

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

**MAGNEZYUM LİTYUM ALUMİNYUM ALAŞIMLARINA  
ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ VE ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Şehzat AÇIKGÖZ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ARALIK 2022**



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

**MAGNEZYUM LİTYUM ALUMİNYUM ALAŞIMLARINA  
ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ VE ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Şehzat AÇIKGÖZ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. S. Can KURNAZ**

**ARALIK 2022**



Şehzat AÇIKGÖZ tarafından hazırlanan “Magnezyum Lityum Alüminyum Alaşımlarına Alaşım Elementi İlavesi ve Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 29.12.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

- Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Ahmet ÖZEL** .....  
Sakarya Üniversitesi
- Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. S. Can KURNAZ** (Danışman) .....  
Sakarya Üniversitesi
- Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi
- Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. Özkan ÖZDEMİR** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
- Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. A. Şükran DEMİRKİRAN** .....  
Sakarya Üniversitesi



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

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “MAGNEZYUM LİTYUM ALUMİNYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. (29/12/2022).

Şehzat AÇIKGÖZ





*Sevgili eşime ve çocuklarıma bu süreçteki desteklerinden dolayı tüm kalbimle  
teşekkür ederim.*



## **TEŞEKKÜR**

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden ve beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. S. Can KURNAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, deneyimlerinden yararlandığım sayın bölüm öğretim üyelerine, öğretim elemanlarına ve laboratuvar analizlerindeki yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Fuat KAYIŞ'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve beni yönlendiren tez izleme jüri üyeleri değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2020-7-25-48) teşekkür ederim.

Şehzat AÇIKGÖZ



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SİMGELER .....	xv
TABLO LİSTESİ .....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xix
ÖZET .....	xxiii
SUMMARY .....	xxv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI.....</b>	<b>7</b>
3.1. Magnezyum .....	7
3.2. Magnezyum Alaşımları .....	9
3.2.1. Mg-Li alaşımları .....	10
3.2.2. Mg-Al alaşımları .....	11
3.2.3. Mg-Sn alaşımları .....	12
3.2.4. Mg-Nadir toprak elementleri alaşımları .....	14
3.2.5. Mg-Ca alaşımları .....	17
3.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları .....	19
3.3.1. Otomotiv endüstrisi .....	19
3.3.2. Havacılık endüstrisi .....	22
3.3.3. Medikal .....	23
3.3.4. Spor endüstrisi .....	25
3.3.5. Elektronik .....	26
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>29</b>
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Hazırlama .....	29
4.2. Ergitme Yöntemi .....	31
4.2.1. Kullanılan araç-gereçler .....	31
4.3. Ergitme ve Alaşımlama .....	31
4.4. Döküm İşlemi .....	33
4.5. Kimyasal Analiz .....	35
4.6. X-Işınları Analizi .....	36
4.7. Mikroyapı Analizi .....	36
4.8. Mekanik Özelliklerin Analizi .....	39
4.8.1. Sertlik değerlerinin ölçümü .....	39
4.8.2. Çekme deneyi değerlerinin ölçümü .....	40
4.8.3. Basma değerlerinin ölçümü .....	43
4.9. Korozyon Özelliklerinin Analizi .....	44
4.9.1. Elektrokimyasal korozyon deneyi .....	44
<b>5. DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>	<b>47</b>

5.1. Kimyasal Bileşimlerin Analiz Sonuçları .....	47
5.2. XRD Analiz Sonuçları.....	48
5.3. Üretilen Alaşımların Mikroyapı Sonuçları .....	51
5.3.1. Mg-8Li-2Al alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri.....	51
5.3.2. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri .....	54
5.3.3. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri.....	57
5.3.4. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri .....	61
5.3.5. Üretilen alaşımlardaki $\alpha$ -Mg, $\beta$ -Li ve intermetalik fazlarının alan fraksiyonlarının SEM yardımı ile karşılaştırılması .....	64
5.4. Mekanik Deneylerin Sonuçları .....	65
5.4.1. Sertlik deneylerinin sonuçları .....	65
5.4.2. Çekme deneylerinin sonuçları .....	66
5.5. Korozyon Deneylerinin Sonuçları .....	69
<b>6. DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI .....</b>	<b>73</b>
6.1. Mikroyapı Sonuçların Tartışılması .....	73
6.2. Mekanik Deney Sonuçlarının Tartışılması .....	76
6.2.1. Sertlik deney sonuçlarının tartışılması .....	76
6.2.2. Çekme ve basma deney sonuçlarının tartışılması .....	77
6.3. Korozyon Deney Sonuçlarının Tartışılması .....	79
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>87</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>95</b>

## KISALTMALAR

<b>ASTM</b>	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>ECAP</b>	: Eşit kanallı açısız presleme
<b>EDS</b>	: Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi
<b>E<sub>corr</sub></b>	: Korozyon potansiyeli [V]
<b>Gr</b>	: Gram
<b>HB</b>	: Brinell sertlik
<b>HMK</b>	: Hacim merkezli kübik yapı
<b>HSP</b>	: Hegzagonal sıkı paket yapı
<b>HV</b>	: Vickers sertlik
<b>IATA</b>	: Uluslararası hava taşımacılığı birliği
<b>ICP-OES</b>	: Endüktif eşleşmiş plazma – optik emisyon spektrometrisi
<b>I<sub>corr</sub></b>	: Korozyon akım yoğunluğu [ $\mu$ A]
<b>İHA</b>	: İnsansız hava aracı
<b>Kg</b>	: Kilogram
<b>L</b>	: Sıvı faz
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>OCP</b>	: Açık devre potansiyeli
<b>Ppm</b>	: Milyonda bir birimi
<b>CorrRate</b>	: Korozyon hızı [mpy]
<b>RE</b>	: Nadir toprak elementleri
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>SiC</b>	: Silisyum karbür
<b>SF<sub>6</sub></b>	: Kükürt hekzaflorür
<b>% ağı.</b>	: Yüzde ağırlıkça oran
<b>XRD</b>	: X-ışınları Difraksiyonu





## SİMGELER

$\alpha$	: Birincil faz
$\rho$	: Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]
°C	: Santigrat derece
K	: Kelvin
$\beta$	: İkincil fazlar
$d$	: Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]
$\mu$	: Mikro
V	: Volt
A	: Amper



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> Magnezyum alaşımlarının yoğunluğunun diğer alaşımlarla karşılaştırılması .....	7
<b>Tablo 3.2.</b> Saf Magnezyum metalinin fiziksel özellikleri .....	7
<b>Tablo 3.3.</b> Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi.....	8
<b>Tablo 3.4</b> Magnezyum alaşım isimleri .....	9
<b>Tablo 4.1.</b> Üretimi yapılan alaşımlar.....	29
<b>Tablo 4.2.</b> Döküm işleminde kullanılan metallerin ergime dereceleri.....	32
<b>Tablo 5.1.</b> Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçları.....	47
<b>Tablo 5.2.</b> Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonrası yeni isimleri.....	48
<b>Tablo 5.3.</b> Alaşımların çekme mukavemeti, akma mukavemeti, çekme uzaması, basma mukavemeti ve birim şekil değişimi değerleri.....	67
<b>Tablo 5.4.</b> Üretilen alaşımların korozyon potansiyeli (Ecorr), korozyon yoğunluğu (Icorr) ve korozyon hızı (CorrRate) değerleri.....	71
<b>Tablo 6.1.</b> Çalışmada kullanılan elementlerin elektronegativite değerleri.....	73



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Mg-Li faz diyagramı.....	11
Şekil 3.2. Al-Mg faz diyagramı.....	12
Şekil 3.3. Mg-Sn faz diyagramı.....	13
Şekil 3.4. Mg-Nd faz diyagramı.....	14
Şekil 3.5. Al-Nd faz diyagramı.....	15
Şekil 3.6. La-Mg faz diyagramı.....	16
Şekil 3.7. Al-La faz diyagramı.....	16
Şekil 3.8. Mg-Ca faz diyagramı.....	17
Şekil 3.9. Al-Ca faz diyagramı.....	18
Şekil 3.10. Geçmiş ve günümüzde üretilen magnezyum esaslı otomobil parçaları...	20
Şekil 3.11. Magnezyum otomotiv parçaları: (a) 0,75 kg ağırlığındaki Toyota Camry magnezyum direksiyon simidi, (b) 2,6 kg ağırlığındaki Jaguar ve Fiat modellerinin koltuk şasisi, (c) 2,7 kg ağırlığındaki AZ91D'den yapılmış arka transfer kutusu ve (d) 0,9 kg ağırlığındaki Ford Zetec motorun AZ91 magnezyum alaşımı subap kapağı.....	21
Şekil 3.12. Boeing uçaklarındaki magnezyum alaşımları için uygulama örnekleri: kanat ve koltuk bileşenleri.....	22
Şekil 3.13. Uçak endüstrisindeki magnezyum alaşımları için uygulamalar.....	23
Şekil 3.14. WE43 Seri Mg alaşımının medikal uygulama örneği.....	24
Şekil 3.15. Magnezyum spor malzemeleri: (a) golf sopası başlığı yüksek kaliteli magnezyumdan yapılmıştır (b) magnezyum şasili tekerlekli paten (c) magnezyum başlıklı tenis raketi ve (d) magnezyum çerçeveli bisiklet.....	25
Şekil 4.1. Saf Lityum elementinin döküm öncesi görünümü.....	30
Şekil 4.2. Ergitme işlemi öncesi paslanmaz potalara yerleştirilmiş malzemeler.....	30
Şekil 4.3. Üstten kapaklı elektrik rezistanslı ergitme fırını.....	31
Şekil 4.4. Döküm işlemi öncesi sıvı metale alaşım elementlerinin ilavesi.....	33
Şekil 4.5. Döküm işleminde kullanılan donanım ve cihazlar.....	34
Şekil 4.6. Alaşımların ergitme ve döküm prosesinin şematik olarak gösterimi.....	34
Şekil 4.7. Döküm işlemi sonrası kalıptan çıkarılan Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5La, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları.....	35
Şekil 4.8. Struers marka numune kesme cihazı ve kimyasal analiz için hazırlanan numuneler.....	35
Şekil 4.9. Rigaku D-Max 1000 X-ışını cihazı.....	36
Şekil 4.10. Struers marka Sıcak bakelite alma cihazı ve Buehler marka zımparalama ve parlatma cihazı.....	37
Şekil 4.11. Metalografik inceleme için hazırlanmış numune örnekleri.....	37
Şekil 4.12. Carl Zeiss marka optik mikroskopu ve Jeol JSM6060LV marka SEM cihazı.....	38
Şekil 4.13. Tescan VEGA-II Elektron Mikroskopu.....	38

Şekil 4.14. Shimadzu marka Mikro sertlik ölçüm cihazı ve Bulut marka Brinell sertlik ölçüm cihazı .....	39
Şekil 4.15. GF marka tel erozyon işleme cihazı .....	40
Şekil 4.16. ASTM E8'e göre hazırlanan çekme deneyi numunesinin geometrik şekli ve boyutları .....	40
Şekil 4.17. Çekme deneyi numunelerinin işlendiği bölge .....	41
Şekil 4.18. Tel erozyon cihazında işlenmiş, zımparalama işlemi öncesi çekme deneyi numunelerinin görüntüsü.....	41
Şekil 4.19. Çekme deneyi için hazır olan çekme numuneleri .....	42
Şekil 4.20. Çekme deneylerinin yapıldığı Instron 3367 marka çekme cihazı.....	42
Şekil 4.21. ASTM E9'a göre hazırlanan basma deneyi numunesinin geometrik şekli ve boyutları .....	43
Şekil 4.22. Çekme deneyi numunelerinin işlendiği bölge .....	43
Şekil 4.23. ASTM E9'a göre hazırlanan basma deneyi numune örnekleri .....	44
Şekil 4.24. Üretilen alaşımlardan korozyon deneyi numunelerinin işlendiği bölge ..	44
Şekil 4.25. Elektrokimyasal korozyon deneylerinde kullanılan Gamry Reference 600+ cihazı .....	45
Şekil 4.26. Elektrokimyasal korozyon deneyinde Gamry Echem Analyst yazılım paketi ekran görüntüsü .....	46
Şekil 5.1. Mg-8Li-2Al alaşımının XRD analiz sonuçları .....	48
Şekil 5.2. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının XRD analiz sonuçları.....	49
Şekil 5.3. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının XRD analiz sonuçları .....	50
Şekil 5.4. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının XRD analiz sonuçları.....	50
Şekil 5.5. Mg-8Li-2Al alaşımının optik mikroskop görüntüleri.....	51
Şekil 5.6. Mg-8Li-2Al alaşımının SEM görüntüleri .....	52
Şekil 5.7. Mg-8Li-2Al alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri .....	53
Şekil 5.8. Mg-8Li-2Al alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri .....	54
Şekil 5.9. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının optik mikroskop görüntüleri .....	55
Şekil 5.10. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının SEM görüntüleri .....	56
Şekil 5.11. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.....	56
Şekil 5.12. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.....	57
Şekil 5.13. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının optik mikroskop görüntüleri.....	58
Şekil 5.14. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM görüntüleri.....	59
Şekil 5.15. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri .....	60
Şekil 5.16. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri .....	60
Şekil 5.17. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının optik mikroskop görüntüleri .....	62
Şekil 5.18. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM görüntüleri .....	62
Şekil 5.19. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.....	63
Şekil 5.20. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.....	63
Şekil 5.21. Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının kontrast farkı oluşturularak elde edilmiş SEM mikroyapıları .....	64
Şekil 5.22. Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları ve bu alaşımların içerdiği $\alpha$ -Mg ve $\beta$ -Li fazlarının sertlik değerleri.....	66
Şekil 5.23. Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çekme deneyi sonrası elde edilmiş kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	68
Şekil 5.24. Mg-8Li-2Al alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.....	69

<b>Şekil 5.25.</b> Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.....	70
<b>Şekil 5.26.</b> Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.....	70
<b>Şekil 5.27.</b> Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.....	71
<b>Şekil 5.28.</b> Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının 0,1M NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri.....	72
<b>Şekil 6.1.</b> Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması .....	80
<b>Şekil 6.2.</b> Mg-Li alaşımlarının korozyonu sürecinin temsili çizimi .....	82





## MAGNEZYUM LİTYUM ALUMİNYUM ALAŞIMLARINA ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Bu çalışmada, metal kalıba döküm yöntemi ile Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları üretilmiştir. Sn, Nd ve Ca elementlerinin ayrı ayrı eklenmesinin Mg-8Li-2Al alaşımının mikroyapısı, mekanik özellikleri ve korozyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Alaşımları üretmek için yüksek saflıkta metaller ve master alaşımları ergitme işlemi için gerekli kütle ve boyutlara küçültülmüştür. Ergitme ve alaşımlama işlemi, SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub> koruyucu gaz karışımları, paslanmaz çelik potalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm işleminde ise koruyucu gaz atmosfer destekli döküm kutusu ve 120 X  $\phi$ 110mm ebatlarında çelik kalıplar kullanılmıştır.

Döküm sonrası üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçları değerlendirilip, mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinin yanısıra X-ışını ve EDS analizleri de yapılmıştır. Mg-8Li-2Al alaşımı %8 Li elementi içerdiğinden dolayı alaşımın mikroyapısı çift fazlı ( $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li) olduğu, ayrıca mikroyapıda AlLi intermetalik fazlarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda Mg-8Li-2Al alaşımı ile kıyaslandığında, ilave edilen Sn, Nd ve Ca elementlerinin etkisi ile  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li faz boyutlarının küçüldüğü, mikroyapının iyi yönde geliştiği sonucuna varılmıştır. Üretilen alaşımların X-ışını ve EDS analizinden sonra, incelenen alaşımlarda AlLi, Mg<sub>2</sub>Sn, Al<sub>2</sub>Nd, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca'nın intermetalik bileşikler tespit edilmiştir. Deneysel alaşımların mekanik özelliklerinin, bu intermetalik bileşikler tarafından geliştirildiği sonucuna varılmıştır.

Alaşımların mekanik özelliklerini araştırmak için sertlik testi ve çekme testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, alaşım elementlerinin eklenmesi baz alaşımın sertliğini arttırmıştır. Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının Brinell sertlik değerleri sırasıyla 52, 60, 56 ve 59 HB olarak ölçülmüştür. Mg-8Li-2Al Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çekme mukavemetleri ve uzama değerleri sırasıyla 115MPa ve %12,8, 136 MPa ve %10,4, 129 MPa ve %10, 125 MPa ve %8 olarak ölçülmüştür. Mekanik özellikler göz önüne alındığında, Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı ile Mg-8Li-2Al alaşımına göre çekme gerilmesinde %18,3 ve basma gerilmesinde %34 artış ile en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca diğer deneysel alaşımlardan daha yüksek olan Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının çekme uzama değeri %10,4 olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal korozyon test sonuçları, 10,49 mpy ile en düşük korozyon hızı değerine Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının sahip olduğunu göstermiştir.



## **EFFECTS OF ALLOYING ELEMENTS ON THE PROPERTIES OF Mg-Li-Al ALLOY**

### **SUMMARY**

In this study, Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd, and Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloys were produced by the gravity die casting method. The effects of individual addition of Sn, Nd, and Ca on the microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of the Mg-8Li-2Al alloy were studied.

Four experimental alloys were produced by melting pure Magnesium (99,9 wt%), pure Lithium (99,9 wt%), pure Aluminum (99,9 wt%), pure Tin (99,9 wt%), Mg – Neodymium (20 wt%), and pure Calcium (99,9 wt%) using resistance melting furnace. Target alloys were melted at 770 °C under SF<sub>6</sub> and CO<sub>2</sub> protective gas atmosphere in a steel crucible in an electric resistance furnace. The mold was preheated at 200 °C for 2 hours prior to pouring, and the mold was filled with protective gas for 60 seconds. After the molten metal in the crucible was taken into the casting box by using tongs under a protective gas atmosphere, it was poured into metal cylinder molds having 120mm X  $\phi$ 110mm under gravity.

Inductively coupled plasma–optical emission spectrometry (ICP-OES) was used to determine the chemical composition of the alloys. Chemical analysis results of experimental alloys were measured and then microstructure studies were carried out. In addition to microstructure examinations, X-ray and EDS analyzes were also performed.

