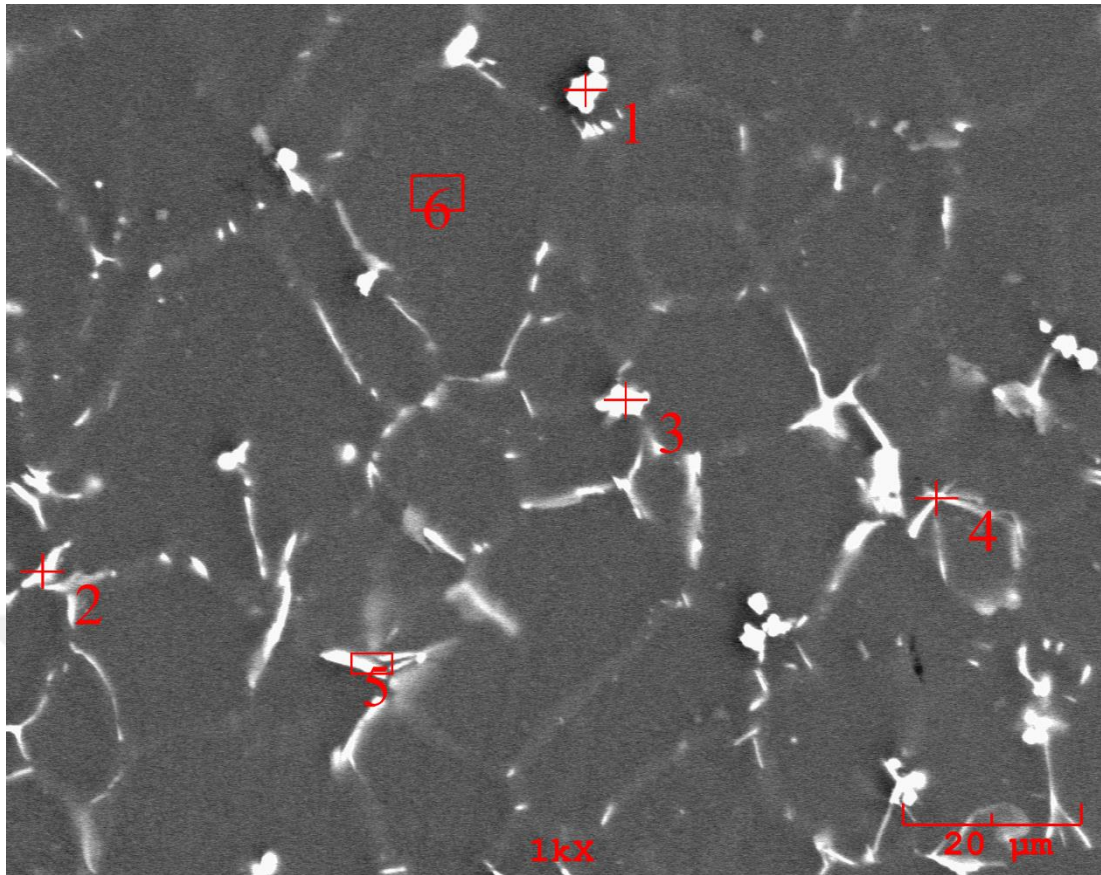


| | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Analiz 1 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 634.77 | 15.929 | 82.272 | 92,87681 |
| | Al | Ka | 12.31 | 2.219 | 3.999 | 4,066034 |
| | Sb | La | 22.46 | 2.996 | 12.511 | 2,8187 |
| | Ce | La | 1.63 | 0.807 | 1.218 | 0,238456 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 2 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 742.04 | 17.225 | 87.933 | 93,5412 |
| | Al | Ka | 15.16 | 2.462 | 5.256 | 5,035826 |
| | Sb | La | 10.28 | 2.027 | 5.984 | 1,270411 |
| | Ce | La | 1.09 | 0.659 | 0.827 | 0,152568 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 3 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 675.60 | 16.437 | 82.055 | 92,66988 |
| | Al | Ka | 13.84 | 2.353 | 4.204 | 4,276225 |
| | Sb | La | 23.55 | 3.069 | 12.285 | 2,76892 |
| | Ce | La | 2.08 | 0.912 | 1.455 | 0,284972 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |

| Analiz 4 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
|----------|------|------|-----------------|-------------|-----------|-----------|
| | Mg | Ka | 824.63 | 18.162 | 88.842 | 94,35158 |
| | Al | Ka | 13.94 | 2.361 | 4.436 | 4,243134 |
| | Sb | La | 11.35 | 2.131 | 6.022 | 1,27636 |
| | Ce | La | 1.01 | 0.635 | 0.700 | 0,128924 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 5 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 1,033.90 | 20.329 | 98.700 | 99,48119 |
| | Al | Ka | 1.13 | 0.671 | 0.388 | 0,352225 |
| | Sb | La | 0.51 | 0.451 | 0.272 | 0,054713 |
| | Ce | La | 0.94 | 0.612 | 0.640 | 0,111869 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |

Şekil 4.11 Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları

Şekil 4.11’de ilave edilen %0.5 Ce ile üretilen Mg-4Sb-2Al-0.5Ce alaşımının görüntüleri verilmiştir. Görüntü ve EDS analizleri eşleştirildiğinde iki farklı intermetalik formunun oluştuğu ve bunların farklı oranlarda elementler içerdiği 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.



| | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Analiz 1 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 202.99 | 9.009 | 40.180 | 77,236 |
| | Al | Ka | 3.69 | 1.214 | 0.943 | 1,6326 |
| | Sb | La | 64.56 | 5.081 | 29.913 | 11,475 |
| | Ce | La | 44.58 | 4.222 | 28.964 | 9,6555 |
| | | | | Total | 100.00 | 100.00 |
| Analiz 2 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 598.40 | 15.467 | 78.182 | 92,14 |
| | Al | Ka | 11.16 | 2.113 | 3.319 | 3,52 |
| | Sb | La | 34.57 | 3.717 | 17.902 | 4,21 |
| | Ce | La | 0.84 | 0.580 | 0.597 | 0,12 |
| | | | | Total | 100.00 | 100.00 |
| Analiz 3 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 94.31 | 6.141 | 24.287 | 62,57 |
| | Al | Ka | 2.15 | 0.926 | 0.612 | 1,42 |
| | Sb | La | 69.68 | 5.279 | 36.357 | 18,69 |
| | Ce | La | 52.28 | 4.573 | 38.745 | 17,31 |
| | | | | Total | 100.00 | 100.00 |

| Analiz 4 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
|----------|------|------|-----------------|-------------|------------|------------|
| | Mg | Ka | 742.70 | 17.233 | 88.637 | 95,822 |
| | Al | Ka | 6.79 | 1.647 | 2.299 | 2,238 |
| | Sb | La | 15.18 | 2.464 | 8.512 | 1,836 |
| | Ce | La | 0.74 | 0.545 | 0.552 | 0,103 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

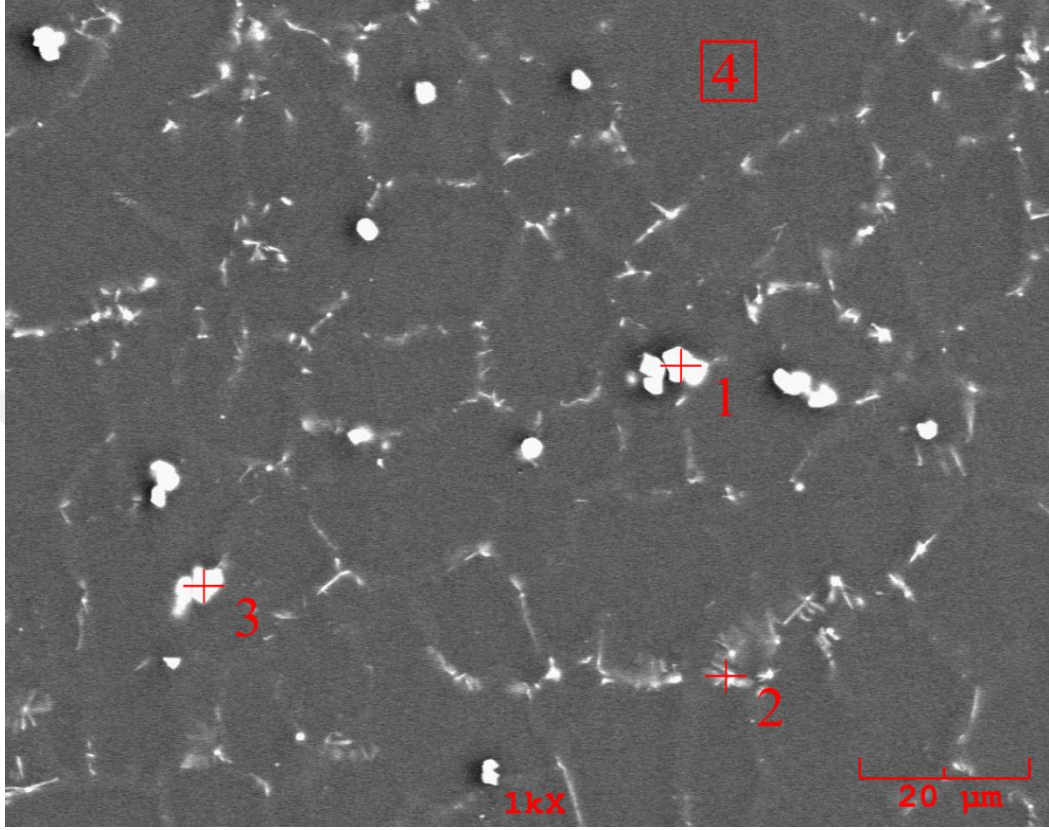
| Analiz 5 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
|----------|------|------|-----------------|-------------|------------|------------|
| | Mg | Ka | 626.58 | 15.825 | 83.567 | 92,933 |
| | Al | Ka | 12.79 | 2.261 | 4.427 | 4,434 |
| | Sb | La | 18.44 | 2.714 | 10.910 | 2,421 |
| | Ce | La | 1.39 | 0.745 | 1.096 | 0,211 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