A wire electrical discharge machining (EDM) machine was used to cut metallographic and other experimental samples. Grinding was completed with 1200 grit silicon carbide (SiC) grinding papers. After rinsing with ethanol, samples were polished with a 0,05  $\mu$ m alumina polishing suspension. Chemical etching of optical microscopy (OM) specimens was done in a solution of 3% HNO<sub>3</sub> + 97% ethanol. To check the distribution of alloying elements in the structure, scanning electron microscopy (SEM) equipment (JEOL 6060LV) with an energy-dispersive spectrometer (EDS) was used. A Rigaku D-Max 1000 X-ray diffractometer with Cu K radiation was used to conduct X-ray diffraction (XRD) examination on the alloys. Analysis of area fraction of  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li, and intermetallic phases with image processing method in the microstructure was analyzed using Tescan VEGA-II Electron Microscopes.

It was observed that the microstructure of Mg-8Li-2Al alloy was double phases ( $\alpha$ -Mg and  $\beta$ -Li) due to the 8% Li metal, moreover, AlLi intermetallic structure appeared in the microstructure. The microstructure photographs showed that the  $\alpha$ -Mg and  $\beta$ -Li phase sizes were reduced, and the microstructure was improved with the addition of Sn, Nd, and Ca elements compared to the Mg-8Li-2Al alloy. The size of the  $\beta$ -Li and  $\alpha$ -Mg phase reduced with the addition of Sn to the Mg-8Li-2Al alloy.  $\alpha$ -Mg phase turned into a strip shape with the addition of Nd and Ca to Mg-8Li-2Al alloys, the amount of  $\beta$ -Li phase and white particles increased.

The XRD patterns show that the Mg-8Li-2Al alloy was composed of the  $\alpha$ -Mg phase,  $\beta$ -Li phase, and AlLi phases. EDS results demonstrate that Mg, Al, Sn, Nd, and Ca elements were present in the alloys. Still, because of its characteristic X-ray diffraction line energy, EDS cannot detect Li elements. In addition, AlLi phases were located at the  $\alpha/\beta$  boundaries with a size of approximately 1-1,5  $\mu\text{m}$ . According to the EDS and XRD analyses, Mg-8Li-2Al-1,5Nd alloy consisted of  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li,  $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ , and  $\text{Al}_2\text{Nd}$  phases. XRD results show that the Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloy composed of  $\beta$ -Li,  $\alpha$ -Mg, and  $\text{Al}_2\text{Ca}$  phases (approximately 8-12  $\mu\text{m}$  in length and 1-2  $\mu\text{m}$  width).  $\alpha$ -Mg size decreased due to the presence of  $\text{Al}_2\text{Ca}$  particles in the structure. With the addition of Ca, the  $\alpha$ -Mg size became smaller than the  $\alpha$ -Mg size in the Mg-8Li-2Al alloy. However, similar to the Mg-8Li-2Al-1,5Nd alloy,  $\beta$ -Li phase became coarser in the Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloy. After X-ray and EDS analysis of experimental alloys, intermetallic compounds of AlLi,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ ,  $\text{Al}_2\text{Nd}$ ,  $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ , and  $\text{Al}_2\text{Ca}$  were found in the investigated alloys. The mechanical properties of experimental alloys were enhanced by these intermetallic compounds.

The relationship between the area fraction of the  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li, and intermetallic phases in the microstructure of the alloys was measured by using Tescan VEGA-II Electron Microscopes. It was observed that the area fraction of  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li, and intermetallic phases in Mg-8Li-2Al alloy were 85%, 15%, and <1%, respectively. The area fraction of the intermetallic phases occurring in Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd, and Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloys was determined as 5%, 15%, and 8%, respectively. After the individual addition of Sn, Nd, and Ca alloying elements, the amount of  $\alpha$ -Mg decreased while the amount of  $\beta$ -Li phase increased. The experimental results concluded that the changes in the amounts of  $\alpha$ -Mg and  $\beta$ -Li depend on the alloying elements and intermetallic compounds. In comparing Mg-8Li-2Al alloy with Mg-8Li-2Al-1,5Sn alloy, the amount of  $\beta$ -Li phase increased from 15% to 26%, while  $\alpha$ -Mg phase decreased from 85% to 69%, and  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  formed 5%. With the individual addition of Nd and Ca, the  $\alpha$ -Mg phase in Mg-8Li-2Al-1,5Nd, and Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloys decreased from 65% to 40% and 36%, respectively. The area fraction of  $\text{Al}_2\text{Nd}$  and  $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$  formed in Mg-8Li-2Al-1,5Nd alloy was about 15%, while the area fraction of  $\text{Al}_2\text{Ca}$  phase was determined as 8%.

To investigate the mechanical properties of alloys, hardness test and tensile test were performed. Brinell hardness (HB) of the alloys and microhardness (HV) tests of the  $\beta$ -Li and  $\alpha$ -Mg phase tests were carried out. Application times and loads for HB and HV were 15 seconds / 62,5 kg and 15 seconds / 10 g, respectively. At least ten measurements were taken to avoid the influence of any alloying element segregation and to determine the average hardness value at various locations. With respect to the test results, the addition of alloying elements increased the hardness of the base alloy. Brinell hardness values of Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd, and Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloys were measured as 52, 60, 56 and 59 HB, respectively.

The gauge dimensions of Compression and Tensile specimens were 15 x  $\phi$ 10mm and 32 x 6 x 4 mm respectively. At room temperature, tensile and compression tests were performed using an Instron 3367 universal testing equipment at a strain rate of  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . The elongation of samples was measured by using a mechanical extensometer. The tensile strength and elongation values of Mg-8Li-2Al Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd and Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloys were measured as 115 MPa and 12,8%, 136 MPa and 10,4%, 129 MPa and 10%, 125 MPa and 8%. Considering the mechanical properties, the best outcomes were achieved with Mg-8Li-2Al-1,5Sn alloy, compared to Mg-8Li-2Al alloy, with an increase of 18,3% in tensile stress and 34% in

compression stress. Also, the tensile elongation value of Mg-8Li-2Al-1,5Sn alloy, higher than the other experimental alloys, was measured as 10,4%.

Fracture surfaces of all four experimental alloys seemed to belong to brittle fracture regions. The addition of Sn and Nd to Mg-8Li-2Al alloy did not cause a significant decrease in the tensile elongation of the alloy. Intermetallic compounds like Mg<sub>2</sub>Sn, Al<sub>2</sub>Nd, and Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> dispersed in  $\alpha$ -Mg and  $\beta$ -Li phases, unlike brittle Al<sub>2</sub>Ca phases mostly collected at the  $\alpha$ -Mg/ $\beta$ -Li grain boundaries. Therefore, tensile elongation of the Mg-8Li-2Al-1,5Ca alloy decreased.

Electrochemical corrosion tests were performed at room temperature using a computer-controlled Gamry Reference 600+ system. The pH of the solution in the system was adjusted to 5,76 with 0.1 M NaCl solution. Open circuit potential (OCP) was measured after 10 min immersion of the tested samples with an active area of 3,54 cm<sup>2</sup> in the solution for potential stabilization. Potentiodynamic polarization measurements were made at a potential scan rate of 1 mV/s, and the scanning range was set from -1 to + 2,2 V. Electrochemical corrosion test results showed that Mg-8Li-2Al-1,5Sn alloy has the lowest corrosion rate value with 10,49 mpy.



## 1. GİRİŞ

Magnezyum alaşımları, mevcut en hafif metalik malzeme olarak otomotiv, elektronik ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi işlenebilme özelliklerinin yanı sıra geri dönüşüm olanağının da olması alaşıma olan ilgiyi artırmaktadır (Ben-Hamu ve ark., 2007; S. Li ve ark., 2020; J. Song ve ark., 2020; X. M. Xiong ve ark., 2019; Yang ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2016).

İçinde bulunduğumuz yüzyıla kadar farklı kullanım alanları için birkaç seri magnezyum alaşımı geliştirilmiştir. Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn ve Mg-Nadir toprak elementleri gibi seriler bulunur. Ancak geliştirilen alaşımların da bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlar zayıf korozyon davranışı, yüksek sıcaklıklarda düşük sürünme direnci ve düşük mukavemet gibi sıralanabilir (Ben-Hamu ve ark., 2007; S. Li ve ark., 2020; X. M. Xiong ve ark., 2019). Sonuç olarak, endüstrinin gereksinimlerini karşılamak için mevcut alaşımların özelliklerinde ve yeni Mg bazlı alaşımların geliştirilmesinde hala iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Alaşımlama, alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (V. Kumar ve ark., 2012; S. Li ve ark., 2020; X. M. Xiong ve ark., 2019). Mevcut araştırmalar, Li, Ca, Nd ve Sn gibi alaşım elementi ilavelerinin Mg matrisinde ikincil faz partikülleri oluşturarak Mg bazlı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir (V. Kumar ve ark., 2012; Maurya ve ark., 2020).

Magnezyum-Lityum (Mg-Li) alaşımları, mühendislik malzemeleri ve Mg alaşımları arasında en hafif metal olarak büyük ilgi görmekte ve alaşım elementi ilavesi ile mekanik özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır (V. Kumar ve ark., 2012; Ma ve ark., 2018; Yang ve ark., 2021).

Yeni magnezyum alaşımları geliştirirken, mikroyapılarını ve termodinamik davranışlarını anlamak önemlidir. Bu tür bilgileri yalnızca deney yoluyla elde etmek zahmetli ve maliyetlidir. Bu nedenle sistemdeki denge durumunun sıcaklık, basınç ve bileşenlerin bir fonksiyonu olarak görsel olarak temsil eden faz diyagramlarının,

malzeme tasarımı ve geliştirilmesi için yararlı olduğu bilinmektedir. Mg-Li ikili faz diyagramı, Tammann ve Masing (1960) tarafından 20. Yüzyılın başlarında belirlenmiştir. Sonrasında ABD’de LAZ ve LA serisi, Sovyetler Birliği’nde ise MA serisi Mg-Li alaşımları üretilmiştir (Cain ve Labukas, 2020; MA ve ark., 2021). 20. yüzyılın sonuna doğru Japonya ve Çin, Mg-Li alaşımlarını incelemeye başlamıştır. Günümüzde de endüstrinin ihtiyacı olan ultra-hafif malzeme gereksinimi nedeniyle, ultra-hafif özelliğe sahip olan Mg-Li alaşımları araştırma ve uygulamalarda önem arz eden bir konu haline gelmiştir (Cain ve Labukas, 2020).



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Savunma, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, yüksek mukavemet/ağırlık oranlı malzemelerin geliştirilmesi, yakıt verimliliğini artırmak ve çevre kirleticilerini azaltmak kritik öneme sahiptir. Magnezyum alaşımları hafiflikleri, yüksek özgül güçleri ve geri dönüştürülebilirliklerinden dolayı bu yüzyılda Yeşil Mühendislik Malzemeleri arasında yerini almıştır. Li ( $\rho = 0,53 \text{ gr/cm}^3$ ) elementinin düşük yoğunluğu nedeniyle Mg-Li esaslı alaşımların yoğunluğu  $1,77-1,83 \text{ gr/cm}^3$ 'ten  $1,3-1,65 \text{ gr/cm}^3$ 'e düşürülebilmektedir (J. Song ve ark., 2020; Yang ve ark., 2021).

Mg alaşımları az sayıda olan kayma sistemleri ile Hegzagonal Sıkı Paket (HSP) yapısına sahipken, Mg-Li alaşımları alaşıma ilave edilen Li konsantrasyonuna bağlı olarak üç farklı kristal yapıya sahiptir ve bu benzersiz özellik araştırmacıların ilgisini çekmektedir. İlk yapı, ağırlıkça maksimum %5,7 Li içeren HSP  $\alpha$ -Mg yapısıdır. İkinci yapı, ağırlıkça %5,7-10,3 arasında Li içeren çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapısıdır, üçüncü yapı ise ağırlıkça %10,3'ün üzerinde Li içeren HMK yapısındaki  $\beta$ -Li alaşımlarıdır (V. Kumar ve ark., 2012; X. M. Xiong ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2016). Bu üç farklı yapının özellikleri karşılaştırıldığında  $\alpha$ -Mg yapılı alaşımlar en yüksek mukavemete ancak düşük deformasyon kabiliyetine sahiptir.  $\beta$ -Li alaşımları en düşük mukavemete sahip olmakla birlikte,  $\alpha$ -Mg alaşımlarına göre daha fazla kayma sistemi içermeleri nedeniyle en yüksek sünekliğe ve yüksek deformasyon kabiliyetine sahiptirler. Öte yandan, bahsedilen üç farklı Mg-Li alaşım yapısından dubleks fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) alaşımları, yüksek süneklik, yüksek mukavemet ve deformasyon kabiliyeti nedeniyle araştırmacılar tarafından daha fazla ilgi görmektedir (Maurya ve ark., 2020; Zhou ve ark., 2016).

Bununla birlikte, Mg-Li alaşımlarının nispeten düşük mukavemet, kararsız mekanik özellikler ve düşük korozyon direnci gibi mühendislik uygulamalarında hala çözülmesi gereken bir takım dezavantajları vardır. Al, Zn, RE (Nadir Toprak Elementleri) vb. elementlerle alaşımlama, bu sorunları çözmek ve daha iyi özelliklere sahip Mg-Li esaslı alaşımlar elde etmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (V. Kumar ve ark., 2012; Ma ve ark., 2018). Alüminyumun magnezyumdaki yüksek

çözünürlüğü nedeniyle, alaşımın yoğunluğundaki küçük bir artışa rağmen mukavemeti artırma potansiyeli yüksek bir alaşım elementidir (Fu ve ark., 2018; X. Xiong ve ark., 2019). Al ilavesi sonucunda katı eriyik sertleşmesi gözlenir ve intermetalikler mikroyapıyı iyileştirir. Böylece Mg-Li alaşımlarının çekme mukavemeti ve sertliği artar (Fu ve ark., 2018; Homayun ve Afshar, 2014). Homayun ve Afshar (2014), alaşımlara ağırlıkça %3'e kadar Al ilavesinin mikroyapı üzerindeki olumlu etkisinden dolayı daha yüksek korozyon direnci ve daha yüksek çekme ve basma mukavemeti sağlamıştır. Aksine, ağırlıkça %3'ten fazla Al eklendiğinde alaşımların korozyon direnci ve mekanik mukavemeti önemli ölçüde azalmış ve bu olay tane sınırlarında kırılabilir intermetalik bileşik ağlarının ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) oluşumuna neden olmuştur. LZ91 alaşımı üzerinde yapılan bir araştırmaya göre, ağırlıkça %0,6 Al ilavesi, alaşımın çekme uzama değerini düşürmeden mukavemet ve korozyon direncinde artış sağlamıştır (Ben-Hamu ve ark., 2007).

Ca metali toprak alkali metallere biridir. Düşük erime sıcaklığına (842 °C) ve düşük yoğunluğa (1,55 gr/cm<sup>3</sup>) sahiptir, ayrıca magnezyum alaşımlarının sünekliğini ve mukavemetini iyileştirebilir ve mikro yapının iyileştirilmesinde olumlu etkileri vardır (J. S. Zhang ve ark., 2013). Önceki araştırmalar, Mg-Al alaşımlarına Ca eklenmesinin Mg-Al alaşımlarında  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetaliti oluşumunu engellediğini ve mikroyapı üzerinde tane inceltici etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Homayun ve Afshar, 2014; J. S. Zhang ve ark., 2013). Ayrıca Ca ile alaşımlama  $Al_2Ca$  ve  $Mg_2Ca$  fazlarının oluşmasına neden olmuş, böylece alaşımın korozyon direnci ve mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir (Nene ve ark., 2014; Parfenov ve ark., 2020; G. S. Song ve Kral, 2005; J. S. Zhang ve ark., 2013).

Nadir toprak elementlerinin Mg-Li alaşımlarındaki en belirgin etkisi hem mukavemeti hem de uzamayı artırmasıdır. LA141 alaşımı ile yapılan bir çalışmada, artan Nd ilavesi ile yapıda  $Al_2Nd$  fazı oluşmuş, mikroyapı çalışmalarında tane boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda hem çekme mukavemeti değeri hem de sertlik değeri artmıştır (Liu ve ark., 2008). Çalışmada, Mg-Li alaşımlarında artan Nd miktarı ile uzama ve çekme mukavemeti değerleri yükseltilmiş ve ağırlıkça %1.6 Nd ilavesi ile maksimum uzama değeri elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %2 Nd ilavesi ile  $Al_2Nd$  fazları yapıda çatlak oluşumuna neden olmuş ve uzama değerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (M. Li ve ark., 2012).

Mg alaşımlarının mukavemetini önemli ölçüde artırabilen alaşım elementlerinden biri de Sn elementidir (A. Luo ve Pekguleryuz, 1994). Sn elementi, RE elementlerine göre düşük ergime sıcaklığına (231.9°C) ve düşük maliyete sahiptir. Ayrıca Mg-Li alaşımlarına ilave edildiğinde Mg<sub>2</sub>Sn fazı oluşmakta, bu faz mukavemet ve korozyon direncinde artış sağlamaktadır. Sn elementi bu özelliklerinden dolayı araştırmacıların ilgisini çekmektedir (V. Kumar ve ark., 2012; Qu ve ark., 2012; Yang ve ark., 2021). Sn ilavesi sonucunda yapıda Mg<sub>2</sub>Sn fazı oluşarak dislokasyon hareketleri engellenir ve mekanik özellikler iyileşir.



### 3. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

#### 3.1. Magnezyum

Magnezyum  $1,74 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip olması nedeniyle,  $2,5 \text{ g/cm}^3$  ile Al,  $4,4 \text{ cm}^3$  ile Ti ve  $7,6 \text{ cm}^3$  ile paslanmaz çeliğin diğer yapısal malzemelerinin yoğunluğuna kıyasla (Tablo 3.1) en hafif metalik malzemedir (Polmear, 2012).

Mg günümüzde, Al, Ti ve çeliklerden sonra en yaygın olarak kullanılan yapısal metaldir. Mg fiziksel özellikleri de göz önüne alındığında (Tablo 3.2), Al, Ti ve çelikler yerine kullanılabilir kadar çok umut verici bir metaldir. Neredeyse polimerlerinki kadar yoğunluğa sahip olan Magnezyum, Çelik ve alüminyum alaşımları yerine Mg alaşımı kullanılırsa yaklaşık %70 ve %30 ağırlık tasarrufu sağlanabilir (A. Kumar ve ark., 2018; Polmear, 2012). Bu nedenle en hafif yapısal metaller arasında yer alan magnezyum ve magnezyum alaşımları, otomotiv ve havacılık işletmelerinde giderek daha önemli hale gelmektedir (Kumar ve ark., 2015; Thomas, 2012).

**Tablo 3.1.** Magnezyum alaşımlarının yoğunluğunun diğer alaşımlarla karşılaştırılması.

Alaşım	Paslanmaz çelikler	Ti alaşımları	Al alaşımları	Mg alaşımları
Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )	7,6-8,0 (%77)	4,4-4,8	2,5-2,9 (%33)	1,74-1,87

**Tablo 3.2.** Saf Magnezyum metalinin fiziksel özellikleri (A. Kumar ve ark., 2018).

Fiziksel Özellikler	Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )	Ergime derecesi ( $^{\circ}\text{C}$ )	Öz ısı ( $\text{Cal/gr } ^{\circ}\text{C}$ )	Elektriksel iletkenlik (%IACS)	Termal iletkenlik ( $\text{W/mK}$ )	Kristal yapı	Elastisite Modülü (GPa)
Saf Mg	1,74	650	0,24	39	155	HSP	45

Magnezyum ve alaşımları, diğer mühendislik malzemelerine göre, örneğin, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, manyetik olmayan tatmin edici ısı iletimi ve döküm esnasında iyi akışkanlık, negatif elektrokimyasal potansiyel, düşük ısı kapasitesi, geri dönüştürülebilir ve toksik olmama gibi çok sayıda dikkate değer özelliğe sahiptir. Bu özellikler, magnezyum ve alaşımlarını, özellikle mukavemet/ağırlık oranının temel bir sorun olduğu otomotiv ve havacılık endüstrilerinde giderek daha çekici hale getirmektedir. Magnezyum, otomotiv, havacılık, tıp ve elektrikli el aletleri endüstrilerine hafif uygulamalar için kayda değer açık kapılar sunmaktadır (Dimeski ve Srebrenkoska, 2014; Hort ve ark., 2011; Polmear, 2012).

Katı eriyik güçlendirme ve çökelti oluşturularak güçlendirme dahil olmak üzere çeşitli metodolojilerden faydalanarak mukavemeti daha yüksek magnezyum alaşımları oluşturmak için geçen yakın zamanda çalışmalar başlatıldı. Bu ve benzer çalışmalarda kullanılan alaşım elementlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi Tablo 3.3'de görülmektedir (Açıkgöz, 2009).

**Tablo 3.3.** Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi (Açıkgöz, 2009).

Alaşım elementi	Mekanik özelliklere etkisi
Aluminyum (Al)	Çekme mukavemetini ve sertliği artırır İntermetalik fazın oluşumunu sağlar (Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub> ) Dökülebilirliği artırır Korozyon direncini artırır
Çinko (Zn)	Çekme mukavemetini ve sertliği artırır Tane yapısını küçültür Dökülebilirliği artırır Korozyon direncini artırır
Mangan (Mn)	Akma mukavemetini artırır Demirin etkisini azaltırken korozyon direncini artırır

**Tablo 3.3. (Devamı)** Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi (Açıkgöz, 2009).

Alaşım elementi	Mekanik özelliklere etkisi
Silisyum (Si)	Sürünme direncini artırır
	Mg <sub>2</sub> Si intermetaliklerini oluşturur
	Ergimiş metalin viskozitesini artırır
	Dökülebilirliği azaltır
Nadir toprak elementleri (RE)	Katılma sıcaklığını azaltır
	Çekme mukavemetini ve sertliğini artırır

### 3.2. Magnezyum Alaşımaları

Magnezyum, hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıya sahip olduğundan, farklı kristal yapıları malzemeler ile kıyaslandığında yapısında daha az kayma sistemi barındırmaktadır. Bu nedenle Mg saf olarak kullanıldığında göreceli olarak düşük olan mukavemet ve korozyon değerleri geliştirmek amacıyla, 20. yüzyılın başlarında Al, Zn, Mn vb. gibi alaşım elementleri ile alaşımlandırılarak üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır (K.U. Kainer, 2003). Bu alaşımların isimlendirilmesi Amerikan Standartlarına (ASTM) göre belli kurallara göre yapılmaktadır. Örneğin, ‘‘A’’ harfi alüminyum, ‘‘E’’ harfi nadir toprak elementlerini, ‘‘M’’ harfi ise mangan elementini belirtir. Alaşım isimleri içinde yer alan rakamlar ise alaşımın içerdiği elementlerin ağırlıkça yüzde miktarlarını belirtmektedir. Rakamlardan sonra harfler de gelebilmektedir. Bu harfler ise alaşıma uygulanan değişik işlemleri simgelemektedir. Çeşitli Mg alaşım isimleri Tablo 3.4’ te yer almaktadır.

**Tablo 3.4** Magnezyum alaşım isimleri (Açıkgöz, 2009).

Seri Adı	Açıklama
AE Serisi	Mg-alüminyum ve nadir toprak alaşımları Örnek: AE42

**Tablo 3.4. (Devamı) Magnezyum alaşım isimleri (Açıkğöz, 2009).**

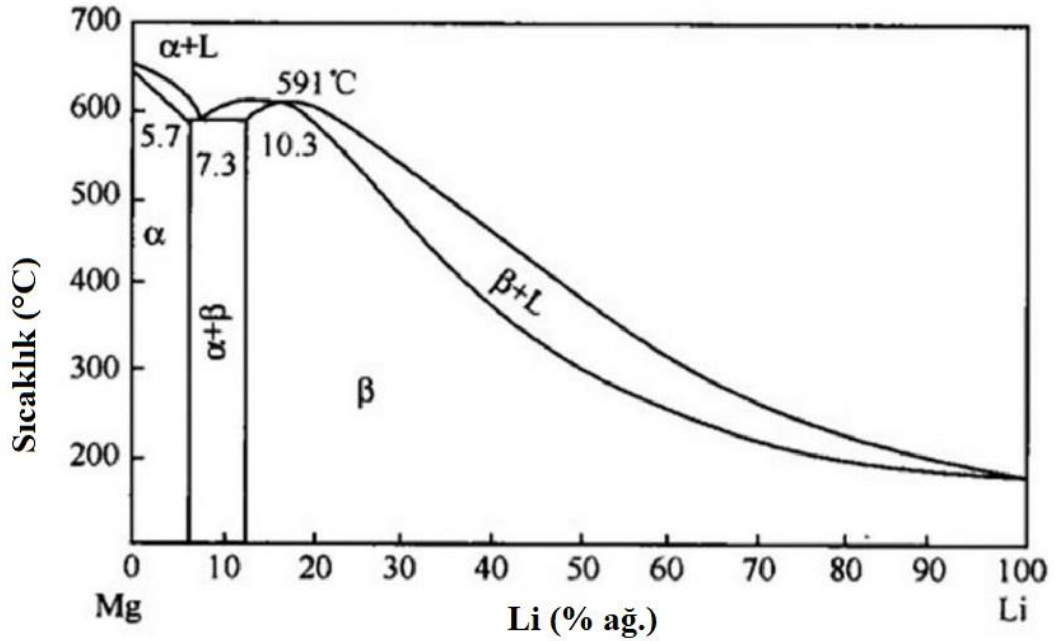
Seri Adı	Açıklama
AJ Serisi	Mg- alüminyum ve stronsiyum alaşımları Örnek: AJ52 HP
AM Serisi	Mg-alüminyum ve mangan alaşımları Örnek: AM60B
AS Serisi	Mg-alüminyum ve silisyum alaşımları Örnek: AS31
AZ Serisi	Mg-alüminyum ve çinko alaşımları Örnek: AZ91D
EQ Serisi	Mg-nadir toprak gümüş ve bakır alaşımları Örnek: EQ21
EZ Serisi	Mg-nadir toprak ve çinko alaşımları Örnek: EZ33A
HM Serisi	Mg-toryum ve mangan alaşımları Örnek: HM21A
HZ Serisi	Mg-toryum ve zirkonyum alaşımları Örnek: HZ32A
QE Serisi	Mg-gümüş ve nadir toprak alaşımları Örnek: QE22A
WE Serisi	Mg- itriyum ve nadir toprak alaşımları Örnek: WE43
ZC Serisi	Mg- çinko ve bakır alaşımları Örnek: ZC71
ZK Serisi	Mg-çinko ve zirkonyum alaşımları Örnek: ZK11
ZT Serisi	Mg-çinko ve toryum alaşımları Örnek: ZT32

### 3.2.1. Mg-Li alaşımları

Magnezyum'a HMK yapıya sahip Lityum'un ilave edilmesiyle oluşan alaşımın kristal yapısında Mg'ye kıyasla daha fazla aktif kayma sistemi oluşturulur, bu sayede Mg'nin mukavemeti ve süneklik değerleri geliştirilmiş olur. Ayrıca lityum ilavesi sonrasında 1,35-1,65 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip son derece hafif bir alaşım geliştirilmiş olur ve Mg'nin uzama değerleri artırılmış olur (X. Li ve ark., 2020; G. B. Wei ve ark., 2015). Şekil 3.1'deki Mg-Li faz diyagramı incelendiğinde, iğerdiği Li konsantrasyonuna bağlı olarak üç farklı kristal yapı görölmektedir. Bunlardan ilki ağırlıkça maksimum %5,7 Li içeren Hegzagonal Sıkı Paket (HSP)  $\alpha$ -Mg yapısıdır. İkinci yapı, ağırlıkça %5,7-10,3 arasında Li içeren çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapısıdır, üçüncü yapı ise ağırlıkça %10,3'ün üzerinde Li içeren HMK yapısındaki  $\beta$ -Li alaşımıdır.  $\alpha$ -Mg yapılı alaşımlar yüksek mukavemete ancak düşük deformasyon kabiliyetine sahiptir.  $\beta$ -Li alaşımları



düşük mukavemete sahipken, fazla kayma sistemi içermeleri nedeniyle en yüksek süneklığe ve yüksek deformasyon kabiliyetine sahiptirler. Dupleks fazlı  $\alpha + \beta$  alaşımları ise, yüksek mukavemetin yanı sıra süneklik ve deformasyon kabiliyetine de sahiptir (Guo ve ark., 2020; Król ve ark., 2020; Maurya ve ark., 2020; Zhou ve ark., 2016).



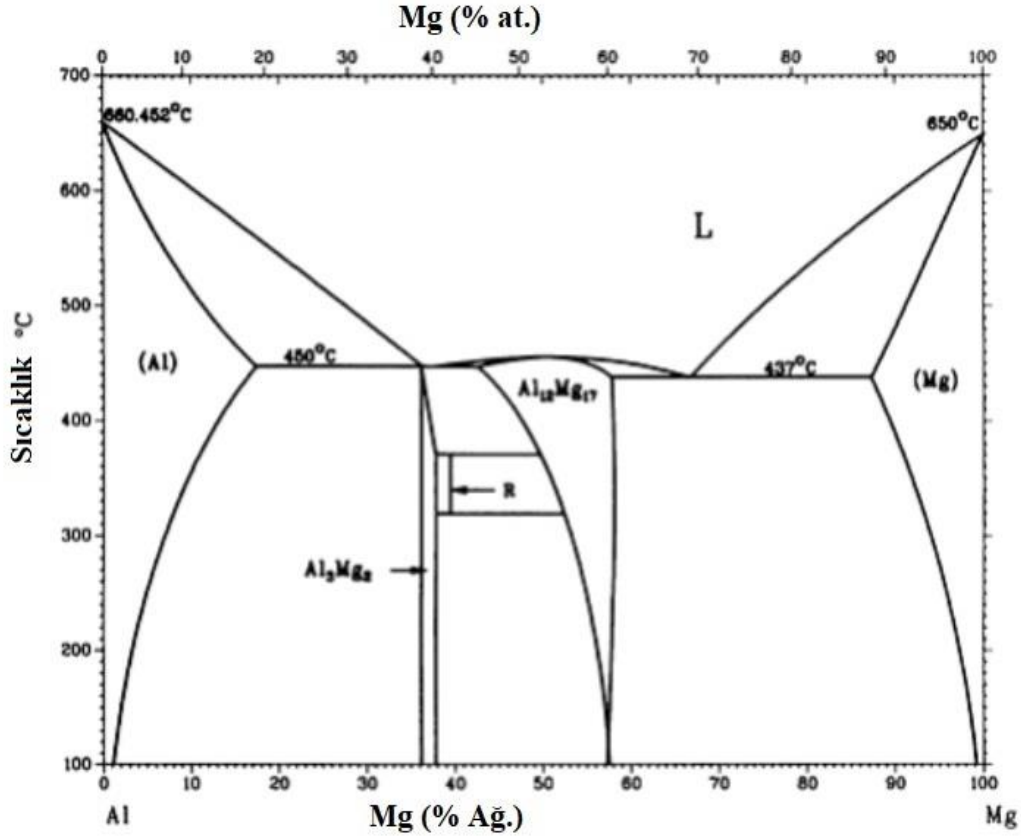
Şekil 3.1. Mg-Li faz diyagramı (Peng ve ark., 2022).

Bununla birlikte daha önce yapılan çalışmalarda, LA91 alaşımı, düşük mukavemet ve zayıf korozyon direnci gibi tipik dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için kompozit takviyesi, hızlı katılaşma, yönlü katılaştırma ve eşit kanallı açısız presleme (ECAP) gibi teknikler birçok araştırmacılar tarafından uygulanmış ve bu yaklaşımların çoğu tane inceltme esasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, bu teknikler, yüksek maliyet ile daha sonraki uygulamaları sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, tane inceltici alaşım elementi ilavesi, kolay işletilmesi ve maliyet tasarrufu sağlaması nedeniyle halen mevcut tane inceltme teknikleri arasında en önemli ve etkili yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir (Y. Zeng ve ark., 2013).

### 3.2.2. Mg-Al alaşımları

Magnezyum içerisinde diğer elementlere kıyasla çözünürlüğü nispeten yüksek olan alüminyumun, magnezyum alaşımlarında kullanımı son derece yaygındır. Şekil 3.2 Al-Mg faz diyagramı incelendiğinde, alüminyumun magnezyum içerisindeki

çözünürlüğü ağırlık %12,7 iken sıcaklık oda sıcaklığına yaklaştıkça %2'ye kadar düşmektedir. Ayrıca 437 °C derece sıcaklıkta ötektik (L-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> + α-Mg) bir reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu sıcaklıkta Al'un maksimum çözünürlüğü ağırlık %12,7 iken, sıcaklık oda sıcaklığına yaklaştıkça azalır. Al ilave edildiği Mg alaşımlarındaki konsantrasyonuna bağlı olarak, ağırlık %2'nin üzerindeki değerlerde Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik oluşumu gözlenirken, ağırlık %8 ve üzerindeki değerlerde Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik tane sınırlarında yoğunlaşarak alaşımın mekanik özelliklerine kötü yönde etki etmektedir. Daha önce yapılan araştırmalarda, Al ilave edildikten sonra Mg-Al bazlı alaşımların dökülebilirliğin arttığı, meydana gelen katı eriyik ve çökeltme sertleşmesi sayesinde mukavemetin arttığı sonuçlarına varılmıştır (Açıkgöz, 2009; Kleiner ve ark., 2002; Nene ve ark., 2014; Pardo ve ark., 2008; L. Y. Wei ve Dunlop, 1996; X. M. Xiong ve ark., 2019; L. Zhang ve ark., 2009).



Şekil 3.2. Al-Mg faz diyagramı (ASM International, 1998).

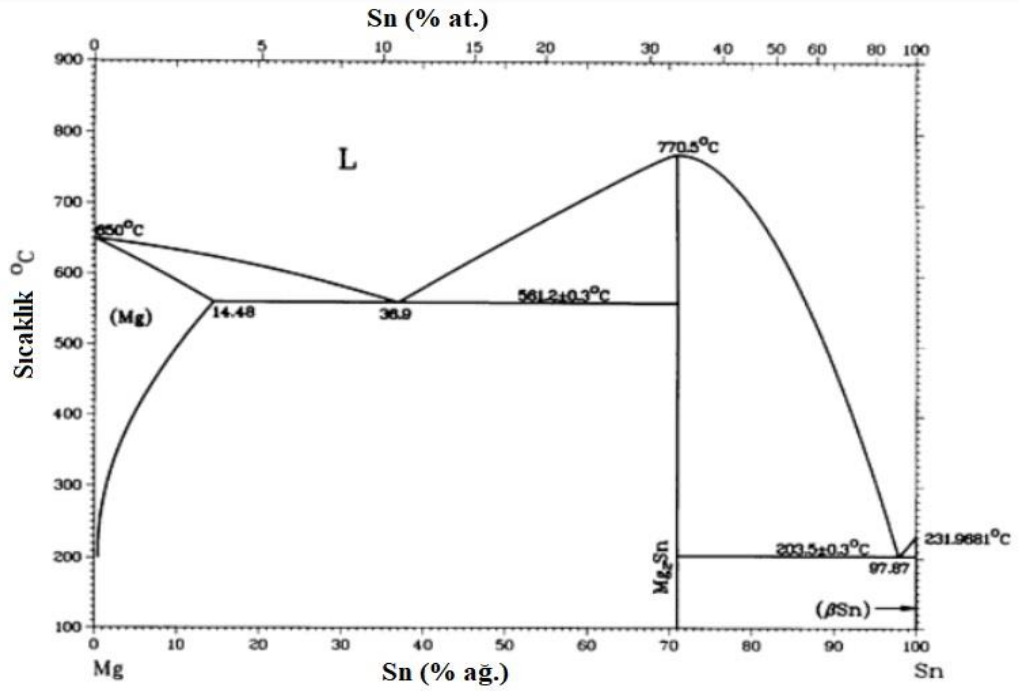
### 3.2.3. Mg-Sn alaşımları

20. yüzyıl başlarında kullanılmaya başlayan Mg-Sn bazlı alaşımlar literatürde genellikle AT serisi magnezyum alaşımı olarak bilinir. Şekil 3.3'te Mg-Sn faz

diyagramı görülmektedir. Faz diyagramına göre Sn, Mg içerisinde 561 °C derecede yaklaşık olarak ağırlık %14,48 oranında çözünmektedir ve katı eriyik sertleşmesi sayesinde alaşımın mukavemetini artırmaktadır. Ayrıca 561 °C derecede ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir ve alaşımda Mg<sub>2</sub>Sn intermetalikliği oluşmaktadır. Son derece kararlı olan bu intermetalik 770 °C ergime sıcaklığına sahiptir. Bu sayede alaşımın sürünme direncinin artmasına katkıda bulunur (Cain ve ark., 2019; Elsayed ve ark., 2013; Huang ve ark., 2007; Khalilpour ve ark., 2016; Kim ve ark., 2008; Mahmudi ve Moendarbari, 2013; Wang ve ark., 2010; X. P. Zhang ve ark., 2008).