| Analiz 6 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
|----------|------|------|-----------------|-------------|------------|------------|
| | Mg | Ka | 966.56 | 19.659 | 98.045 | 99,257 |
| | Al | Ka | 1.49 | 0.771 | 0.535 | 0,488 |
| | Sb | La | 0.43 | 0.414 | 0.241 | 0,049 |
| | Ce | La | 1.65 | 0.812 | 1.179 | 0,207 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

Şekil 4.12 Mg-4Sb-2Al-1Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları

%1 Ce ilave edilen alaşımda elips yapılar daha bariz gözlenmiş ve yine çubuksal (needle) Sb içeren intermetalikler tespit edilmiştir. Analiz 1 ve 3’de elips formunda CeSb intermetalığı tespit edilmiştir. Analiz 2 ve 4 de ise Mg₃Sb₂ intermetalığı (çubuk ve plaka formunda) tespit edilmiştir. Burada EDS analizinde görünün Al’nin ise Mg₁₇Al₁₂ 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 katılaşma esnasında daha fazla alaşım elementi tüketmiştir. Oluşan bu intermetalikler ekseriyetle tane sınırlarında birikmiştir. Mg-Sb ve Mg-Al alaşımlarının ötektik noktalarının sırası ile 629°C ve 437°C derece olduğu göz önüne alınırsa ilk katılaşarak α-Mg fazından sonra olan intermetalığın Mg₃Sb₂ olması beklenmektedir. Bu durum ilk kristal çekirdeklerinin Mg₃Sb₂ intermetalığından 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 etkidedir.

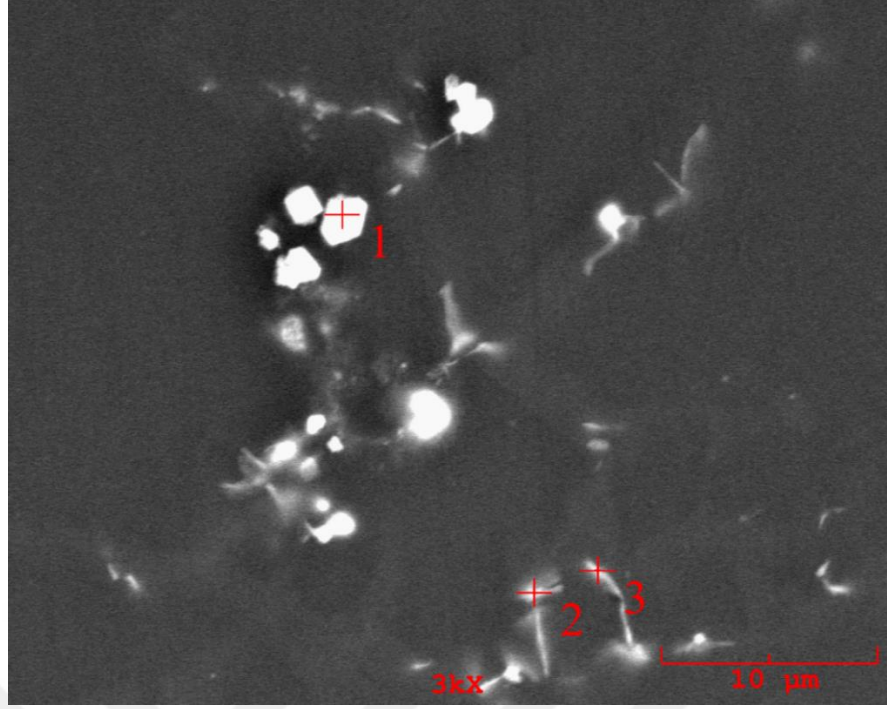


| | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
|----|-----------------|------|--------------------|----------------|--------------|--------------|
| | Analiz 1 | Mg | Ka | 243.60 | 9.867 | 36.785 |
| Al | | Ka | 7.33 | 1.711 | 1.385 | 2,518 |
| Sb | | La | 87.94 | 5.928 | 30.212 | 12,170 |
| Ce | | La | 65.72 | 5.125 | 31.618 | 11,067 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |
| | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Analiz 2 | Mg | Ka | 618.48 | 15.726 | 74.251 |
| Al | | Ka | 18.85 | 2.746 | 4.880 | 5,332 |
| Sb | | La | 14.85 | 2.437 | 6.651 | 1,610 |
| Ce | | La | 24.37 | 3.122 | 14.218 | 2,991 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

| Analiz 3 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
|----------|------|------|-----------------|-------------|-----------|-----------|
| | Mg | Ka | 114.59 | 6.768 | 24.652 | 62,502 |
| | Al | Ka | 4.50 | 1.341 | 1.077 | 2,459 |
| | Sb | La | 81.83 | 5.719 | 35.914 | 18,172 |
| | Ce | La | 61.60 | 4.962 | 38.358 | 16,866 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 4 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt.% | Conc at.% |
| | Mg | Ka | 1,065.13 | 20.639 | 97.768 | 98,920 |
| | Al | Ka | 2.86 | 1.069 | 0.930 | 0,847 |
| | Sb | La | 0.33 | 0.363 | 0.167 | 0,034 |
| | Ce | La | 1.75 | 0.836 | 1.135 | 0,199 |
| | | | | Total | 100.000 | 100.000 |

Şekil 4.13 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları

Şekil 4.13'te verilen Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımında Ce ilavesinin etkisi bariz bir şekilde görülmektedir. Elips formundaki CeSb fazların sayısı artmıştır. Ayrıca daha önce verilen XRD grafiklerinde de bu durum piklerin şiddetinin artması ve gürültülerin kaybolması şeklindedir. 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 sünekliği olumlu yönde etkiyeceğini akla getirmektedir. Bir diğer yaklaşım ise 4 numaralı paneldeki analiz sonuçlarına göre $(Mg,Al)_3Sb_2$ formunda birbirini içinde kısmi çözünen intermetaliklerin oluşma olasılığıdır. Öte yandan tane içinden alınan analizde Al oranı %0.847 olarak ölçülmüştür. Buradaki alüminyum oranı ilave edilen %0,5, %1 Ce oranlı alaşımların tane içlerinden alınan analiz değerlerine göre daha yüksek değerdedir. Bu durum teknik açıdan istenilen bir durumdur, zira tane içerisinde kalan alüminyum, sünekliği arttırırken tane sınırlarına yayılan alaşım elementleri ise oluşturdukları intermetalik yapılar aracılığı ile dislokasyon pin etkisi yaparak, şayet yüksek sıcaklıklarda kullanılacaksa tane sınırlarının kaymasını önleyerek ciddi bir mühendislik fayda sağlayacaktır. %2 oranında Ce ilave edilmesine karşın sünekliğin artmasındaki ana mekanizmanın bu olduğu düşünülmektedir.

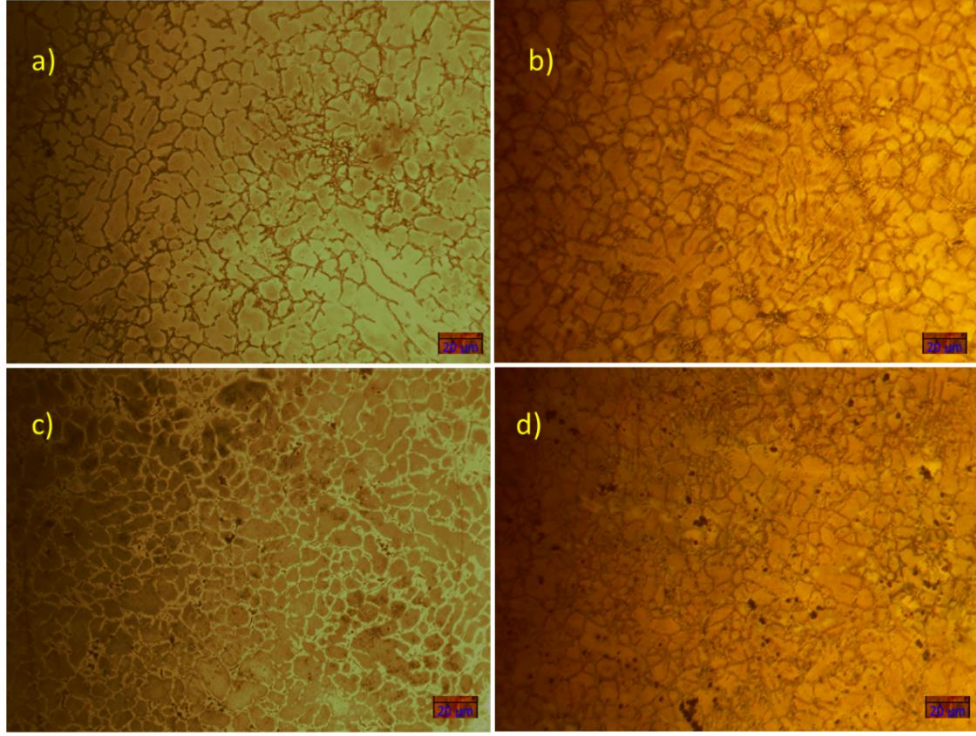


| Analiz 1 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
|----------|------|------|-----------------|-------------|------------|------------|
| | Mg | Ka | 316.28 | 11.247 | 56.193 | 86,412 |
| | Al | Ka | 3.52 | 1.187 | 0.984 | 1,363 |
| | Sb | La | 40.68 | 4.034 | 20.022 | 6,145 |
| | Ce | La | 34.01 | 3.688 | 22.801 | 6,081 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 2 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
| | Mg | Ka | 673.08 | 16.403 | 79.291 | 86,363 |
| | Al | Ka | 39.48 | 3.973 | 12.220 | 11,988 |
| | Sb | La | 2.92 | 1.081 | 1.614 | 0,351 |
| | Ce | La | 9.74 | 1.974 | 6.875 | 1,299 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |
| Analiz 3 | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc wt. % | Conc at. % |
| | Mg | Ka | 859.99 | 18.545 | 87.780 | 91,014 |
| | Al | Ka | 28.30 | 3.364 | 8.968 | 8,375 |
| | Sb | La | 1.78 | 0.844 | 0.961 | 0,199 |
| | Ce | La | 3.33 | 1.153 | 2.291 | 0,412 |
| | | | | | 100.000 | 100.000 |

Şekil 4.14 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları (3kX büyütme)

Şekil 4.14'te Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımına ait SEM-EDS nokta analizi sonuçları, 3000X büyütme yapılarak gösterilmiştir. Analiz 1; CeSb intermetalliğini göstermektedir. Analiz 1'deki ağırlıkça yüzde değerleri atomik yüzdeye dönüştürülecek olursa; Mg, Al, Sb, Ce elementlerinin atomik bulunma yüzdeleri sırası ile 86,41- 1,36 - 6,14- 6,08 şeklindedir. Burada atomik olarak Sb ve Ce'nin yaklaşık olarak birebir eşlemesi CeSb intermetalliği ile örtüşmektedir. CeSb intermetalliği oluşumu ile birlikte ilave edilen Ce'nin Mg₁₂Ce intermetalliğini oluşturduğu düşünülmektedir. XRD analizlerinde bu fazdan bahsedilmiş ve düşük şiddetli pikler ile uyum göstermiştir. Ancak EDS analizlerinde CeSb fazları arasındaki atomik oran Analiz 2'de farklılık arz etmektedir. Burada fazla Ce olduğu görülmektedir. Bu Ce'nin Mg ile intermetalik yapma eğilimi vardır. Fusheng ve arkadaşları Mg-3Sn-1 Mn alaşımına ağırlıkça %0,87 Ce ilave etmiş ve SEM analizlerinde Mg₁₂Ce intermetalliğini tespit etmişlerdir. Fusheng'in yaptığı çalışmadaki Mg₁₂Ce intermetalliğine ait görüntü Şekil 4.13'teki Analiz 2 ve Şekil 4.14'teki Analiz 2 ile çok benzerlik göstermektedir. Benzer şekilde yapığımız XRD çalışmalarında 28-32 derece arasında tespit edilen düşük şiddetli piklerin de Mg₁₂Ce intermetalliğine ait olduğu düşünülmektedir [35].

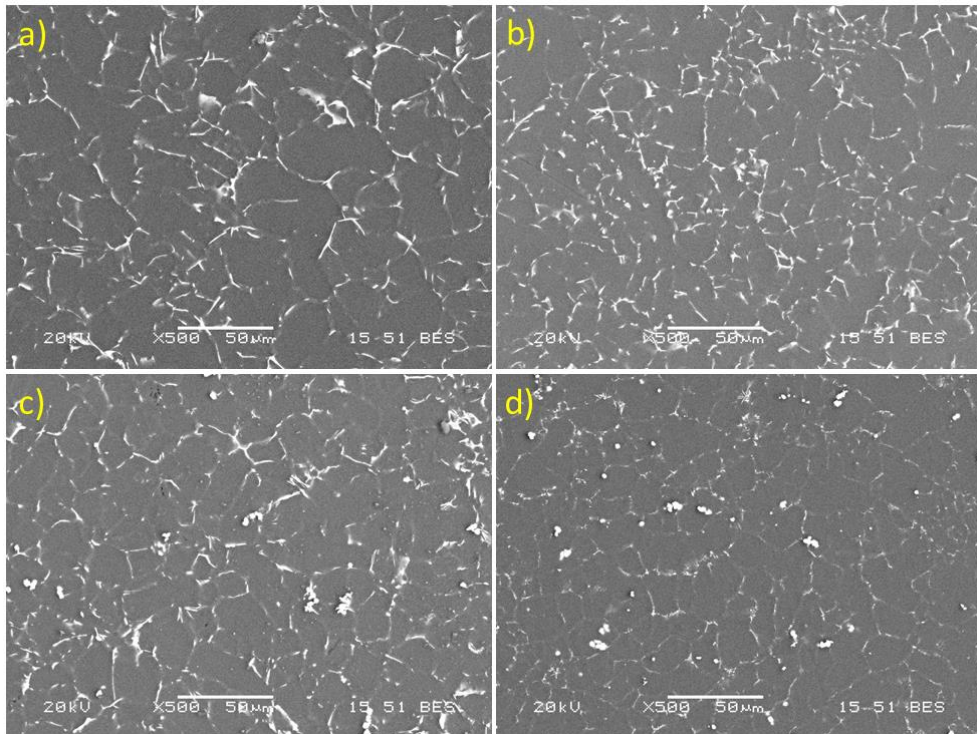
4.4 Optik ve SEM Mikroskop ve Tane Boyut İncelemeleri



Şekil 4.15 Optik mikroskop görüntüleri a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce, c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce

Şekil 4.15'te verilen ve eşdeğer büyütmede çekilen optik mikroskop görüntüleri, ana alaşıma ilave edilen Ce'nin tane inceltmede efektif olduğunu göstermektedir. Ancak ana alaşım olan Mg-4Sb-2Al değerlendirilecek olursa, ilave edilen Al'nin matris içinden ayrılarak tane sınırlarında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalliğini oluşturmasıdır. Fakat bu tür alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması söz konusu ise, Al'nin düşük ergime sıcaklığı ve Mg içindeki yüksek difüzyon katsayısı nedeni ile interdendritik bölgelerde kabalaşma meyilinin olduğu vurgulanmalıdır. Bu durum $125^{\circ}C$ üzerindeki sıcaklıklarda sürünme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda RE ilavesinin bu tür alaşımlarda oluşan intermetaliklerin termal stabilitesini artırdığı gözlenmiştir. 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-MAP çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde ilave edilen Sb'nin Mg içinde çözünürlüğünün olmamasına bağlı olarak matris tane içinden ötektik ayrışma reaksiyonu sonucunda dendritler arasındaki tane sınırları boyunca dağıldığı anlaşılmaktadır. Bu ayrışma sonucunda dendritler arası