Literatür incelendiğinde, Sn ilavesi ile birlikte Mg-Sn alaşımlarının çekme ve sürünme değerleri artmakta ve alaşımın korozyon hızı da azalmaktadır (Huang ve ark., 2007; Mahmudi ve Moendarbari, 2013; Wang ve ark., 2010; X. P. Zhang ve ark., 2008).

Yeni alaşımlar için temel gereksinimlerden birinin, mevcut ticari magnezyum ve alüminyum alaşımları ile fiyat rekabet yeteneği olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, ticari alaşımlara kıyasla düşük maliyetli ve üstün özelliklere sahip yeni bir alaşım geliştirmeye büyük önem verilmektedir (J. Zhang ve ark., 2008). Aynı zamanda RE elementlerine kıyasla Sn elementinin bulunabilirliği daha kolay ve daha düşük maliyetle elde edilebildiği için son zamanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır (Jeong ve Kim, 2014; Ma ve ark., 2018; Yang ve ark., 2021).

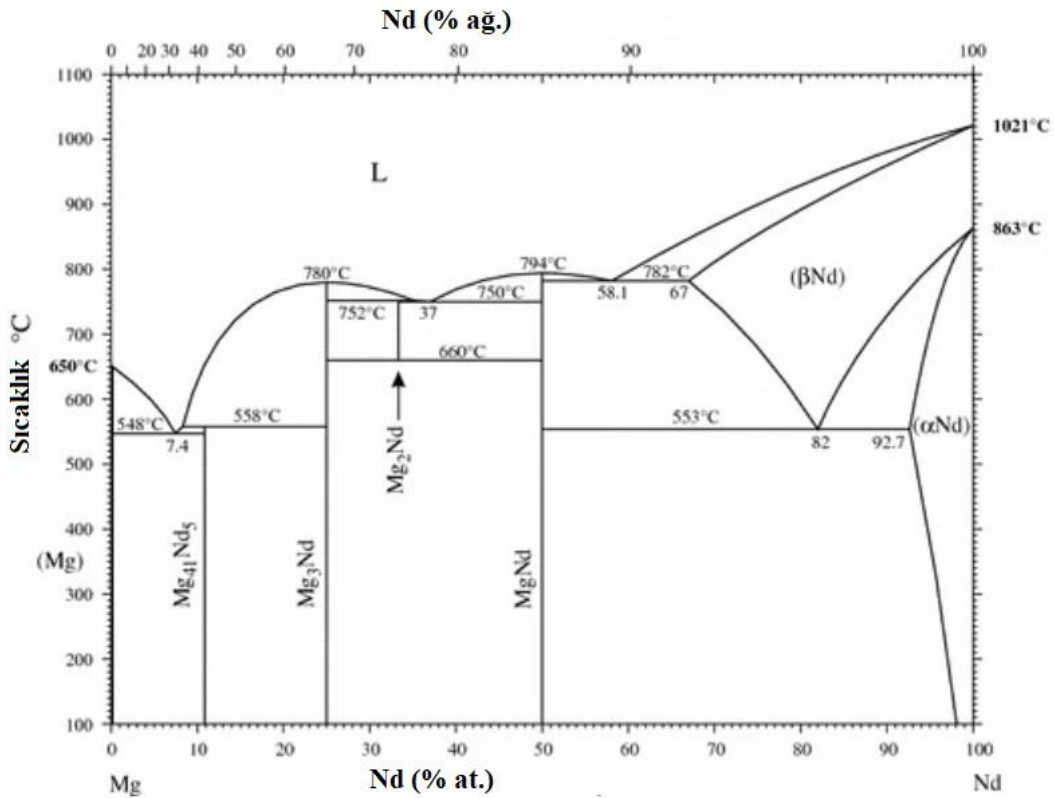


Şekil 3.3. Mg-Sn faz diyagramı (ASM International, 1998).

### 3.2.4. Mg-Nadir toprak elementleri alaşımları

Mg alaşımlarında kullanılan nadir toprak elementleri (İtriyum, Seryum, Gadolinyum, Lantanyum, Erbiyum, Neodimyum, Disprozyum vb. gibi ), magnezyum alaşımlarının mikroyapılarını değiştirmek ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ding ve ark., 2014; Imandoust ve ark., 2017; Mahmudi ve ark., 2011; Y. L. Song ve ark., 2007).

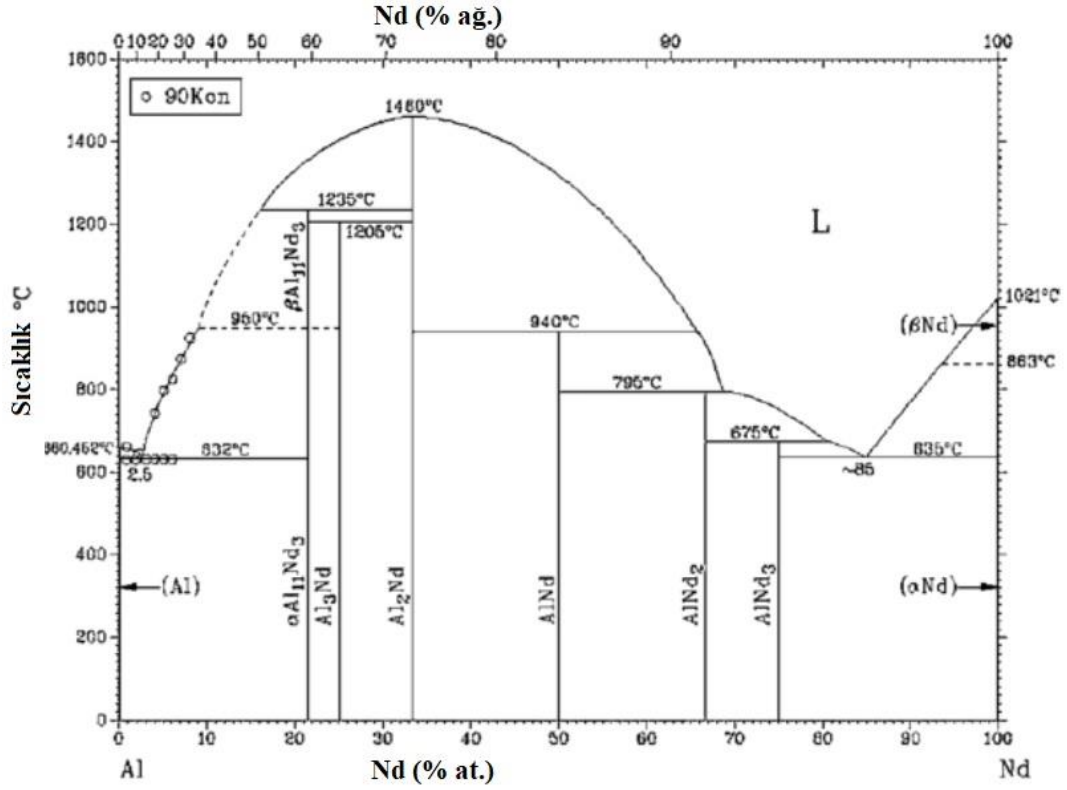
Genel olarak, Mg'nin RE ilavesiyle güçlendirilmesinin, bir katı eriyik güçlendirme mekanizması ve bir çökeltme sertleştirme mekanizması ile olduğuna inanılmaktadır. Şekil 3.4 Mg-Nd faz diyagramını incelendiğinde Nd yaklaşık 553 °C'de en düşük ötektik sıcaklığa sahiptir ve yüksek katı çözünlüğü nedeniyle Mg'ye eklendiğinde çökeltme sertleşmesinde en iyi sonucu gösterir (Tekumalla ve ark., 2014).



Şekil 3.4. Mg-Nd faz diyagramı (Okamoto, 2007b).

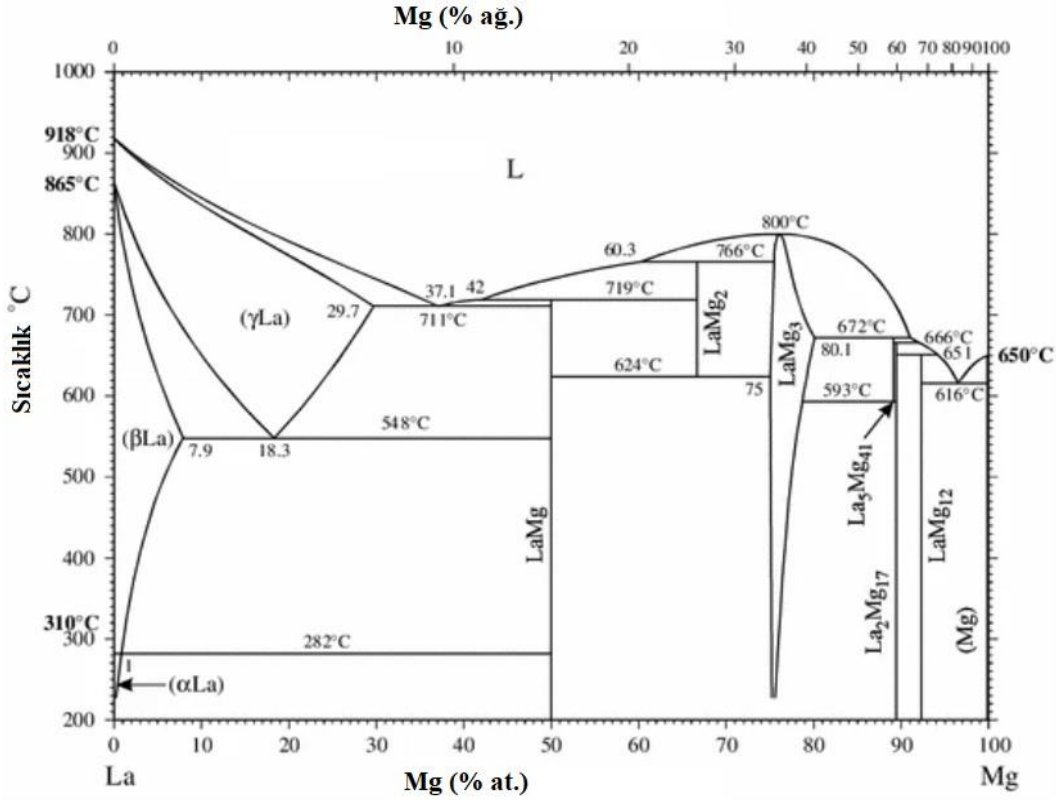
Mg, Al ve Nd için elektronegatiflik değerleri sırasıyla 1,31, 1,61 ve 1,14'tür. Al-Nd, Mg-Al'e göre daha yüksek bir elektronegatiflik farkına sahiptir. Bu nedenle Al içeren Mg alaşımlarına ilave edilen Nd elementleri, elektronegativite farkından dolayı, katılaşma esnasında Mg yerine Al ile reaksiyona girmeyi tercih eder (Acikgoz ve Kurnaz, 2022). Al içeren Mg alaşımlarında kullanılan nadir toprak elementleri ise, Al-

RE intermetalik fazları oluşturarak katılaşma sırasında  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının oluşumunu engellerler (Mishra ve ark., 2017) Mishra ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada Mg-4Al alaşımına nadir toprak elementlerinin eklenmesi, Şekil 3.5'te Al-Nd faz diyagramında görülen  $Al_2RE$  ve  $Al_{11}RE_3$  fazlarının oluşumuna neden olduğu ifade edilmiştir.

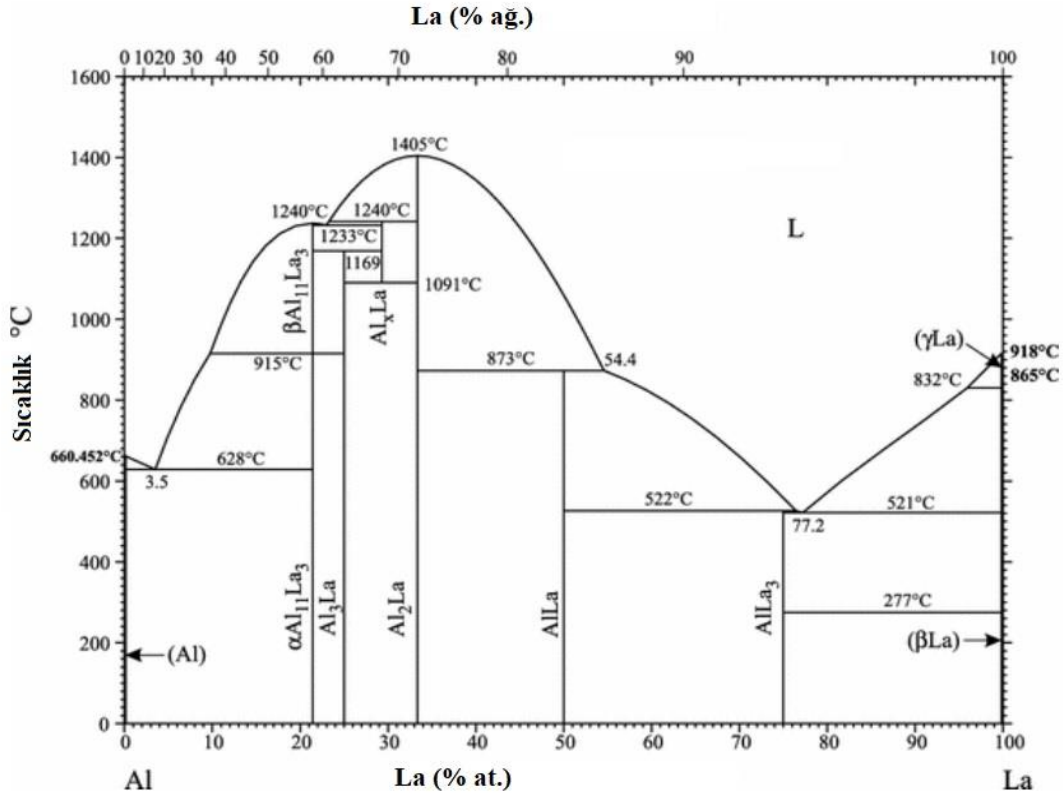


Şekil 3.5. Al-Nd faz diyagramı (Mishra ve ark., 2017).

Şekil 3.6 La-Mg faz diyagramında görüldüğü gibi, Lantanyum, Mg'de sınırlı katı çözünürlüğe sahip olduğu ve 616 °C gibi çok yüksek bir ötektik sıcaklığa sahip olduğu için Mg-La alaşımları çökelti sertleşmesine uğramazlar. Nd alaşım elementine benzer şekilde La elementi de Al içeren Mg alaşımlarında kullanılan bir diğer RE elementidir. La elementi Mg-Al alaşımlarına ilave edildiğinde, elektronegativite farkından dolayı, katılaşma esnasında Mg yerine Al ile reaksiyona girmeyi tercih ederek Şekil 3.7 Al-La faz diyagramında görülen  $Al_2RE$  ve  $Al_{11}RE_3$  fazlarının oluşumuna neden olur (Parande ve Gupta, 2022). Mg-Li bazlı alaşımların mukavemetinin biraz düşük olduğunu belirten araştırmacılar, bu sorunu gidermek için La alaşım elementini kullanarak, alaşımın mukavemetini artırdıklarını rapor etmişlerdir (Fei ve ark., 2015).



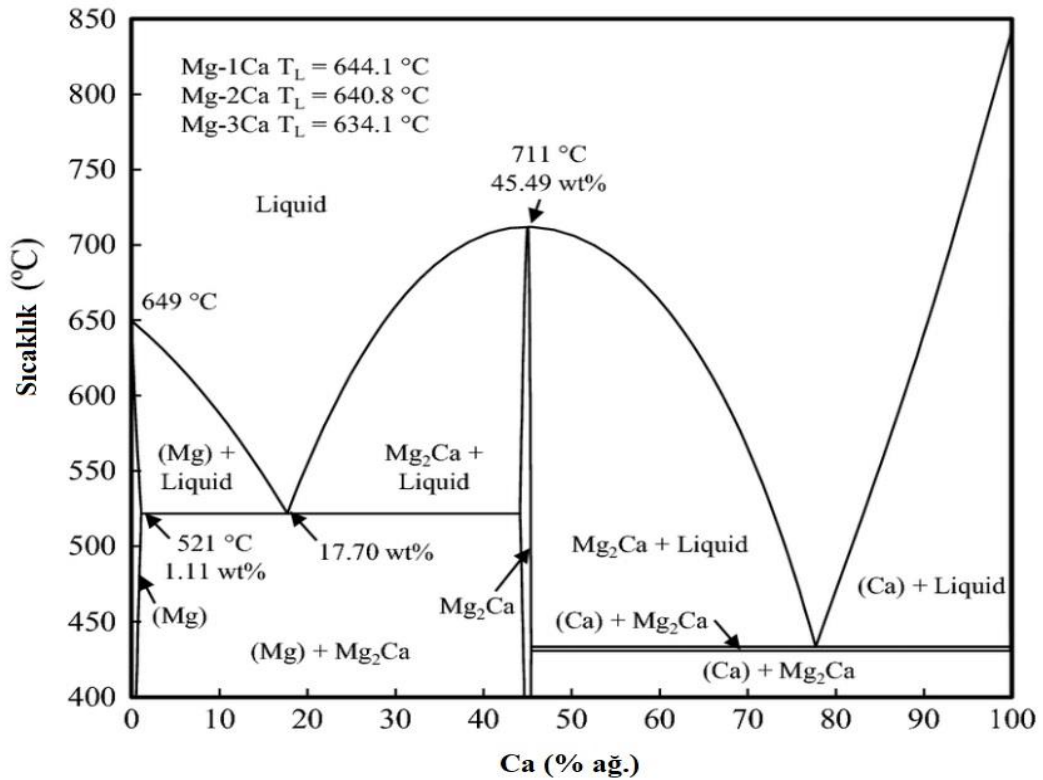
Şekil 3.6. La-Mg faz diyagramı (Okamoto, 2013).



Şekil 3.7. Al-La faz diyagramı (Okamoto, 2007a).

### 3.2.5. Mg-Ca alaşımları

Avantajlı özelliklerine rağmen,  $\beta$ -Li fazı içeren Mg-Li alaşımlarının mukavemeti, uygulama alanlarını büyük lde sınırlayan düşük sertlikteki  $\beta$ -Li fazı nedeniyle nispeten dşktir. Bu sorunu zmek için alaşımlama, tane inceltme, plastik deformasyon ve ısıl işlem gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında Al ve Ca elementleri gibi geleneksel elementlerin eklenmesi nispeten basit ve etkili bir yaklaşımdır (Zhou ve ark., 2016). Şekil 3.8 Mg-Ca faz diyagramında görüldüğü gibi, 521 °C’de ötektik sıcaklığa sahiptir ve bu sıcaklıkta Ca ađ. %1,1 znrlğe sahiptir. Bu znrlk oda sıcaklığına yaklaştığa azalmaktadır. Katılaşma esnasında  $Mg_2Ca$  ikincil fazları oluşmaktadır. Ayrıca, kalsiyumun ergimiş magnezyumun alev almasını ve oksidasyonunu engellediği ve Mg-Li alaşımlarının korozyon direncini iyileştirdiği bilinmektedir. Bu alaşımlar çoğunlukla kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmektedir (Zhou ve ark., 2016).



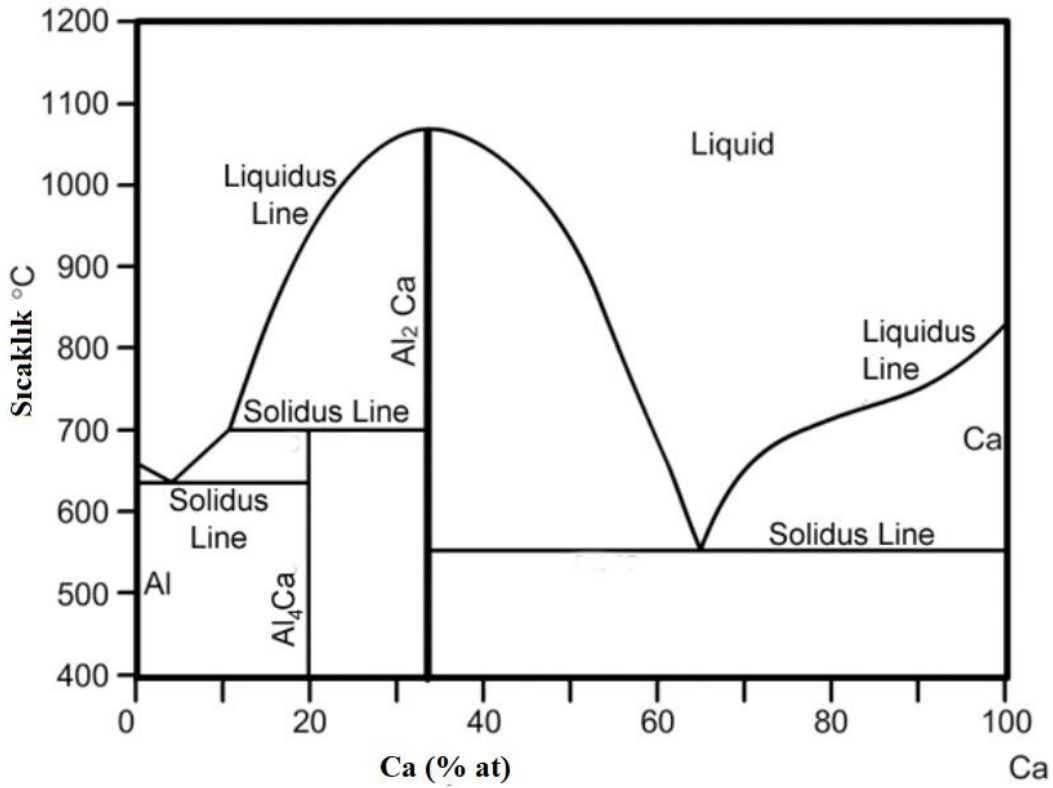
Şekil 3.8. Mg-Ca faz diyagramı (Villegas-Armenta ve ark., 2020).

Geçtiğimiz yıllarda, pek çok tane inceltici veya alaşım elementi, iyi Mg-Li mikroyapılara sahip malzemeleri üretmek için yaygın olarak kullanılmıştır. Bunlara rnek olarak Ti, B, Sr and RE elementleri sayılabilir. Bu elementler mikroyapıda tane inceltici görevlerini yapmaktadırlar fakat yine de daha uygun maliyetli tane incelticiler



aranmaktadır. Bu konuda kalsiyum kaynakları yeryüzünde Al-Ti-B alaşımı, stronsiyum ve diğer RE elementlerinden daha boldur ve Mg-Li bazlı alaşımda iyi bir tane inceltici element olduğu kanıtlanmıştır (Y. Zeng ve ark., 2013). Ayrıca Ca, magnezyum alaşımlarında mikroyapının iyileştirilmesinde olumlu etkilerinin yanı sıra alaşımın sünekliliğini ve mukavemetini iyileştirebilir özellikleri de vardır (X. Xiong ve ark., 2019; J. S. Zhang ve ark., 2013).

Ca elementi Al içeren Mg alaşımlarına da ilave edilerek çalışmalar yapılmıştır ve Mg-Al alaşımlarına ilave edildiğinde, elektronegativite farkından dolayı, katılma esnasında Mg yerine Al ile reaksiyona girmeyi tercih ederek Şekil 3.9 Al-Ca faz diyagramında görülen  $Al_2RE$  fazının oluşumuna neden olur (Acikgoz ve Kurnaz, 2022). Ca ilavesi ile koruyucu  $Al_2Ca$  ve  $(Mg, Al)_2Ca$  fazlarını oluşturarak Mg alaşımlarının korozyon direncini artırabileceği bildirilmiştir. Aynı zamanda, yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri de tane inceltme ile iyileştirilir. Buna ek olarak Mg-Al-Ca alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin Ca/Al oranından etkilenmesi,  $Al_2Ca$  fazının güçlendirme etkisinin  $Mg_2Ca$  fazından daha iyi olduğunu göstermektedir (X. Xiong ve ark., 2019; L. Zhang ve ark., 2015).



Şekil 3.9. Al-Ca faz diyagramı (The esa impress team, 2015).



### **3.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları**

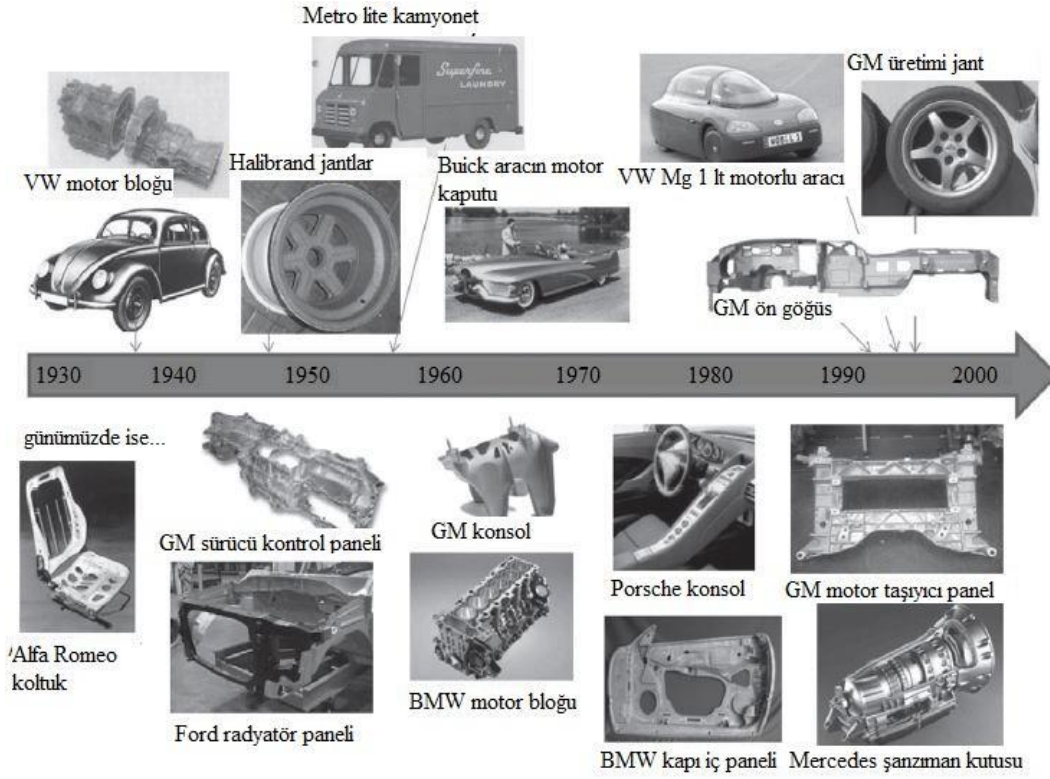
Magnezyum ve alaşımlarının sahip olduğu üstün ve hafif özelliklerinden dolayı son yıllarda havacılık, otomobil, spor, tüketici elektroniği, implant malzemesi, sağlık gereçleri ve tıp alanları gibi çok sayıda uygulama alanı bulunmaktadır (Gokhale ve ark., 2019; Kulekci, 2008; Mallick, 2012; Powell ve ark., 2021; Viswanadhapalli ve Bupesh Raja, 2019).

#### **3.3.1. Otomotiv endüstrisi**

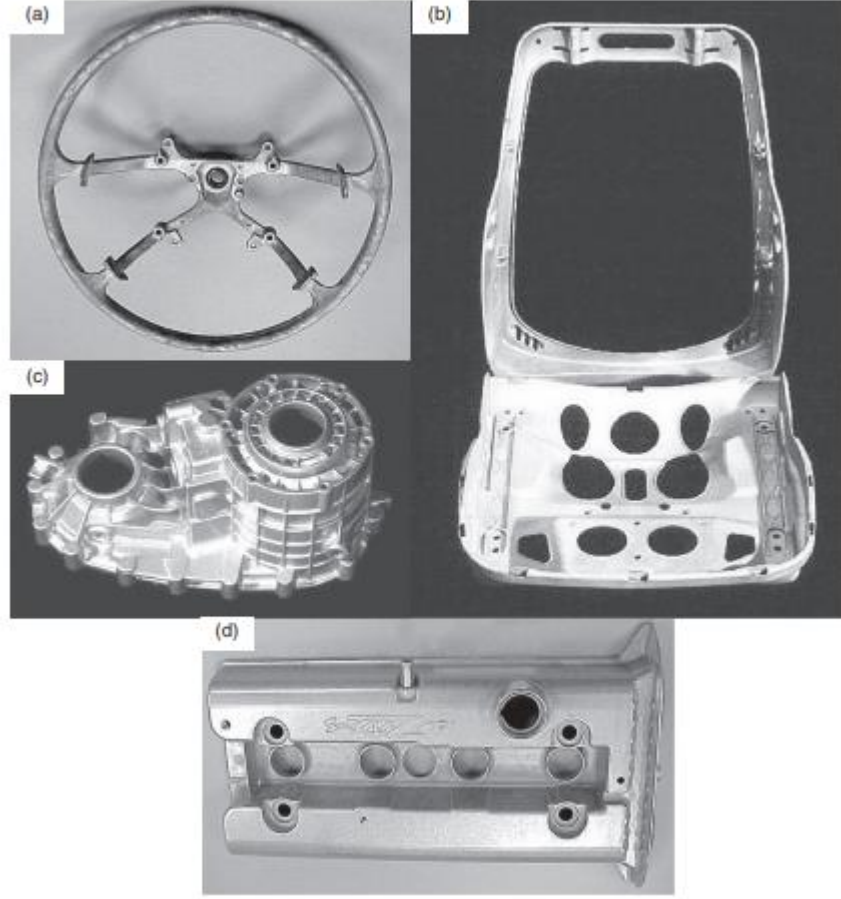
Otomotiv endüstrisinde daha hafif, daha verimli yakıt kullanımı ve yüksek performanslı araç üretmeye yönelik hızla büyüyen pazar ve emisyon azaltılması gibi yasal konular, özellikle bu alanda magnezyum ve alaşımlarının daha fazla kullanılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle magnezyum alaşımında en iyi alaşım kombinasyonları üzerine yapılan çalışmalar sonucu magnezyum alaşımlarının korozyon direnci ve mukavemeti oldukça geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Şekil 3.10 'da görüldüğü gibi Audi, Volkswagen, Daimler Chrysler (Mercedes-Benz), Toyota, Ford, BMW, Jaguar, Fiat, Hyundai ve Kia Motors şirketi gibi önde gelen otomobil üreticileri, otomotiv parçalarında magnezyum bazlı malzemeler kullanmışlardır (Gupta ve Ling, 2011; Powell ve ark., 2021; Vadiraj ve ark., 2019) .

Magnezyum alaşımından üretilen parçalar (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11) 1920'lerde yarış arabaları için kullanıldı, ancak 1936'da Volkswagen'in Beetle modelinde ilk kez magnezyum uyguladığı zamana kadar ticari araçlarda yaygın olarak kullanılmadı. Öte yandan, 1928'de bir magnezyum alaşımlı motor ile çalışan ilk araç Porsche oldu. Batı dünyasının magnezyum talebi 1991'den 2011'e kadar 30 tondan 300 tona yükseldi. Magnezyum alaşımları yaygın olarak şasi için, iç kısımda (koltuk tabanı, konsol braketleri ve gösterge paneli gibi), dış kısım için (dış ayna armatürü ve tekerlek jantları) ve güç aktarma organları için kullanılmaktadır. Bir aracın ön ucunda magnezyum kullanımı, yalnızca araç için daha düşük bir toplam kütle sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ağırlık merkezinin aracın arkasına doğru kaymasına da olanak tanır ve yol tutuş ve dönüş yeteneklerini geliştirir. Ayrıca, magnezyum parçaların geliştirilmesi ile titreşimi ve genel gürültüyü azaltan frekanslar elde edilebilir. Araçlardaki malzemenin mukavemetini artıran çelik muhafazalar, kullanımına imkan veren tek bir döküm magnezyum parçası ile yer değiştirilebilir. Bu döküm yeteneği aynı zamanda daha az

takım ve ölçü gerektirir ve bu da üretim maliyetini düşürür (Khademian ve Peimaei, 2021; A. A. Luo, 2013; MA ve ark., 2021; J. Song ve ark., 2020; Villafuerte ve Zheng, 2007).



**Şekil 3.10.** Geçmiş ve günümüzde üretilen magnezyum esaslı otomobil parçaları (Powell ve ark., 2021).



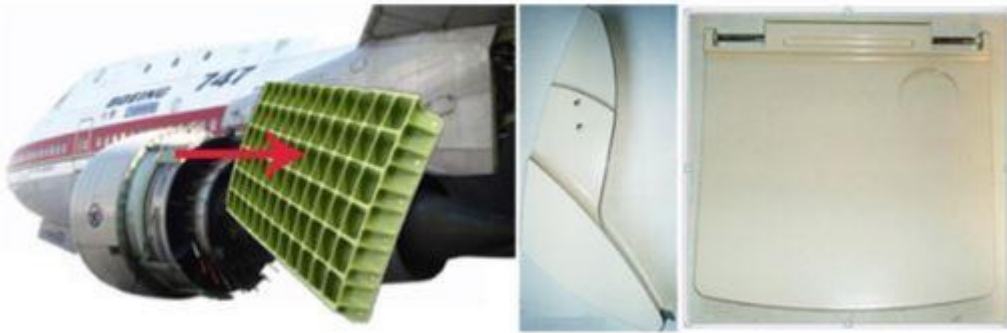
**Şekil 3.11.** Magnezyum otomotiv parçaları: (a) 0,75 kg ağırlığındaki Toyota Camry magnezyum direksiyon simidi, (b) 2,6 kg ağırlığındaki Jaguar ve Fiat modellerinin koltuk şasisi, (c) 2,7 kg ağırlığındaki AZ91D'den yapılmış arka transfer kutusu ve (d) 0,9 kg ağırlığındaki Ford Zetec motorun AZ91 magnezyum alaşımı subap kapağı (Gupta ve Ling, 2011).

Magnezyumun otomobil gövdesinde kullanımı oldukça sınırlıdır, ancak son zamanlarda bu konu üzerinde çalışmalar artmaktadır. GM, 1997'de C5 Corvette'in üretiminden bu yana magnezyum alaşımı kullanılmaktadır. Magnezyum ayrıca Cadillac XLR roadster'in katlanabilir ve açılabilir tavanında da kullanılmaktadır. Ford F-150 ise, radyatör desteği için kullanılan magnezyum döküm parçalar kullanmaktadır. Avrupa'da Volkswagen ve Mercedes firmaları, gövde paneli uygulamalarında ince duvarlı magnezyum dökümlerin kullanımına öncülük etmiştir. Mercedes S Class Coupe için tek parça pres döküm kapı iç kısmı sadece 4,56 kg'dır. 2010 Lincoln MKT magnezyum kapısı iç paneli, şimdiye kadar 55 mil hızla arkadan çarpma gereksinimlerini karşılayan ilk döküm magnezyum kapaktır. 8 kg'lık döküm iç

parça, boyut olarak belki de dünyanın en büyük magnezyum dökümüdür (1379 -1316 mm) (A. A. Luo, 2013).

### 3.3.2. Havacılık endüstrisi

Uçak endüstrisindeki magnezyum alaşımlarının uygulamaları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te görülmektedir. Tarihsel olarak, magnezyum havacılık yapı malzemesi olarak kullanılan ana metallere biriydi ve Alman askeri uçakları için I. Dünya Savaşı ve İkinci Dünya Savaşı sırasında yaygın olarak kullanılmıştır. Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri'nin uzun menzilli bombardıman uçakları B-36 ve B-52 de büyük miktarda magnezyum levha, döküm, dövme ve ekstrüzyon magnezyum parçalar içermektedir. B-36'nın yaklaşık 5500 kg magnezyum levha, 700 kg magnezyum dövme parçalar kullandığı bildirilmiştir. 1962-1984'te inşa edilen 1832 adet Boeing 727 uçağının, ön ve arka kanat kenarları, kontrol yüzeyleri, aktüatörler, kapı çerçeveleri, tekerlekler, motor dişli kutuları, güç üretim bileşenleri, yapısal bazı öğeler (birincil değil) ve diğerleri dahil olmak üzere toplam 1200 adet magnezyum parça içermektedir. Magnezyum ve alaşımları, eski Sovyet uçak endüstrisinde de yoğun olarak kullanılmaktaydı: örneğin, TU-95MS uçağında 1550 kg magnezyum ve TU-134 uçakların çeşitli yerlerinde 780 kg magnezyum bileşenine sahipti.