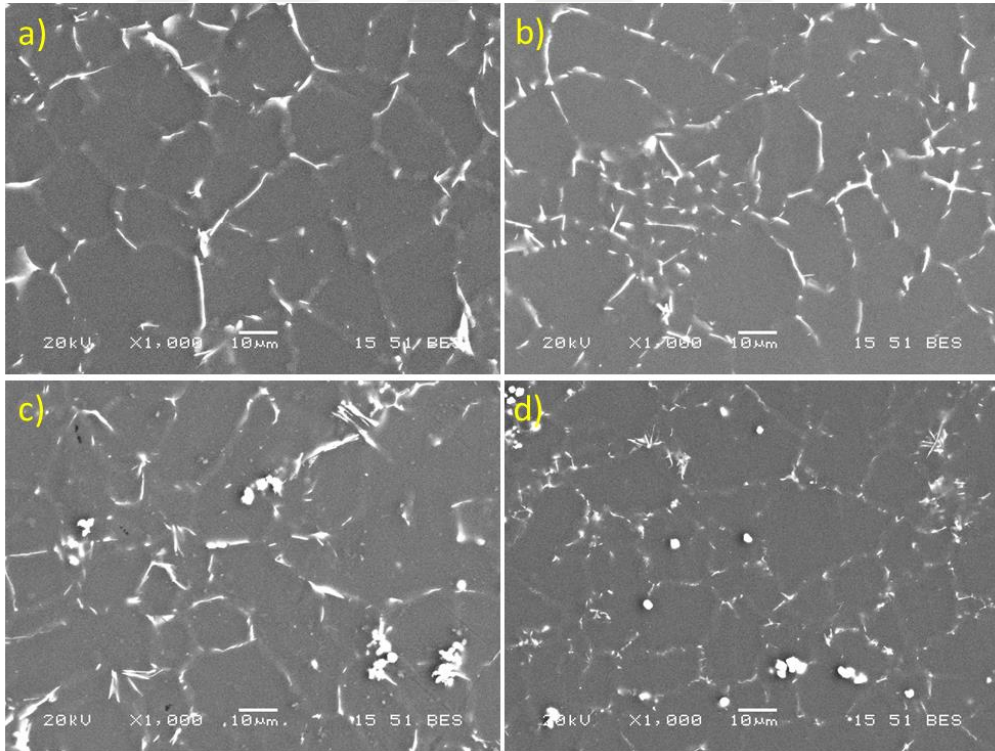
sınırdaki Mg_3Sb_2 fazı birikmektedir. Sb'nin %4'ten fazla ilave edilmesi sonucunda tane kabalaşmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda ilave edilen Sb, Çin yazısı ifadesi ile tabir edilen mikroyapıyı düzenlemektedir. Sb'nin bir diğer etkisi tane yapısını inceltmesidir. Bu durum oda sıcaklığında dahi mekanik özelliklerin artmasını sağlamaktadır[26]. $650^{\circ}C$ 'de α -Mg katılaşmaktadır, bu sıcaklık magnezyumun ergime sıcaklığı olup, ilave edilen Sb miktarına göre, alaşımın katılaşma sıcaklığı düşmektedir. Ağırlıkça %39.4 Sb içeren Mg alaşımı ötektik sıcaklıkta olup, içerisinde %4 Sb olması durumunda da denge dışı katılaşmaya bağlı olarak içerisinde ötektik fazlar içermektedir. Mg-Sb faz diyagramına göre oluşması muhtemel faz Mg_3Sb_2 olup bu faz XRD ile tespit edilmiştir. Ancak alaşıma ilave edilen Ce'nin oluşturması muhtemel bir diğer intermetalik ise $Mg_{12}Ce$ olup bu intermetalik oluşma sıcaklığı ise ($L_1 \rightarrow \alpha$ -Mg + $Mg_{12}Ce$) reaksiyonu ile gerçekleşmekte ve Mingbo Yang ve arkadaşlarının yaptığı DSC çalışmasına göre dönüşümün $580^{\circ}C$ 'de ikili ötektik reaksiyonu gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır [37]. Buna göre katılaşmada önce α -Mg, daha sonra Mg_3Sb_2 ve daha sonrada $Mg_{12}Ce$ ayrışması gerçekleşmektedir. Şekil 4.16'da üretilen alaşımların eşit büyütmeye çekilen SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntüler optik mikroskop görüntüleri ile uyum içinde olup, ilave edilen Ce ile tane yapısı incelmıştır.



Şekil 4.16 SEM görüntüleri a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce,

c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce

Şekil 4.17’de ise yine 4 farklı alaşımın 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmektedir. Bu sayede tane sınırı oluşumları daha bariz bir detay bilgisi verecektir. Şekil 4.17 de a) ile verilen ana alaşımın tane boyutunun diğerlerine oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Görüntüde tane sınırlarında Sb’nin Mg ile oluşturduğu intermetalik yapının mevcudiyeti anlaşılmaktadır. İlave edilen Ce oranına bağlı olarak daha ince taneli bir yapının olduğu anlaşılmaktadır. Yine mikroyapıda yer yer $Mg_{12}Ce$ intermetalik yapıları ve yoğunlukla CeSb intermetaliklerinin olduğu tespit edilmiştir. Artan Ce oranına göre oluşan CeSb intermetaliklerinin elips formunda olduğu tespit edilmiştir. $Mg_{12}Ce$ ’nin ise tane sınırlarında ve kavşaklarda, çubuk ve iğne formunda olduğu, yer yer iğnelerin yan yana gelerek bir tarak şeklini aldığı gözlemlenmiştir.



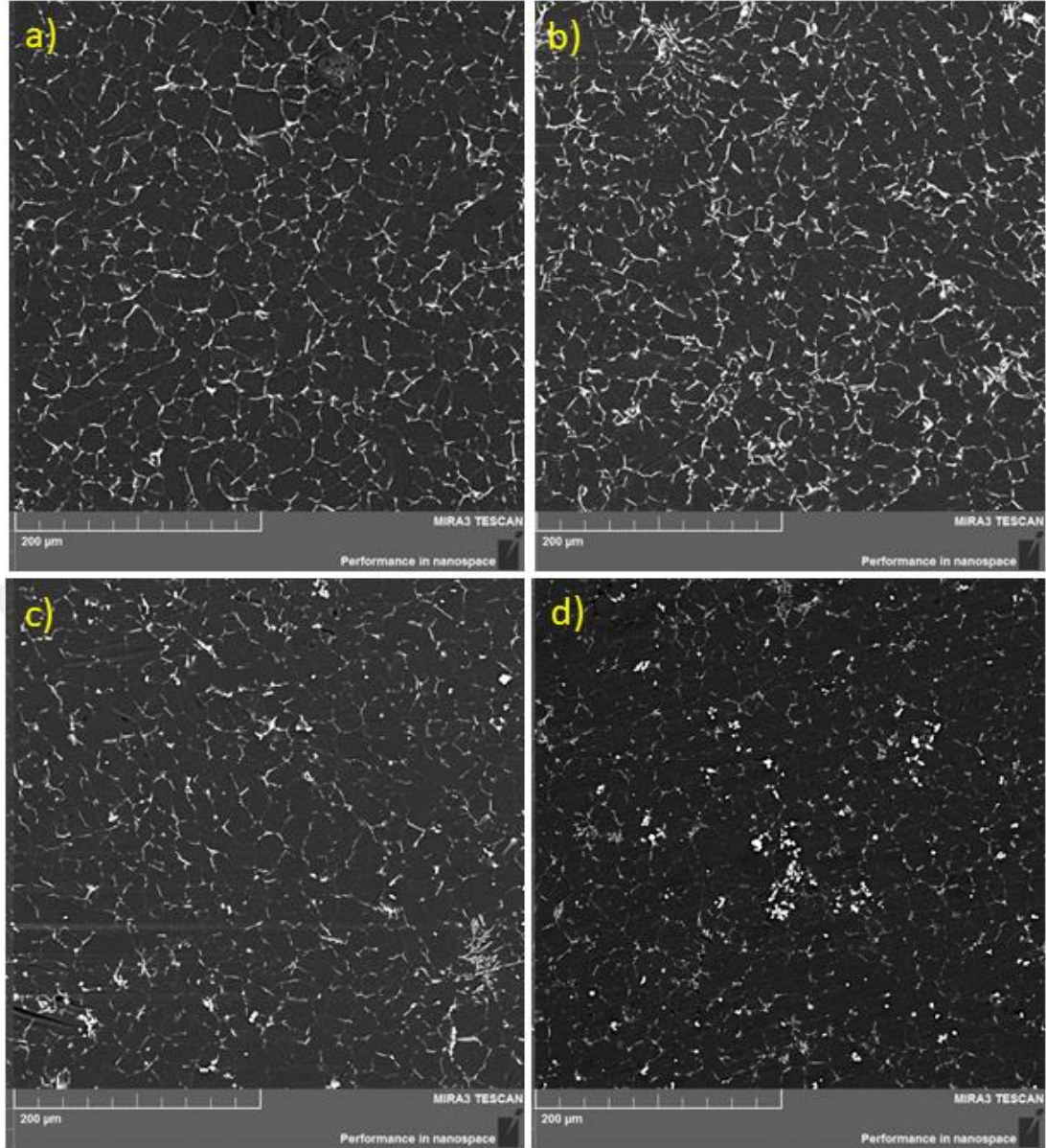
Şekil 4.17 SEM görüntüleri (1000X büyütme)