**Şekil 3.12.** Boeing uçaklarındaki magnezyum alaşımları için uygulama örnekleri: kanat ve koltuk bileşenleri (Dziubińska ve ark., 2016).

Ne yazık ki, bu uygulamaların birçoğu, yangın durumunda magnezyum parçaların oluşturduğu tehlikeler ve 1950'de ve 1960'larda bildirilen korozyon sorunları nedeniyle magnezyum alaşımlarını yapısal olmayan parçalarda kullanımını sınırlayan Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) mevzuatı nedeniyle modern havacılıkta azaltılmıştır. Günümüzde, demir, bakır ve nikel gibi safsızlıklarının (ppm civarında)

magnezyumun korozyonunu teşvik etme üzerindeki etkisinin keşfedilmesiyle modern yüksek saflıktaki magnezyum alaşımlarının korozyon direncindeki kayda değer iyileşmeye rağmen, ticari havacılıkta magnezyum uygulaması endüstri genellikle motor ve şanzımanla ilgili dökümler ve iniş takımları ile sınırlıdır (Dziubińska ve ark., 2016; Khademian ve Peimaei, 2021).



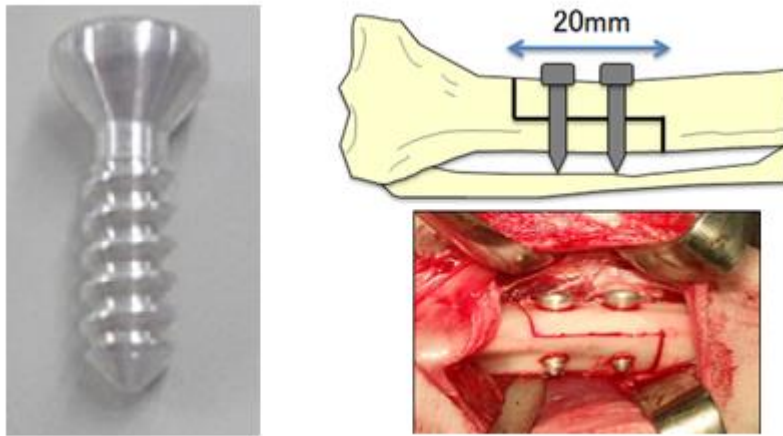
**Şekil 3.13.** Uçak endüstrisindeki magnezyum alaşımları için uygulamalar (Dziubińska ve ark., 2016).

### 3.3.3. Medikal

Magnezyum alaşımlarının ortopedik biyomalzemeler olarak ilk tanıtımı geçen yüzyılın ilk yarısında olmuştur (Walker ve ark., 2014; R. Zeng ve ark., 2008). Bununla birlikte, düşük korozyon direnci nedeniyle, canlı dokuda korozyon işlemi sırasında implant çevresinde büyük miktarda hidrojen birikir ve bu da magnezyum bazlı malzemelerin biyomalzeme olarak yaygın kullanımını sınırlar. Buna rağmen magnezyum, tıp alanında hala magnezyum bazlı malzemeleri yük taşıma uygulamaları

için implant olarak hizmet etmeye potansiyel aday yapan birçok çekici özelliğe sahiptir (Witte ve ark., 2005; Wong ve ark., 2010).

Magnezyum diğer implant malzemelerine göre çok daha hafif bir yoğunluğa sahiptir. Ayrıca hidroksiapatite ( $0,7 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) kıyasla magnezyum ( $15-40 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Ayrıca, magnezyumun elastik modülü ( $41-45 \text{ GPa}$ ) ve basma akma mukavemeti ( $65-100 \text{ MPa}$ ) değerleri, yaygın olarak kullanılan diğer metalik implantlar ve doğal kemik ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Ayrıca magnezyum insan vücudunda doğal bir iyon olarak bulunur, bu sayede  $70 \text{ kg}$ 'lık bir yetişkin insan vücudunda yaklaşık  $1 \text{ mol}$  magnezyum depolanır ve toplam fiziksel magnezyumun tahmini olarak yarısı kemik dokusunda bulunur (Lim ve ark., 2001). Aynı zamanda birçok insan metabolik reaksiyonuna yardımcı olur ve insan vücudu için toksik bir malzeme değildir. Magnezyum iyi bir biyouyumluluğa sahiptir ve insan vücudu sıvısında korozyon yoluyla biyolojik olarak parçalanabilir, böylece implantı çıkarmak için başka bir operasyona gerek kalmaz. Tüm bu arzu edilen özellikler, magnezyum bazlı malzemeleri umut verici bir implant materyali yapar (Thakur, Kwee, ve ark., 2007; Thakur, Srivatsan, ve ark., 2007). Son yıllarda, ortopedi uygulamalarında (Şekil 3.14) magnezyum bazlı malzemelerin kullanımını sınırlandıran korozyon sorunlarının üstesinden gelmek için, magnezyum bazlı koruyucu kaplamalar gibi magnezyum ve yüzey işlemlerinde farklı alaşım elementlerinin kullanımını keşfetmeye yönelik birçok araştırma yapılmaktadır (Gray ve Luan, 2002; G. Song, 2005).



**Şekil 3.14.** WE43 Seri Mg alaşımının medikal uygulama örneği (Marukawa ve ark., 2016).



### 3.3.4. Spor endüstrisi

Spor endüstrisinde, spor malzemelerinin sporcuların giderek artan beklentilerine uygun olması önemlidir. Magnezyum alaşımlarının ve magnezyum kompozitlerinin karmaşık şekiller oluşturmadaki mükemmel uyum ve yeteneği, sporla ilgili ekipmanlarda birçok uygulamada tercih sebebi olmuştur. Örnek olarak Şekil 3.15'te görüldüğü gibi, okçuluk yayları, tenis raketleri ve golf sopalarının kulplarında magnezyum esaslı malzemeler kullanılmaktadır (N. Kumar ve Agarwal, 2015; Todeschini, 2021). Magnezyum bazlı malzemelerin hafif ve mükemmel sönümleme özellikleri, onları bisiklet ve patenlerin şasilerinde de popüler bir malzeme haline getirmiştir. Magnezyum alaşımlarından veya kompozitlerinden yapılan bisiklet şasileri, şok ve titreşimi sönümleyebilir (Gupta ve Ling, 2011), bu sayede sürücünün daha az enerji harcamasına ve daha rahat bir sürüş keyfi yaşamasına olanak tanır.



**Şekil 3.15.** Magnezyum spor malzemeleri: (a) golf sopası başlığı yüksek kaliteli magnezyumdan yapılmıştır (b) magnezyum şasili tekerlekli paten (c) magnezyum başlıklı tenis raketi ve (d) magnezyum çerçeveli bisiklet (Gupta ve Ling, 2011).

### 3.3.5. Elektronik

Elektronik ekipman endüstrisine olan yoğun ilgi nedeniyle, elektronik ürünleri daha kişisel ve taşınabilir hale getirilmektedir. Bu nedenle, ekipmanı oluşturan bileşenlerin hafif ve dayanıklı olması önemlidir. Magnezyum bazlı malzemeler, plastikler kadar hafif oldukları için gerekli gereksinimleri karşılarlar, buna ek olarak plastik muadillerine kıyasla mukavemet, ısı transferi ve elektromanyetik paraziti ve radyo frekansı girişimini koruma yeteneğinde daha başarılıdırlar (King, 2006). Bu nedenle, cep telefonları, bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar ve taşınabilir medya oynatıcıların muhafazalarında magnezyum bazlı malzemeler kullanılmaktadır (Monteiro, 2014). Magnezyum alaşımlarının karmaşık şekillerde üretilebilmesi ve magnezyum alaşımlarının iyi ısı dağılımı ve ısı transferi özellikleri, aynı zamanda magnezyum alaşımlarının ısı alıcılarında ve sabit disk okuyucunun kollarında kullanılmasını sağlar. Magnezyum kullanımına ilişkin diğer örnekler, kamera muhafazalarını ve dijital görüntü projeksiyon sistemlerini içermektedir (Mesbah, 2020; Narayana, 2020).

Kullanım alanlarına ek olarak, magnezyum, hafif olma özelliğinden dolayı aynı zamanda gözlük çerçevesi yapmak için kullanılmaktadır. Magnezyumun hafif ve optik stabilite özelliklerinden yararlanan diğer optik ekipmanlar arasında tüfek dürbünleri ve el dürbünleri de bulunmaktadır. Daha yüksek çalışma verimliliği elde etmek için, daha fazla taşınabilirlik sağlamak için elde tutulan çalışma aletlerinin hafif olması arzu edilmektedir. Bu nedenle, düşük yoğunluğu, darbeye karşı direnci ve gürültü ve titreşimi azaltma yeteneği ile birleştiğinde, magnezyumu çok çeşitli el tipi çalışma aletleri için tercih edilen malzeme haline getirir. Bazı örnekler aşağıda sıralanmıştır (King, 2006).

- (i) Magnezyum zincirli testere muhafazası
- (ii) Pnömatik çivi tabancasının magnezyum mahfazası ve silindiri
- (iii) El aletlerinin dişli ve motor muhafazaları
- (iv) El makaslarının kolları
- (v) El matkaplarının muhafazası

Bu çalışmaya konu olan Mg-Li alaşımları ise, askeri endüstrilerde, özellikle de yaygın olarak insansız hava araçları olarak bilinen İHA'lar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum-lityum alaşımları, ultra düşük yoğunluğu, mükemmel



şekillendirilebilirliği, iyi sönümlene yeteneği ve geri dönüştürülebilirlik gibi ilgi çekici özellikleri nedeniyle havacılık, elektronik ve askeri alanlarda yapısal uygulamalar için alternatif metaller olarak giderek daha çekici hale gelmektedir (Khademian ve Peimaei, 2021).

Magnezyum ve alaşımlarının düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özellikleri, otomotiv, havacılık, spor ve elektronik endüstrilerinde birçok uygulama ile sonuçlanan olumlu özellikleridir. Magnezyum bazlı malzemelerin gelecekteki uygulamaları sınırsızdır ve çalışan mühendislerin vizyonuna ve hayal gücüne bağlıdır.



#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Mg, Li ve Al metalleri kullanılarak Mg-8Li-2Al alaşımı ve saf Sn, Ca metalleri, Mg-%20La, Mg-%20Nd master alaşımları kullanılarak Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5La, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları metal kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir. Döküm sonrası üretilen alaşımların kimyasal analizleri yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları incelenen alaşımlar içinden hedeflenen bileşime sahip olan alaşımların sırası ile X-ışını analizi, mikroyapı analizi, mekanik deneyleri ve son olarak alaşımların korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Kullanılan Malzemeler ve Hazırlama

Çalışmada, Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5La, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarını üretmek için saf Magnezyum külçe (ağırlıkça %99,9), saf Alüminyum (ağırlıkça %99,9), saf Kalay (ağırlıkça %99,9), saf Kalsiyum (ağırlıkça %99,9) Aveks firmasından, saf Lityum (ağırlıkça %99,9) Alfa Aesar firmasından, Mg – Neodimyum (ağırlıkça %20), Mg-Lantanyum (ağırlıkça %20) metalleri ise Çin'den ithalat ile tedarik edilerek kullanılmıştır. Üretimi yapılan alaşımlar Tablo 4.1'de verilmektedir.

**Tablo 4.1.** Üretimi yapılan alaşımlar.

Alaşım No	Alaşımlar
1	Mg-8Li-2Al
2	Mg-8Li-2Al-1,5Sn
3	Mg-8Li-2Al-1,5La
4	Mg-8Li-2Al-1,5Nd
5	Mg-8Li-2Al-1,5Ca

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi saf Lityum elementi atmosfer koruyucu kutusundan çıkartılarak, Hekzan ( $C_6H_{14}$ ) içine daldırılıp, döküm için gerekli boyutlara küçültülmüştür. Saf Mg külçesi, saf Al, saf Sn, saf Ca, Mg-%20La ve Mg-%20Nd metalleri de benzer şekilde döküm için gerekli kütle ve boyutlara küçültülmüştür.

Hazırlanan malzemeler Şekil 4.2’de görüldüğü gibi döküm öncesi paslanmaz çelik potalara yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Saf Lityum elementinin döküm öncesi görünümü.



Şekil 4.2. Ergitme işlemi öncesi paslanmaz potalara yerleştirilmiş malzemeler.

## 4.2. Ergitme Yöntemi

Paslanmaz potalara yerleştirilmiş malzemelerin kalıba döküm yapılabilmesi için kullanılan ekipmanlar, ergitme ve alaşımlama işlemi aşağıda görseller ile birlikte açıklanmıştır.

### 4.2.1. Kullanılan araç-gereçler

Ergitme işleminde kullanılan başlıca ekipmanlar; Noberthem marka elektrik rezistanslı fırın, koruyucu gaz atmosferi için SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub> gaz karışımları, paslanmaz çelik potalar, koruyucu gaz atmosfer destekli döküm kutusu ve 120 X φ110mm ebatlarında çelik kalıptan oluşmaktadır.

## 4.3. Ergitme ve Alaşımlama

Ergitme işlemi, Şekil 4.3'te görülen Noberthem marka elektrik rezistanslı, üstten kapaklı fırında gerçekleştirilmiştir. Fırının üstten kapaklı olması, alaşımlama sırasında işlemin hızlı ve kolay gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Paslanmaz çelik pota içindeki malzemeler öncelikle fırın içinde 770°C'ye kadar ısıtılmıştır, sonrasında ergime işleminin gerçekleşmesi için bekletilmiştir.



Şekil 4.3. Üstten kapaklı elektrik rezistanslı ergitme fırını.

Ergitilecek malzemeler, ergime dereceleri (Tablo 4.2) ve alaşımlama sırası göz önüne alınarak, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, üç aşamada paslanmaz çelik potalara yerleştirilmiştir. Birinci aşamada Mg ve Al metalleri yerleştirilmiştir. İşlem süresince fırın içinde bulunan malzemelerin oksitlenmemesi için fırın içinde SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub> koruyucu gaz atmosferi oluşturulmuştur. Gerekli ergime sağlanıp, metaller sıvı hale geldikten sonra ikinci aşamada 3. alaşımda Mg-%20La, 4. alaşımda Mg-%20Nd, 5. alaşımda Ca elementi ilave edilmiştir ve ilave edilen alaşım elementleri çözüne kadar 20'şer dakika bekletilmiştir. Üçüncü aşamada ise 1. alaşıma Li, 2. alaşıma Li ve Sn, 3., 4. ve 5. alaşımlara Li elementleri eklenerek 5 dakika bekletilerek alaşımlama işlemi tamamlanmıştır. Her alaşımlama işlemi ve döküm öncesinde cüruf alma işlemi yapılmış ve cüruflar yakılarak bertaraf edilmiştir.

**Tablo 4.2.** Döküm işleminde kullanılan metallerin ergime dereceleri.

	Mg	Al	Mg- %20Nd	Mg- %20La	Ca	Sn	Li
Ergime Derecesi	650°C	660°C	600°C	620°C	842°C	232°C	180°C



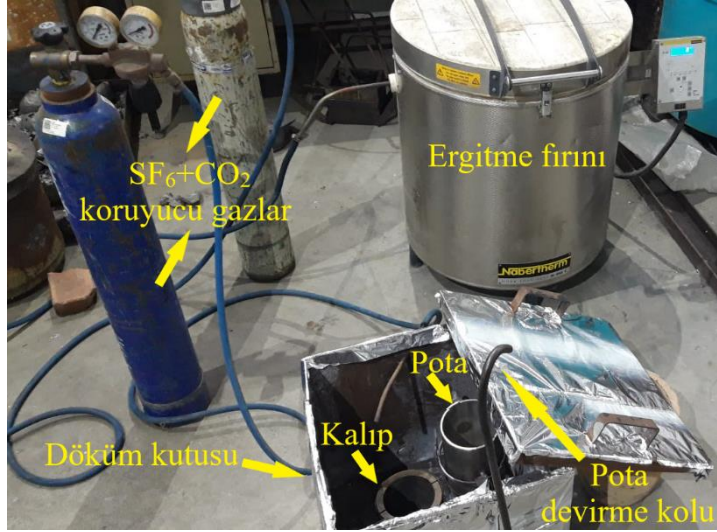
Şekil 4.4. Döküm işlemi öncesi sıvı metale alaşım elementlerinin ilavesi.

#### 4.4. Döküm İşlemi

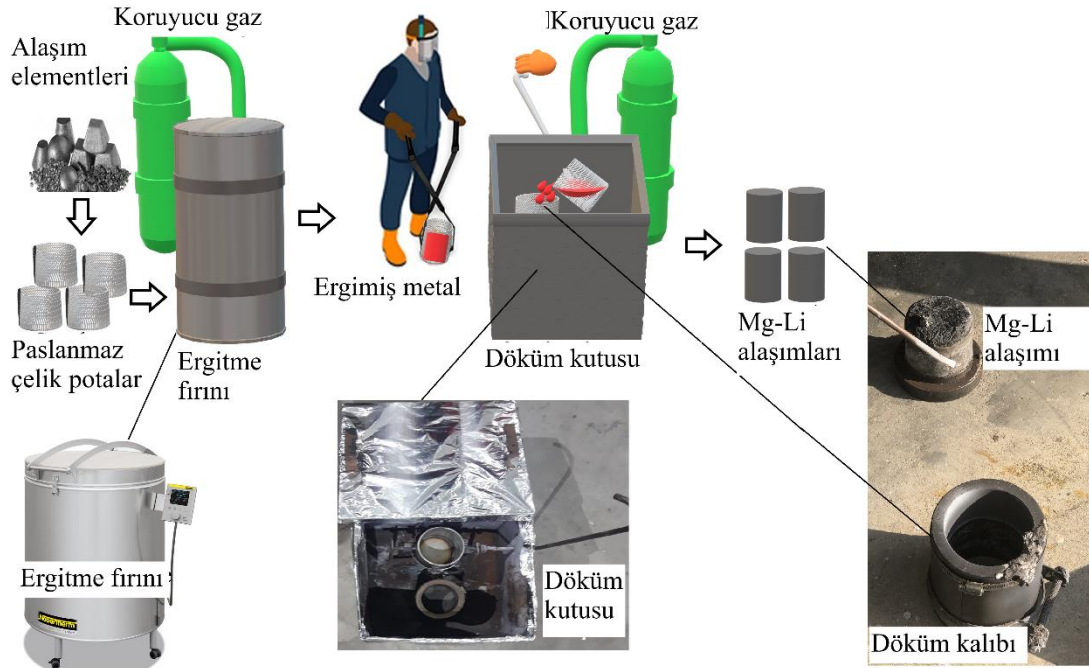
Alaşımlama işlemi tamamlandıktan sonra, 200°C sıcaklığa ön ısıtması yapılmış olan 120 X  $\phi$ 110mm ebatlarındaki çelik kalıba döküm işlemi için paslanmaz çelik potalar ertitme fırınından çıkarılmıştır. Paslanmaz çelik potalarda bulunan Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5La, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca



alaşımalarının döküm işlemi ve kullanılan ekipmanlar Şekil 4.5 ve 4.6'da şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.5. Döküm işleminde kullanılan donanım ve cihazlar.