a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce,

c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce

Artan Ce oranı ile tane sınırındaki intermetalik fazların daha belirgin bir hal aldığı ve sürekli bir formda biriktiği anlaşılmıştır. Fazların bu tür birikmesine bağlı olarak hem düşük sıcaklık hem de yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerin yükseleceği beklenmektedir. Nitekim çekme deneyleri ve sertlik deneyleri neticesinde bu tür bir eğilim tespit edilmiştir. Ancak bu tez kapsamında uygulanmamış olmasına karşın yüksek sıcaklıklardaki dayanım, tane sınırlarında biriken intermetalik fazların ergime sıcaklığına ve termal kararlılığına bağlı olduğu vurgulanmalıdır.

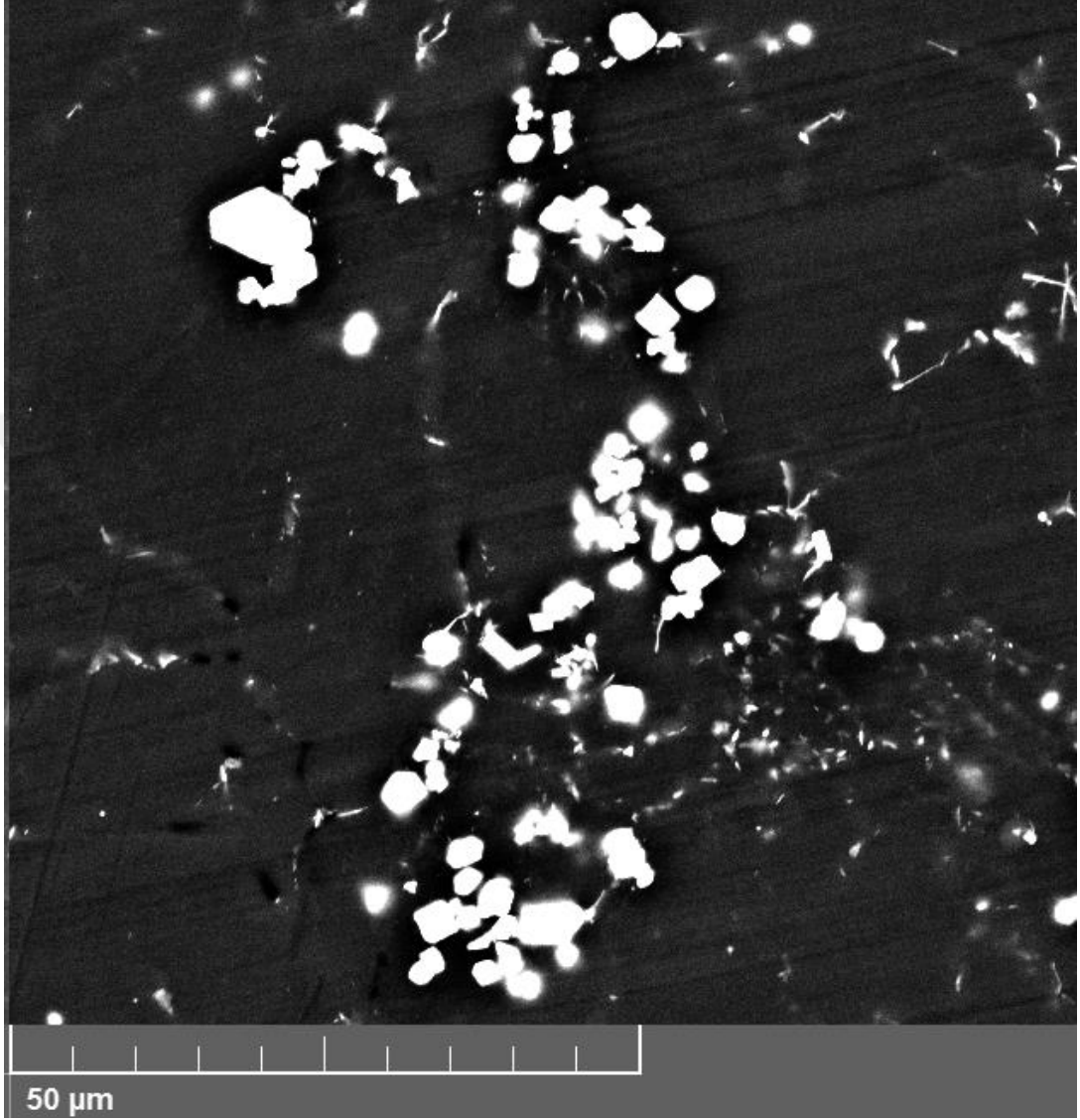
Şekil 4.18'de ise yine 4 farklı alaşımın 500X büyütmedeki SEM-BSE görüntüleri verilmektedir. Bu görüntüde tane sınırları daha belirgin halde olup tane içleri ile bariz bir ayrım yapmaya olanak sağlamaktadır. Şekil 4.18 de a) ile verilen ana alaşımın tane boyutunun diğerlerine oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Görüntüde tane sınırlarında Sb'nin Mg ile oluşturduğu intermetalik yapının mevcudiyeti anlaşılmaktadır. Benzer şekilde ilave edilen Ce oranına bağlı olarak daha ince taneli bir yapının olduğu anlaşılmaktadır. Yine mikroyapıda yoğunlukla CeSb intermetaliklerinin olduğu tespit edilmiştir. Artan Ce oranına göre oluşan CeSb intermetaliklerinin elips ve küresel formda olduğu tespit edilmiştir. $Mg_{12}Ce$ 'nin ise tane sınırlarında ve kavşaklarda, çubuk ve iğne formunda olduğu yer yer iğnelerin yan yana gelerek bir fırça formunda olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.18 SEM-BSE görüntüleri a) Mg-4Sb-2Al, b) Mg-4Sb-2Al-0,5Ce, c) Mg-4Sb-2Al-1Ce, d) Mg-4Sb-2Al-2Ce

Artan Ce oranı ile oluşan CeSb intermetaliklerinin mikroyapıda 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 mesafelerde toplanması şeklindedir. Oluşan bu CeSb küreleri ekseriyetle tane sınırlarında birikmiştir, tane sınırların süreksiz bir çizgi formundan ziyade peş peşe gelecek şekilde dizilmiştir. CeSb faz boyutlarının ise SEM görüntülerine göre 0,5 ile 10 mikrometre arasında olduğu anlaşılmaktadır. CeSb tanelerinin boyutları ise genelde 3-5 mikrometre arasındaki

değerlerde değişmektedir. Bu bilgileri gösteren SEM-BSE görüntüsü Şekil 4.19’da verilmiştir.

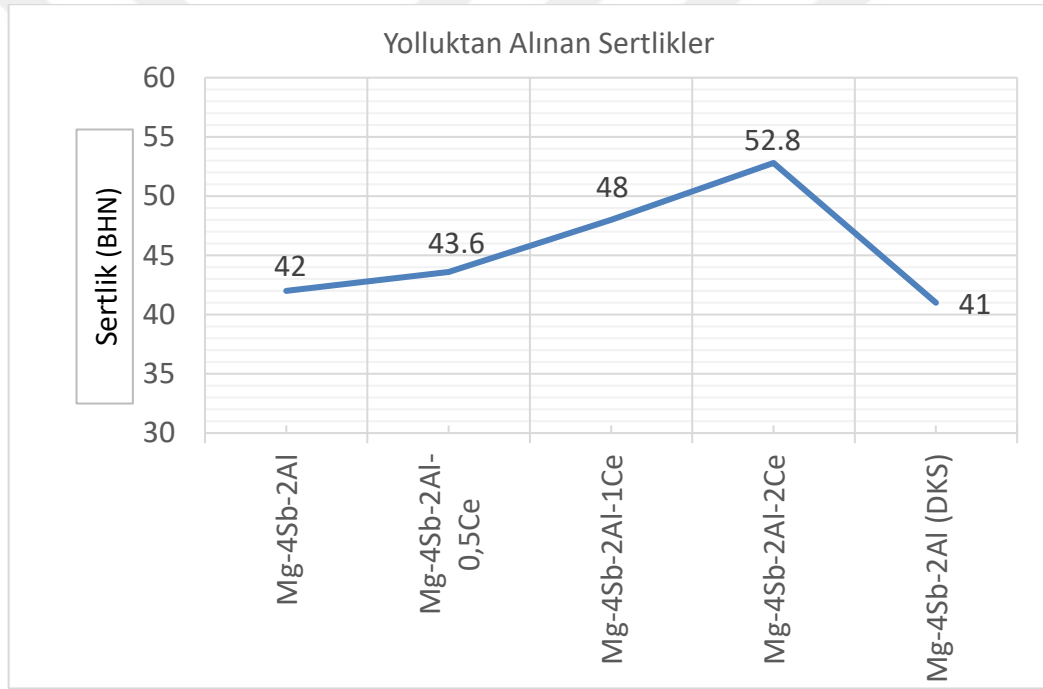


Şekil 4.19 Mg-4Sb-2Al-2Ce alaşımı, CeSb yoğun bölgelerin SEM-BSE görüntüsü

4.5 Sertlik Deney Sonuçları

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. Döküm numunelerinin yolluk kısmından alınan sertlik testi sonuçları Şekil 4.20’de verilmektedir. Sertlik değeri Mg-2Al-4Sb numunesi olan ana alaşımda 42 BHN olarak ölçülmüş artan Ce oranına göre en yüksek

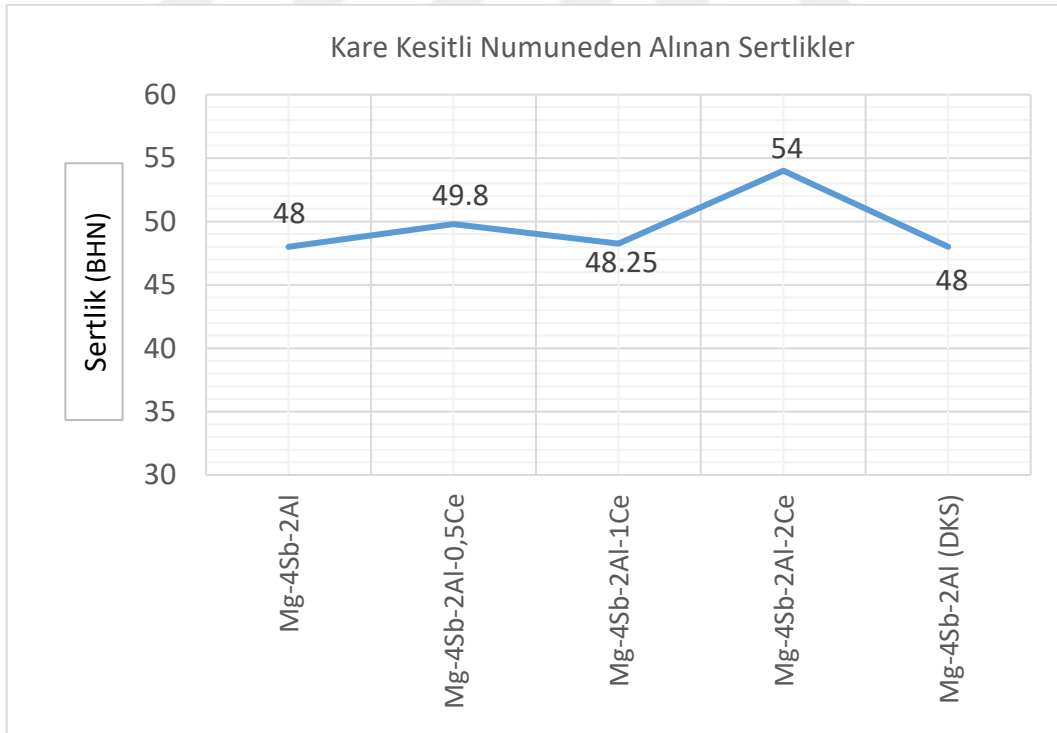
52,8 BHN değerine yükselmiştir. Bu sertlik değeri ilave edilen %2Ce oranında elde edilmiştir. DKS şeklinde kısaltılan ve düşük kalıp sıcaklığında döküm yapılan numunede ise sertlik değeri yüksek sıcaklıkta yapılan dökümden 1 BHN daha düşük çıkmıştır. Bu değer hata payı içinde olup ciddi bir fark olmadığı anlamına gelmektedir. Ancak mühendislik anlamda kalıbın ön ısıtılma işleminin daha düşük sıcaklıklarda olması daha az enerji sarfı anlamına gelmektedir. Öte yandan seri imalat sırasında kalıp döküm sonrası zaten ısınacak ve soğutulması gerekecektir. Kalıp sıcaklığının bu ısınma ve soğuma çevriminde basılan numunenin sertlik değerlerinin farklılık arz etmemesi üretim parametrelerinde aşırı hassasiyet gerektirmeyeceğinden, fayda sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.20 Döküm ürünün yolluk kısmından alınan sertlik değerleri

Bir diğer sertlik testleri ise numunelerin ortasındaki kare kesitli numuneden alınarak uygulanmıştır. Bu bölgedeki sertlik değerleri yolluktan alınan sertlik değerlerine oranla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum alaşımın bu bölgede maruz kaldığı basınç ve soğuma şartlarına bağlı olduğu ile izah edilmektedir. Aynı zamanda porozitesiz bir dökümün üretilmesine de bağlıdır. Kare kesitli numuneden alınan sertlik test sonuçları Şekil 4.20'da verilmektedir. Artan Ce oranına bağlı olarak sertlik değerleri artmış ve

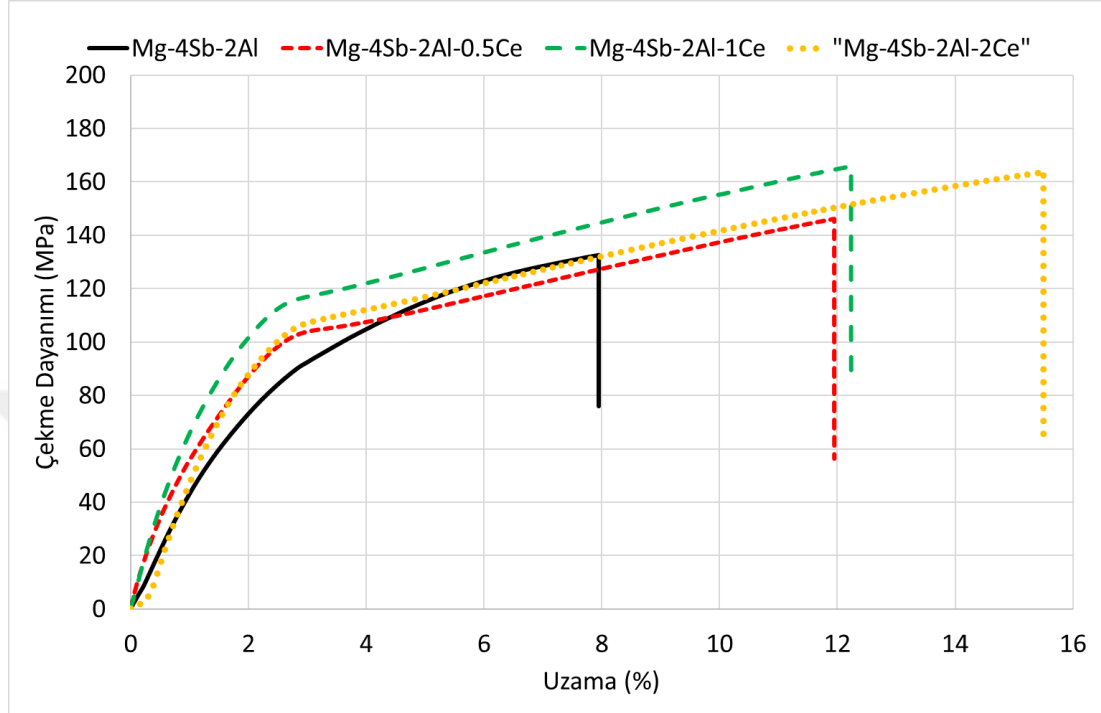
hatta yolluktaki sertlik değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Sertlik değerleri yolluk numunesinde 42'den 52,8'e yükseltilmiş, bir diğer sağlama için numunenin kare kesitli bölgesinden sertlik değerleri alınmıştır. Bu değerler Şekil 4.21'de verilmektedir. Kare kesitli numunede ise 48 BHN'den 54 BHN'ye yükselmiştir. Her iki numuneden alınan sertlik artışı durumu, Mg alaşımları için son derece iyi bir artış olarak belirtilmektedir. HPDC gibi bir üretimde kare kesitli numunede olduğu gibi üretilmek istenilen numunelerin sertliğinin yüksek çıkması faydalı olarak tanımlanmaktadır. Buradaki sertlik artışı soğuma hızı, sıkıştırma basıncı, boşluk ve cüruf miktarı ile ilgili olabilmektedir. Crufsuz döküm elbette bir döküm mühendisi için olmazsa olmaz bir şarttır ancak düşük seviyelerde mikron boyuttaki oksit formuna dönüşmüş cüruflar veya emprtelerin varlığı da sertliği düşürebilmektedir. Kare kesitli numunenin DKS sonuçlarında da yüksek kalıp sıcaklığına oranla bir fark tespit edilmemiş ve yolluktan alınan sertlik deneyleri neticelerinin yapıldığı tartışmayı desteklemiştir.