Şekil 4.6. Alaşımaların ergitme ve döküm prosesinin şematik olarak gösterimi.

Şekil 4.6 incelendiğinde, fırından maşa yardımı ile alınan sıvı metal dolu pota, döküm kutusundaki devirme mekanizmasına yerleştirilmiştir. Kapağı kapatılan döküm kutusu, ergitme fırınında olduğu gibi  $SF_6+CO_2$  koruyucu gaz atmosferi altında tutulmuştur. Döküm kutusundaki devirme mekanizması kullanılarak, sıvı metalin kalıba dökümü gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım için aynı işlemler tekrarlanarak



döküm prosesi tamamlanmış ve kalıp soğuduktan sonra Şekil 4.7’de görülen Mg-Li-Al alaşımları elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Döküm işlemi sonrası kalıptan çıkarılan Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5La, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları.

#### 4.5. Kimyasal Analiz

Kalıptan çıkarılan alaşımların kimyasal analizlerinin yapılması için Şekil 4.8’de görülen numuneler Struers marka numune kesme cihazı ile kesilmiştir.



Şekil 4.8. Struers marka numune kesme cihazı ve kimyasal analiz için hazırlanan numuneler.

Alaşımların kimyasal bileşimini belirlemek için ICP-OES (Endüktif eşleşmiş plazma – optik emisyon spektrometrisi) kullanıldı. Üretilen alaşımların kimyasal analiz verileri Bölüm 5.1'de verilmiştir.

#### 4.6. X-Işınları Analizi

Hazırlanan numuneler üzerinde X-ışını Difraktometresi (XRD) incelemesi yapılması için Cu-K radyasyonlu Şekil 4.9'da görölen Rigaku D-Max 1000 X-ışını cihazı kullanıldı. Analizler  $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$  aralıklarında ve  $1-3^{\circ}/dk$  derece tarama hızlarında yapılmıştır.

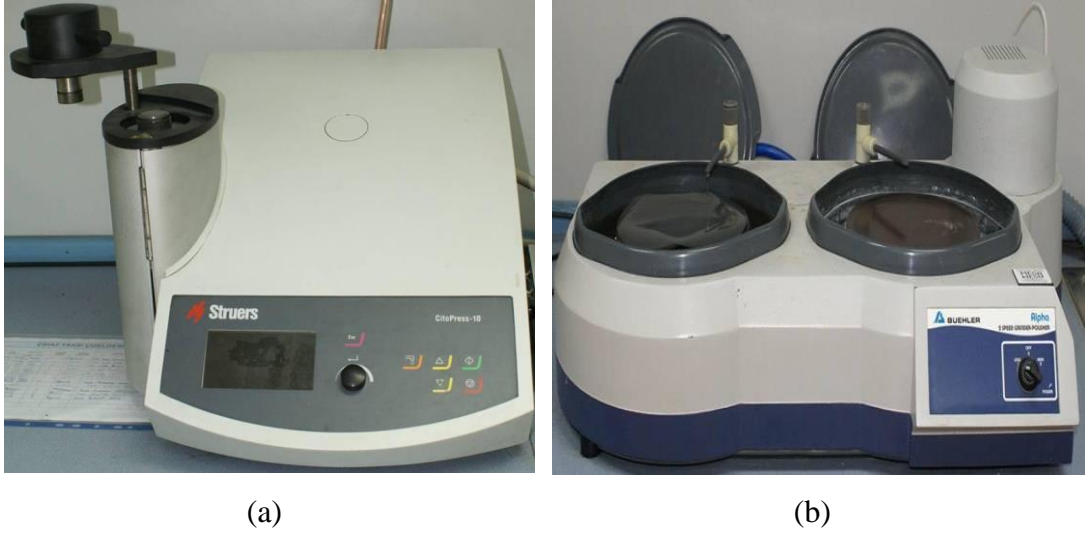


Şekil 4.9. Rigaku D-Max 1000 X-ışını cihazı.

#### 4.7. Mikroyapı Analizi

Üretilen 5 farklı alaşımın mikro yapı analizleri için hazırlanan numunelere metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Numuneler Şekil 4.10'da görölen sıcak iletken bakalite alma cihazı kullanılarak bakalit kalıba alınmıştır. Sonrasında numuneler Şekil 4.10'da görölen el ile zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak 240, 400, 600, 800 ve 1200 mesh zımparalardan geçirilmiştir.

Zımparalama işleminden sonra 3 $\mu$ m boyutunda alümina pasta kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır.



**Şekil 4.10.** (a) Struers marka Sıcak bakalite alma cihazı ve (b) Buehler marka zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatma işleminden sonra dağlayıcı kimyasalı olarak hacimce %3 HNO<sub>3</sub> ve %97 etanol karışımı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler (Şekil 4.11) optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 4.12) kullanılarak incelenmiştir.



**Şekil 4.11.** Metalografik inceleme için hazırlanmış numune örnekleri.



(a)



(b)

**Şekil 4.12.** (a) Carl Zeiss marka optik mikroskobu ve (b) Jeol JSM6060LV marka SEM cihazı.

$\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve intermetalik fazların görüntü işleme yöntemi ile mikroyapıdaki alan taramalarının analizi Şekil 4.13 'te görülen Tescan VEGA-II Elektron Mikroskobu kullanılarak yapılmıştır.



**Şekil 4.13.** Tescan VEGA-II Elektron Mikroskobu.



#### 4.8. Mekanik Özelliklerin Analizi

Üretilen alaşımların öncelikle sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonrasında çekme ve basma deneyleri oda sıcaklığında gerçekleştirip, kırılma yüzeyleri incelenerek mekanik özellikler belirlenmiştir.

##### 4.8.1. Sertlik değerlerinin ölçümü

Sertlik deneyi için kullanılan numunelerin yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla, metalografik inceleme için hazırlanan numunelerde olduğu gibi yüzeyi parlatılmış numuneler kullanılmıştır. Alaşımların sertlikleri Brinell sertliği (HB) ölçümleriyle ve  $\beta$ -Li ve  $\alpha$ -Mg fazlarının sertliklerinin belirlenmesi için Vickers mikrosertlik (HV) ölçümleri yapılmıştır. HB ve HV ölçümleri için uygulama süreleri ve yükleri sırasıyla 15 saniye / 62.5kg ve 15 saniye / 10gr seçilmiştir. Herhangi bir alaşım elementi segregasyonunun etkisinden kaçınmak, çeşitli konumlardaki ortalama sertlik değerini belirlemek için en az 10 adet ölçüm alınmıştır. Şekil 4.14'de görülen Shimadzu marka Mikro sertlik ölçüm cihazı ve Bulut marka Brinell sertlik cihazı kullanılmıştır.



(a)



(b)

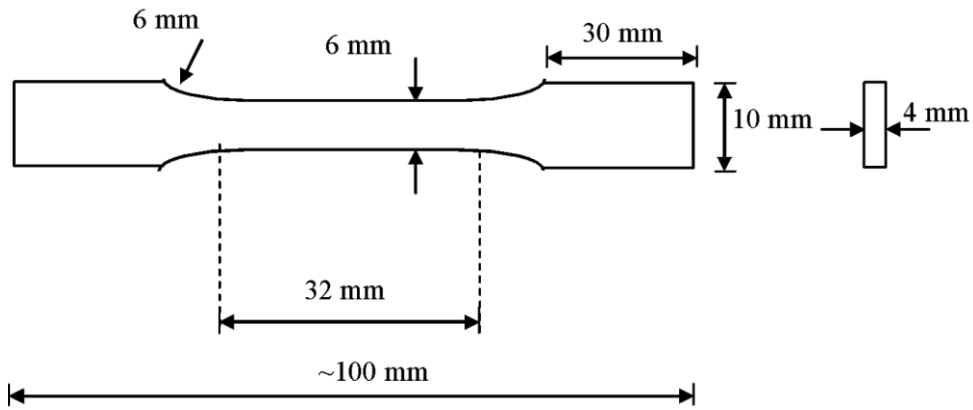
**Şekil 4.14.** (a) Shimadzu marka Mikro sertlik ölçüm cihazı ve (b) Bulut marka Brinell sertlik ölçüm cihazı.

#### 4.8.2. Çekme deneyi değerlerinin ölçümü

Çekme deneyi için numune hazırlama işlemine Şekil 4.15'te görülen GF marka tel erozyon cihazı kullanılarak, kalıptan çıkarılan alaşımların işlenmesi ile başlatılmıştır. 32 x 6 x 4 mm boyutlarında, Şekil 4.16'da verilen ASTM E8 standardına göre işlenen çekme deneyi numuneleri, her alaşım için 10 adet işlenmiştir.



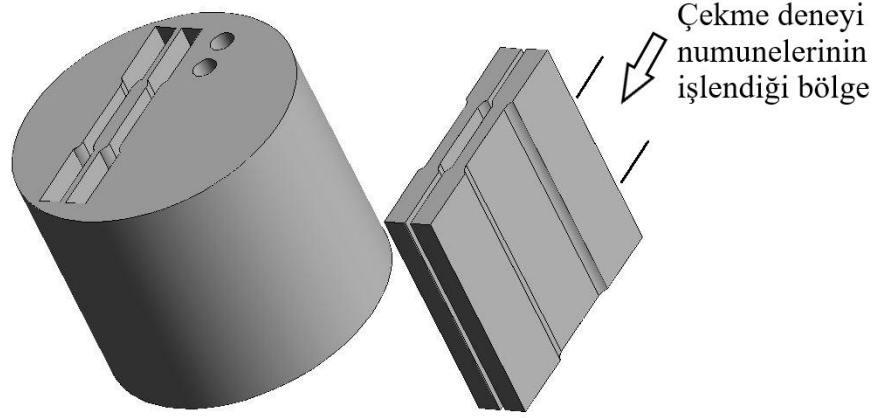
Şekil 4.15. GF marka tel erozyon işleme cihazı



Şekil 4.16. ASTM E8'e göre hazırlanan çekme deneyi numunesinin geometrik şekli ve boyutları.

Tel erozyon cihazında işlenen çekme deneyi numunelerinin işlendiği bölgelerin teknik resim çizimi Şekil 4.17'de görülmektedir. İşlenen numunelerin yüzeylerinde oluşabilecek çentik etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, numune yüzeyleri 1000 mesh

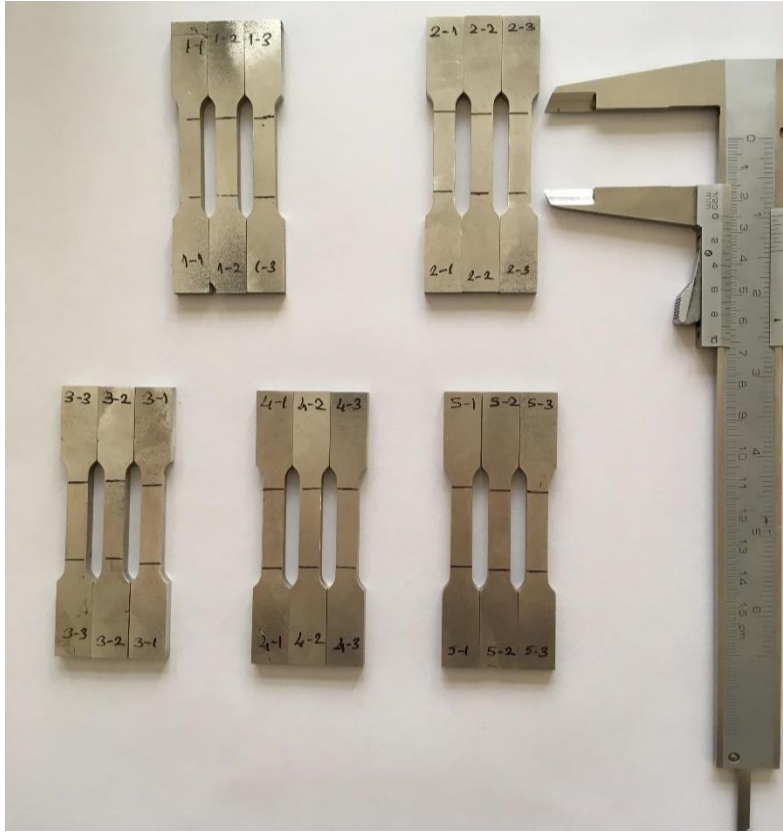
zımparalardan geçirilmiştir. Çekme deneyi numunelerinin zımparalama öncesi ve sonrası görüntüleri sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da görülmektedir



Şekil 4.17. Çekme deneyi numunelerinin işlendiği bölge.



Şekil 4.18. Tel erozyon cihazında işlenmiş, zımparalama işlemi öncesi çekme deneyi numunelerinin görüntüsü.



Şekil 4.19. Çekme deneyi için hazır olan çekme numuneleri.

Çekme deneyleri oda sıcaklığında Şekil 4.20’de görülen Instron 3367 çekme cihazında  $10^{-3}$  sn (1,8 mm/dk) çekme hızında gerçekleştirilmiştir.



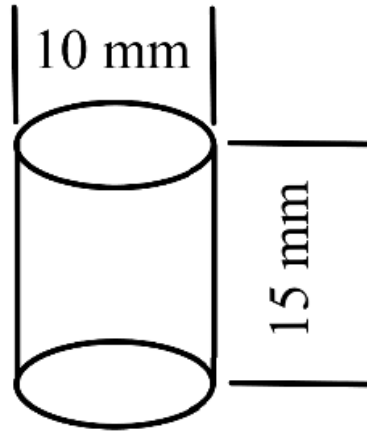
Şekil 4.20. Çekme deneylerinin yapıldığı Instron 3367 marka çekme cihazı.



Numunelerin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyleri SEM cihazında analiz edilerek, kırılma mekanizmaları incelenmiştir.

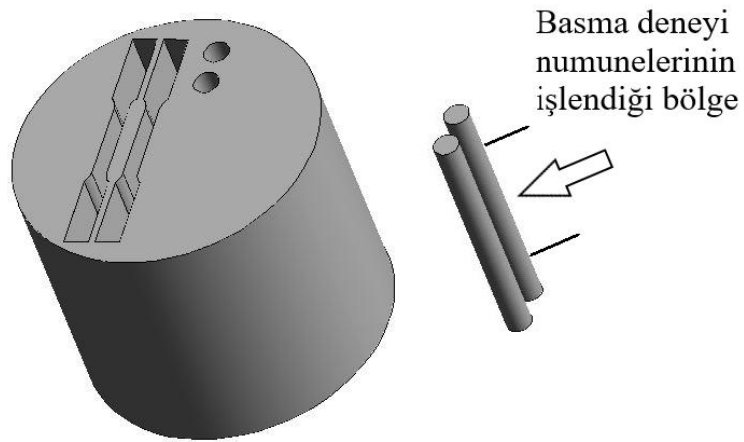
#### 4.8.3. Basma değerlerinin ölçümü

Basma deneyi için numune hazırlama işlemine Şekil 4.15'te görülen GF marka tel erozyon cihazı kullanılarak, üretilen alaşımların işlenmesi ile başlatılmıştır. 15 x  $\phi$ 10mm boyutlarında, Şekil 4.21'de verilen ASTM E9 standardına göre işlenen basma deneyi numuneleri, her alaşım için 10 adet işlenmiştir.

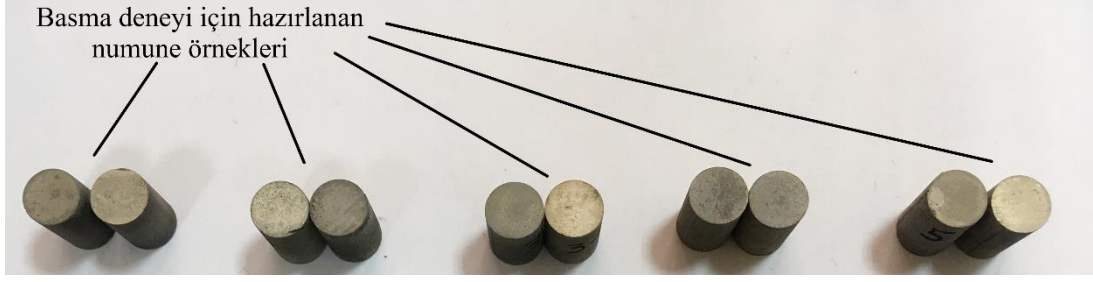


**Şekil 4.21.** ASTM E9'a göre hazırlanan basma deneyi numunesinin geometrik şekli ve boyutları.

Tel erozyon cihazında işlenen basma deneyi numunelerinin işlendiği bölgelerin teknik resim çizimi Şekil 4.22'da görülmektedir. Basma deneyi için ASTM E9'a göre hazırlanan basma deneyi numune örnekleri Şekil 4.23'de görülmektedir.



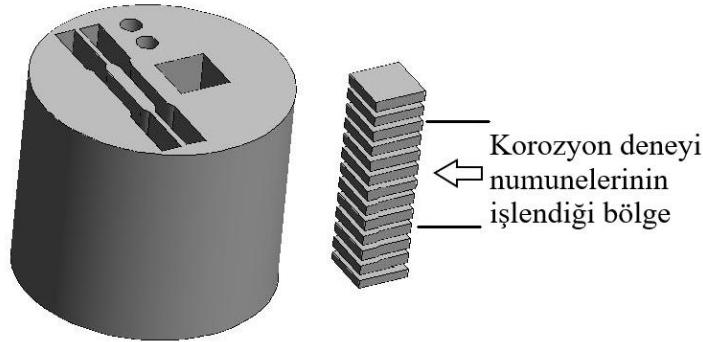
**Şekil 4.22.** Çekme deneyi numunelerinin işlendiği bölge.