Şekil 4.21 Döküm ürünün kare kesitli darbe numunesi kısmından alınan sertlik değerleri

4.6 Çekme Deneyi Sonuçları

Yapılan çekme testleri sonucunda ilave edilen Ce ile alaşımın çekme mukavemeti ve sünekliliği artış göstermiştir. İlgili çekme deney grafikleri ve yüzde uzama miktarları Şekil 4.22’de verilmektedir.



| Alaşım | % Uzama |
|-------------------|---------|
| Mg-4Sb-2Al | 8 |
| Mg-4Sb-2Al-0,5 Ce | 12 |
| Mg-4Sb-2Al-1 Ce | 13 |
| Mg-4Sb-2Al-2 Ce | 16 |

Şekil 4.22 Çekme deneyi sonrasında ölçülen %uzama miktarları

Ce ilave edilen alaşımdaki çekme dayanımının artması ve tane inceltici görev yapması Hall-Patch bağıntısına göre izah edilmektedir. Ayrıca dentrit kolları arası mesafenin de küçülmesi bir diğer etken olup, oluşan CeSb yapısının ekseri elips formunda olması da uzamanın yüksek değerlere çıkmasına neden olmuştur. 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. Çekme deneyleri

0.2 mm /dak hızla yapılmış olmasına bağlı olarak akma değerleri ve sünme değerleri düşüş göstermiştir. Ancak bilindiği üzere deformasyon hızının mekanik özelliklere etkisi bulunmaktadır. Bu süreçte alaşıma yüklenen deformasyon gerilimi yavaş çekme ile yeniden toparlanabilmiştir. Netice itibarı ile %2 Ce ilave edilen alaşımda %16 uzama sağlanabilmiştir. Bu değer kritik bir değer olup birçok mühendislik malzemesi için ideal bir uzama yüzdesidir. %2 Ce ilave edilen alaşımda 160 MPa çekme mukavemet değeri elde edilmiştir. Ce ilavesiz ana alaşımda bu değer yaklaşık 130 MPa olup, 30 MPa artış sağlanabilmiştir.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Mg alaşımları içinde yeni nesil bir alaşım geliştirilmiş olup alaşım RE (Nadir Element) ilavesi ile mevcut özellikleri daha da ilerletilmiştir. Temel alaşım elementi olarak Mg-4Sb-2Al alaşımı seçilmiş olup, bu tür bir 3'lü alaşıma dair literatürde bilgi olmadığı çalışmalar öncesinde tespit edilmiş ve buna dair alaşım grubu ve malzeme seçimi yapılmıştır. Alaşım elementleri seçilirken özellikle hafif metal döküm sanayi için en önemli üretim tekniklerinden birisi olan basınçlı döküm (HPDC) tekniği seçilmiştir. Bu yöntemin gerek yüksek mekanik özellikleri sağlaması ve gerekse endüstriyel alanda yapılan imalata uygun olması, seçilen alaşım için ayrıca bir önem taşımaktadır. Alaşım elementi olarak Sb,Al elementleri Mg alaşımına ilave edilmiş ve ana alaşım elementi üretilmiştir. Bu elementlerin seçiminde temel malzeme bilimi kriterleri, döküm için elverişli akışkanlık ve porozite özellikleri, mukavemet artırma kriterlerine uygunluğu gibi yaklaşımlar esas alınmıştır. Al ilavesinin dökülebilirlik ve süneklik artımadaki etkisi baz alınmış ve tipik $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalikliğinin oluşumunun en az seviyeye indirilmesi için kritik bir değer olan ağırlıkça %2 değeri seçilmiştir. Buna ilaveten alaşım seçiminde ekonomiklik göz önüne alınarak imalat sanayinin doğrudan kullanabileceği alaşımlar tercih edilmiştir. Al ilavesi bu kriterleri sağlayan ve yoğunluğu artırmayan yegâne metallere birisidir. İkinci kritik alaşım elementi olan Sb ile ilgili literatür son derece yetersiz olup, bu elementin Mg üzerine etkisi halen net olarak bilinmemektedir. Sb ile alaşımlamada Sb'nin Mg içinde katı çözünürlüğünün olmaması ve ötektik ayrışma sonucunda tane sınırlarında Mg_3Sb_2 intermetalikliğini oluşturması, aynı zamanda iyi bir tane inceltici görevi görmesi bu elementin seçiminde ana kriterleri oluşturmaktadır. Ayrıca Sb'nin %4 sınırına kadar dentritler arası mesafeyi küçültücü etkisi ve ticari olarak temininin zor olmayışı bu elementi cazip hale getirmektedir. %4 Sb'nin üzerindeki değerlerde tane kabalaşması meydana geldiği için kritik sınır olarak %4 Sb oranı belirlenmiştir. Son olarak alaşımın mekanik özelliklerinin daha da artırılması için nadir toprak elementlerinden en yaygın ve temin edilebilir ölçüde olan Ce elementi seçilmiştir. Ce ilavesi %0,5 ila %2 arasında seçilip optimum Ce oranının tespit edilmesi

gerçekleştirilmiştir. İlave edilen Ce'nin de tane inceltici olarak davrandığı ve tane sınırlarında yeni bir intermetalik olan CeSb'nin oluştuğu anlaşılmıştır, bu verilere göre mevcut tez kapsamında aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

1. Üretilen ana alaşım olan Mg-4Sb-2Al'nin içinde Sb'nin çözünürlüğünün olmamasına bağlı olarak ötektik ayrışma ile Sb, tane sınırlarına sürüklenmiş ve tane sınırlarında Mg₃Sb₂ formunda intermetalik fazlar oluşturmuştur. Bu fazın varlığı SEM ve XRD teknikleri ile ispatlanmıştır. Bu ana alaşımın çekme testleri sonucunda %8 uzama gösterdiği ve 130 MPa çekme mukavemeti değerine sahip olduğu ölçülmüştür.
2. Mg-4Sb-Al alaşımına sırası ile %0.5, %1 ve %2 oranlarında Ce ilave edilmiştir. İlave edilen Ce, ana alaşımın tane yapısını inceltmiş ve daha küçük taneli bir yapı oluşumuna katkıda bulunmuştur. Artan Ce oranına bağlı olarak, Mg₃Sb₂'nin yanı sıra CeSb ve Mg₁₂Ce intermetaliklerinin varlığı SEM ve XRD ile tespit edilmiştir. Sırası ile %0,5 Ce ilave edilen alaşımın çekme mukavemeti 145-148 MPa arasında ve uzaması ise %12 olarak elde edilmiştir. %1 Ce ilaveli alaşımda çekme mukavemeti 164-168 MPa arasında uzama değeri ise %13 olarak bulunmuştur. İlave edilen %2 Ce miktarında ise üretilen alaşımın 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 alaşımın mühendislik anlamda daha verimli olacağı kanaatine varılmıştır. Bu kanaatte ilave edilecek Ce miktarının azalması ile ekonomik bir ürün üretileceği gerçeği ile desteklenmektedir. Çekme dayanımının artmasının nedeni dislokasyon hareketini engelleyen intermetalik CeSb fazının tane sınırları boyunca düzenli dağılması ve ince taneli bir yapının elde edilmesidir. Aynı zamanda oluşan Mg₃Sb₂ fazı da tane inceltici olarak davranmış ve yine tane sınırlarında kararlı bir intermetalik faz olarak birikim yapmıştır. Ayrıca Mg₁₂Ce fazının da artan Ce oranlarında oluştuğu bu fazında dislokasyonların özellikle tane sınırlarında hareketine engel teşkil ettiği düşünülmektedir. Ce ilave edilen alaşımdaki çekme dayanımının artması ve tane inceltici olarak görev yapması Hall-Patch bağıntısı gereğince izah edilmektedir. Ayrıca dentrit kolları arası mesafenin de

küçülmesi bir diğer etken olup, oluşan CeSb yapısının ekseriyetle elips formunda olması da uzamanın yüksek değerlere çıkmasına neden olmuştur. Bu tür bir elips formunun tane sınırlarında çentik etkisini en aza indirmesi uzama yüzdesinin artmasındaki en önemli kriterlerden birisidir.

3. İlave edilen Ce miktarına göre ana alaşımın 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 BHN, 49,8 BHN, 48,25 BHN, 54 BHN şeklindedir. Bu sonuçlara göre en yüksek sertlik değeri %2 Ce ilavesi ile elde edilmiştir. Sertliğin artmasının nedeni dislokasyon hareketini engelleyen intermetalik CeSb fazının tane sınırları boyunca düzenli dağılması ve ince taneli bir yapının elde edilmesidir. Görüntülenen CeSb fazlarının 5 mikrometre ile 50 nm arasında küresele yakın formlarda olduğu tespit edilmiştir.
4. Ana alaşım olan Mg-4Sb-2Al alaşımında ilave edilen Sb, ve bu alaşıma ilave edilen Ce' nin tane inceltici etkisinin olduğu anlaşılmıştır.
5. Üretilen numunelerin XRD incelemelerinde Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazına rastlanmamıştır.

5.1 Öneriler

Üretilen alaşımların yüksek sıcaklık deneylerinin ve korozyon özelliklerinin incelenmesi faydalı olacaktır. Nitekim oluşan intermetaliklerin yüksek sıcaklıklarda eriyor olması bu fazların yüksek sıcaklık çekme deneylerinde tane sınırlarında kilitleme etkisi göstereceğini düşündürmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **ASM Specialty Handbook.** (1999). Magnesium and Magnesium Alloys, *ASM International Handbook Committee, United States of America.*
- [2] **Zeytin, H.K.** (1999). “Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği”, *Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli.*
- [3] **Smith, W.F.,** (2001). Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, *Literatür Yayıncılık, (Çeviri Kınikoğlu, N.G.), İstanbul.*
- [4] **Url-1** <<http://www.intlmag.org>>, alındığı tarih: 16.07.2018.
- [5] **ASM Handbook Volume 2** (1996), Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, *ASM International Handbook Committee, United States of America.*
- [6] **Friedrich, H.E. ve Mordike, B.L.** (2006). Magnesium Technology (Metallurgy, Design Data, Applications), *Springer, Berlin.*
- [7] **Brungs, D.** (1997). “Light Weight Design with Light Metal Castings (Technical Report)”, *Materials & Design*, 18: 285-291.
- [8] **Department of Trade and Industry** (2004). “Magnesium Alloys and Processing Technologies for Light Weight Transport Applications”, *Global Watch Mission Report*, United Kingdom.
- [9] **Doehler, H.H.** (1974). Basınçlı Döküm, *Erkek Teknik Yüksek Okulu Matbaası, (Çeviri Bayvas, M.Ş.), Ankara.*
- [10] **Url-2** <<http://www.nkfu.com/magnezyum-nedir-magnezyum-elementinin-ozellikleri>>, alındığı tarih: 15.01.2018.
- [11] **Kudret K., A. Çetin C.** (2010). Otomotiv Endüstrisi için magnezyum alaşımlarının kullanım potansiyeli (basınçlı dökümde), *Politeknik Dergisi Journal Cilt:13 Sayı: 3 s. 165-176.*
- [12] **Friedrich,** et al. (2000). The Second Age of Magnesium, *Dead Sea Magnesium Conference*, pp. 9.
- [13] **Aghion, E., Bronfin, B., Eliezer, D.** (2001). The Role of The Magnesium Industry in Protecting Environment, *Journal of Material Processing Technology*, Vol.117, pp.381-385.
- [14] **Fleming, S.** (2012). An Overview of Magnesium based Alloys for Aerospace and Automotive Applications, *Graduate Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute (Yüksek Lisans Tezi).* New York.
- [15] **Mert, F., Özdemir, A., Karataş, Ç.,** Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi
- [16] **National Research Council** (U.S.). (2011). Opportunities in protection materials science and technology for future army applications, *National Academies Press, Washington, D.C.*
- [17] **Froes, F.H. D. Eliezer and E. Aghion.** (1998). “The Science, Technology and Applications of Magnesium”, *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol.5, pp. 30-34.
- [18] **Abbott, T.** (2009). “Why Choose Magnesium?,” *Material Science Forum*, vol.618-619, pp.3-6.
- [19] **Cho, K., Sano, T., Doherty, K., Yen, C., Gazonas, J. M., Moy, P., Davis, B. & Delorme, R.** (2009). Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles Proceedings of the 2008. *Army Science Conference*, ARL-RP-236.

- [20] **Wolfgang Weissbach.** (2000). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [21] **Pinto, F.** (2009). Evolution of weight, fuel consumption and CO2 of automobiles, M.Sc. Thesis, *The Instituto Superior Técnico*, Portugal.
- [22] **Url-3** < <http://www.roskill.com/reports/magnesium>>, alındığı tarih: 17.03.2017
- [23] **Gaines, L., Cuenca R., Stodolsky, F., Wu, S.** (1996). Potential Automotive Technology Development, *Automotive Technology Development Conference*, Conference Paper, syf. 1-7.
- [24] **Url-4** < www.chegg.com>, alındığı tarih: 08.03.2019.
- [25] **Vanlı, A.S.** (2007), Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi)*. 123s, İstanbul.
- [26] **R. Rajeshkumar**, et all. (2017). Investigation on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Sb and Mg-Sb-Si alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 691 (Sayfa 81-88).
- [27] **Çiğdemoğlu M.** (1972), *Basınçlı Döküm Cilt I, Makina Mühendisleri Odası Yayın No 77*, Ankara.
- [28] **ASM Handbook Volume 15** (1998). Casting, *ASM International Handbook Committee*, United States of America.
- [29] **Sönmez, H.** (2006). Basınçlı Döküm Ders Notları (yayımlanmamış), *Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İstanbul.
- [30] **Url-4** < <http://www.afsinc.org/>>, alındığı tarih: 12.02.2019.
- [31] **Vinarcik, E.J.** (2003). High Integrity Die Casting Processes, *John Wiley & Sons*, New York.
- [32] **G. Nayyeri, R. Mahmudi** (2010). *Materials Science and Engineering A* 527 669–678, Effects of Sb Additions on the Microstructure and Impression Creep Behavior of a Cast Mg–5Sn Alloy.
- [33] **Mohammad Nazmul Khan.** (2009). Solidification study of commercial magnesium alloys, *Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science (Mechanical Engineering) at Concordia University Montreal*, Quebec, Canada.
- [34] **Okamoto, H.** (2010). Mg-Sb (Magnesium-Antimony), *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 31: 574.
- [35] **Fusheng Pan**, et all. (2011). Microstructure and Mechanical Properties of the As-Cast and As-Homogenized Mg-Zn-Sn-Mn-Ca Alloy Fabricated by Semicontinuous Casting, *Materials Science and Engineering A* 528 4973–4981.
- [36] **Yang M, Zhang J, Guo T.** (2013). Effects of Ca addition on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg–3Ce–1.2Mn–1Zn (wt.%) magnesium alloy, *Materials & Design (1980-2015) Volume 52*, Pages 274-283.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

| | |
|----------------------|---|
| Adı Soyadı | Kübra İnce |
| Doğum Yeri ve Tarihi | İskenderun, 09.10.1994 |
| Medeni Hali | Bekar |
| Yabancı Dil | İngilizce |
| İletişim Adresi | Süleymaniye mah. Şehit teğmen Harun Kılıç Cad. Şafak Apt. no:47 31200 İskenderun/HATAY |
| E-posta Adresi | kbraiince@gmail.com |

Eğitim ve Akademik Durumu

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Lise | İskenderun Anadolu Lisesi, 2012 |
| Lisans | Cumhuriyet Üniversitesi, 2016 |
| Yüksek Lisans | Cumhuriyet Üniversitesi, 2019 |

Kongreler

Uluslararası (BRAMAT 2017)