Şekil 4.23. ASTM E9'a göre hazırlanan basma deneyi numune örnekleri.

#### 4.9. Korozyon Özelliklerinin Analizi

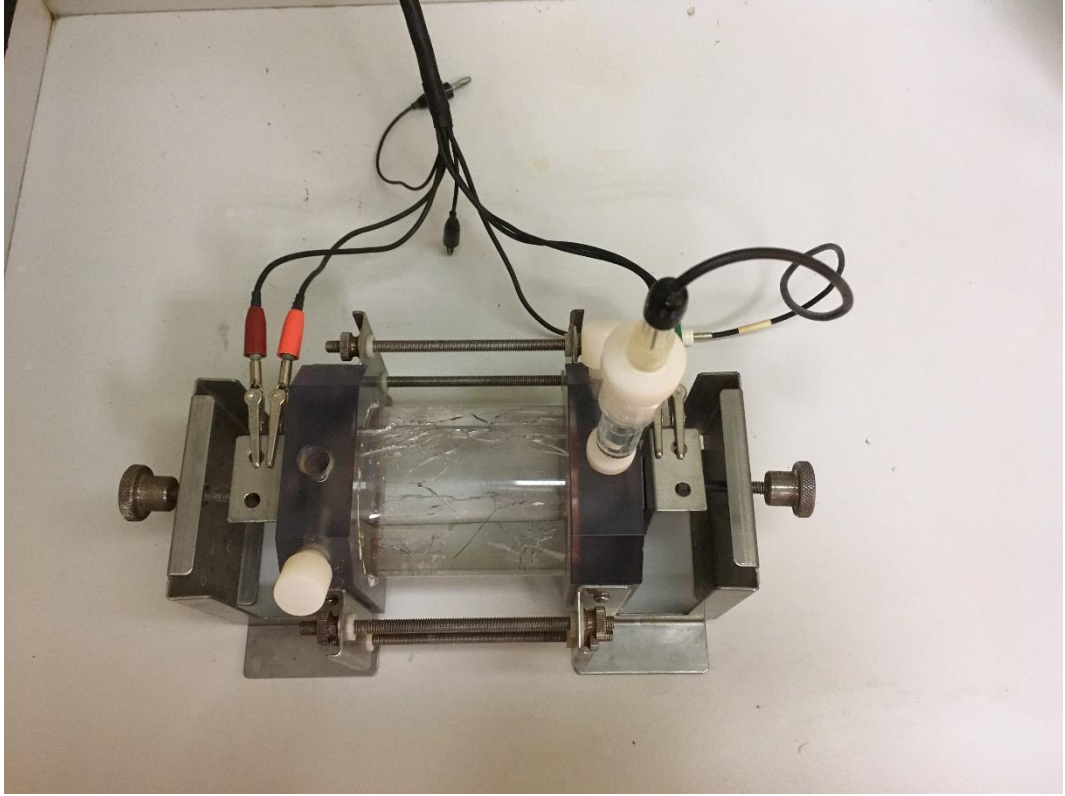
Üretilen alaşımların korozyon özelliklerinin belirlenmesi için Şekil 4.24'de görüldüğü gibi tel erozyon cihazı yardımıyla alaşımlardan korozyon numuneleri işlenerek hazırlanmış ve elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır. Tel erozyon cihazında hazırlanan korozyon numuneleri, yüzeyde korozyon deney sonuçlarına etki edebilecek kusurları bertaraf etmek amacıyla, sırasıyla 240-400-600-800-1000 ve 1200 mesh SiC zımpara ile yüzeyleri zımparalanmıştır. Üretilen 5 alaşımın yoğunlukları korozyon deneyi hesaplamalarında kullanılmak için Arşimet yoğunluk ölçüm metodu ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.24. Üretilen alaşımlardan korozyon deneyi numunelerinin işlendiği bölge.

##### 4.9.1. Elektrokimyasal korozyon deneyi

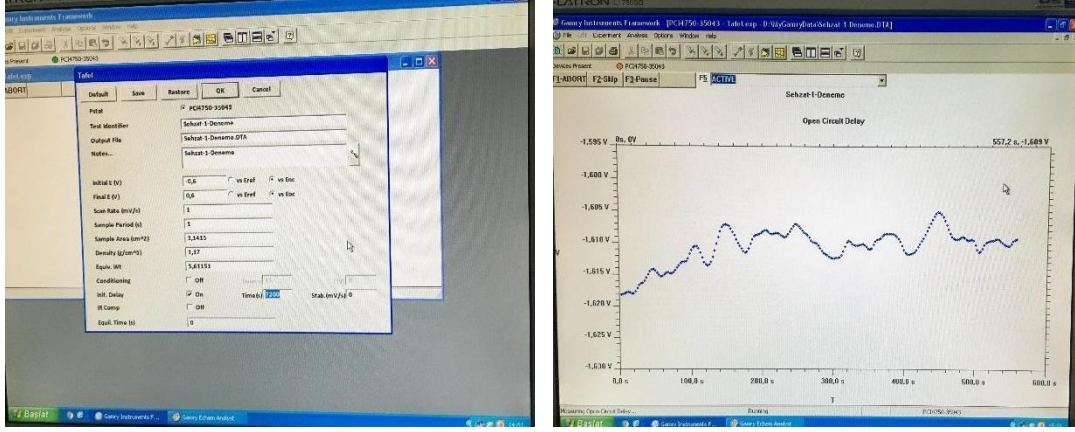
Elektrokimyasal korozyon deneyleri oda sıcaklığında pH değeri 5,76 olan 0,1 M NaCl çözeltisinde ve deney Şekil 4.25'te görülen bilgisayar kontrollü Gamry Reference 600+ cihazında ASTM G59-97 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.25.** Elektrokimyasal korozyon deneylerinde kullanılan Gamry Reference 600+ cihazı.

Elektrokimyasal korozyon deneyi numuneleri olarak 2,5x2,5cm ebatlarında ve 0,5cm et kalınlığına sahip kare plakalar kullanıldı. Plakaların toplam yüzey alanından 3,14cm<sup>2</sup>'lik alanı korozyon deneyine tabi tutulmuştur.

Şekil 4.26'da (Gamry Echem Analyst yazılım paketi ekran görüntüsü) görüldüğü gibi açık devre potansiyel (OCP) değeri, potansiyel sabitliği sağlamak amacıyla 3,14cm<sup>2</sup> aktif alana sahip numunelerin 10 dakika süre ile daldırılmasıyla ölçülmüştür ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri 1 mV/s potansiyel tarama hızında yapılmıştır. Tarama aralığı -1 ila + 2.2 Volt arasında ayarlanmıştır.



**Şekil 4.26.** Elektrokimyasal korozyon deneyinde Gamry Echem Analyst yazılım paketi ekran görüntüsü.

Katodik ve anodik korozyon akımı ( $I_{corr}$ ) ve korozyon potansiyelinin ( $E_{corr}$ ) kesişimiyle Tafel grafikleri elde edilmiştir. Analiz için Gamry Echem Analyst yazılım paketi kullanılmıştır.  $I_{corr}$ ,  $E_{corr}$  ve korozyon hızı ( $CorrRate$ ) değerleri belirlenmiştir.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1. Kimyasal Bileşimlerin Analiz Sonuçları

Döküm sonrası alaşımlara yapılan ICP-OES (Endüktif eşleşmiş plazma – optik emisyon spektrometrisi) analizi sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.1 incelendiğinde sırasıyla 1., 2., 4. ve 5. alaşım olan Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımların bünyesinde bulunan Mg, Li, Al, Sn, Nd ve Ca elementlerinin hedeflenen oranlarda olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.1.** Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçları.

Alaşım	Kimyasal Bileşimler (% ağırlıkça)						
	Li	Al	Sn	La	Nd	Ca	Mg
Mg-8Li-2Al	%8,00	%1,85					Kalan
Mg-8Li-2Al-1,5Sn	%7,95	%1,84	%1,45				Kalan
Mg-8Li-2Al-1,5La	%3,50	%1,75		%1,65			Kalan
Mg-8Li-2Al-1,5Nd	%7,90	%1,80			%1,50		Kalan
Mg-8Li-2Al-1,5Ca	%7,85	%1,82				%1,55	Kalan

3. Alaşım olan Mg-8Li-2Al-1,5La alaşımının ICP-OES analiz sonuçları Tablo 5.1’den incelendiğinde, Li elementi, alaşım içinde yaklaşık olarak ağırlıkça %3,50 olarak ölçülmüştür. Hedeflenen ağırlıkça %8 Li değerine ulaşamamıştır. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi üretilen alaşımlarda ağırlıkça maksimum %5,7 Li içeren alaşımlar Hegzagonal Sıkı Paket (HSP)  $\alpha$ -Mg yapısına sahipken, ağırlıkça %5,7-10,3 arasında Li içeren alaşımlar ise çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapıya sahiptir. Li oranlarındaki farklılığın sebep olduğu kristal yapı farkı aynı zamanda mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon özelliklerine etki edeceği için diğer üretilen alaşımlar ile karşılaştırmanın uygun olmayacağı düşünülmüştür. Bu nedenle 3. alaşım olan Mg-8Li-2Al-1,5La

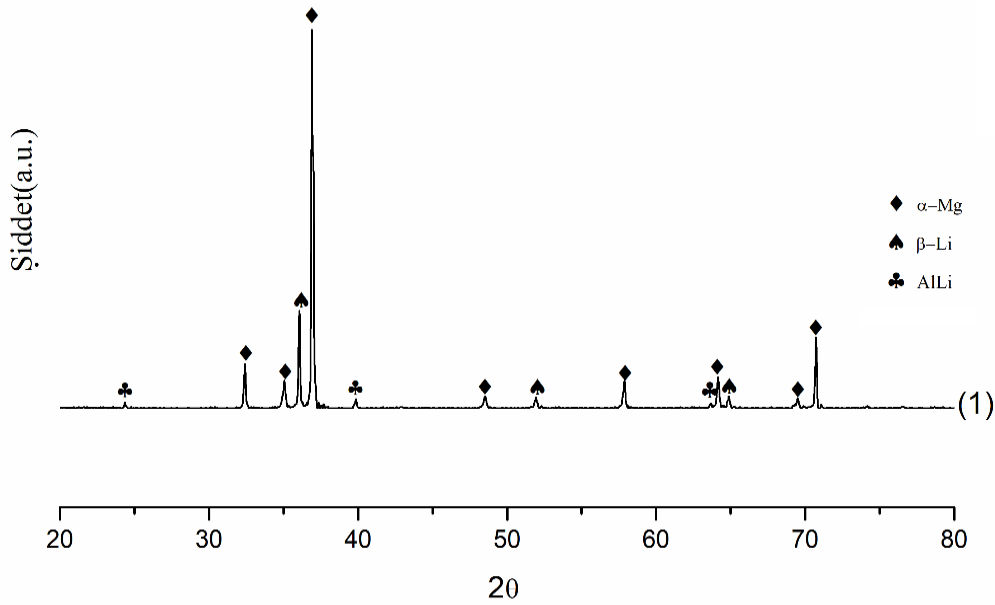
alaşımı çalışmanın deneysel sonuçlar bölümüne dahil edilmemiştir. Deneysel sonuçlar bölümünde üretilen alaşımlar Tablo 5.2’de görüldüğü gibi yeniden isimlendirilmiştir.

**Tablo 5.2.** Üretilen alaşımların kimyasal analiz sonrası yeni isimleri.

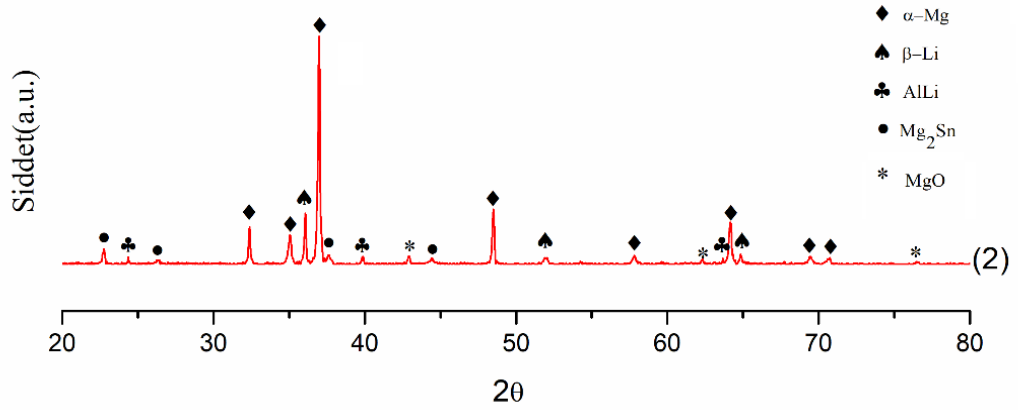
Alaşım No	Alaşımlar
1	Mg-8Li-2Al
2	Mg-8Li-2Al-1,5Sn
3	Mg-8Li-2Al-1,5Nd
4	Mg-8Li-2Al-1,5Ca

## 5.2. XRD Analiz Sonuçları

Üretilen alaşımların XRD analiz sonuçları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verilmiştir. Şekil 5.1.’de 1. Alaşım olarak üretilen Mg-8Li-2Al alaşımının, Şekil 5.2’de 2. Alaşım olarak üretilen Sn alaşım elementi ilavesi yapılmış Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının, Şekil 5.3’de 3. Alaşım olarak üretilen Nd alaşım elementi ilavesi yapılmış Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının ve Şekil 5.4’de ise 4. Alaşım olarak üretilen Ca alaşım elementi ilavesi yapılmış Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının XRD analiz sonuçları görülmektedir.

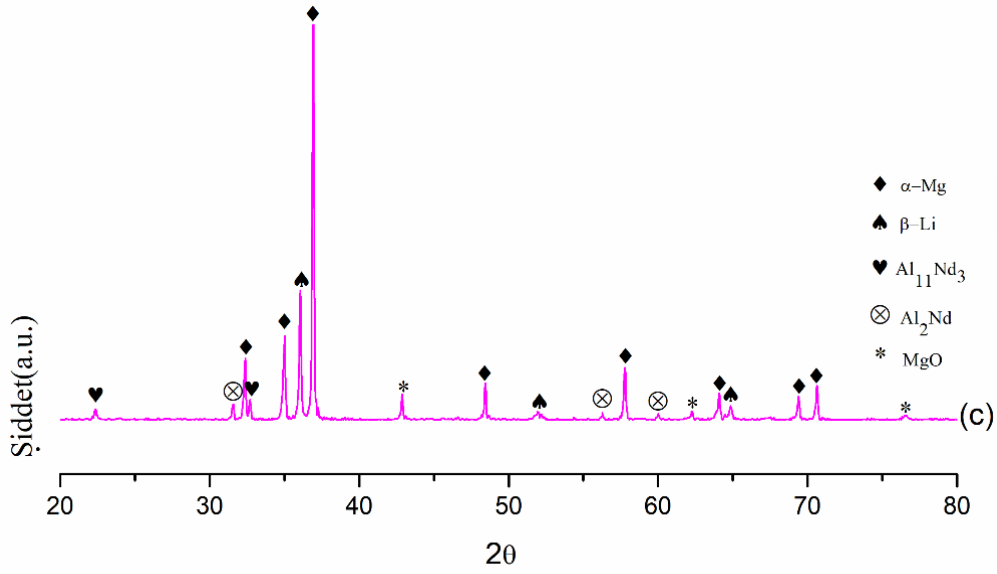


Şekil 5.1’de görüldüğü üzere alaşımın ağırlıkça %5,7-10,3 arasında Li elementi içerdiği için çift fazlı  $\alpha + \beta$  yapıya sahip olduğu ve  $\alpha$ -Mg ( $\text{Li}_{0,92}\text{Mg}_{4,08}$ ) ve  $\beta$ -Li ( $\text{Li}_3\text{Mg}_7$ ) piklerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber AlLi intermetaliklerine de rastlanmıştır.



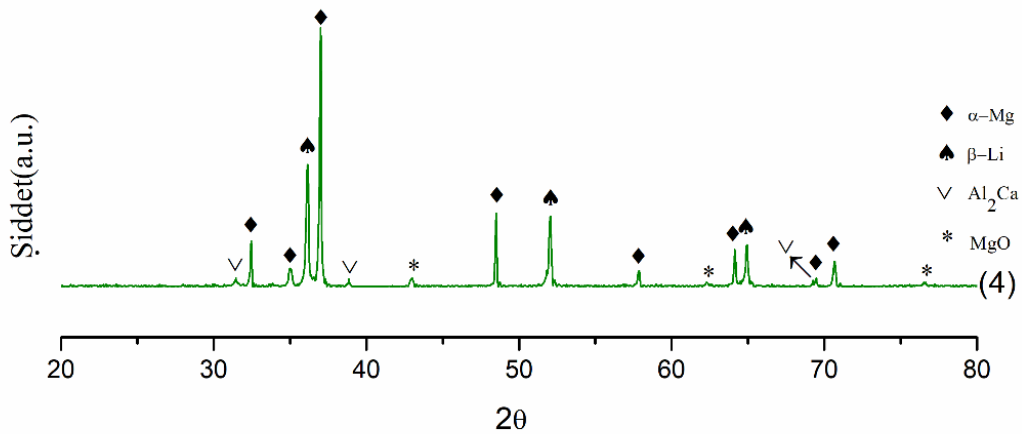
Şekil 5.2. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının XRD analiz sonuçları.

Sn alaşım elementi ilavesi yapılan 2. alaşıma ait XRD analiz sonuçları Şekil 5.2’de görülmektedir. Şekil 5.2 incelendiğinde, birinci alaşımda olduğu gibi ağırlıkça %5,7-10,3 arasında Li elementi içerdiği için çift fazlı  $\alpha + \beta$  yapıya sahip olduğu ve  $\alpha$ -Mg ( $\text{Li}_{0,92}\text{Mg}_{4,08}$ ) ve  $\beta$ -Li ( $\text{Li}_3\text{Mg}_7$ ) piklerine sahip olduğu gözlenmiştir. Yine Al ve Li elementlerini içerdiği için AlLi intermetaliklerine rastlanmıştır. Birinci alaşımdan ek olarak ikinci alaşım Sn alaşım elementi içerdiğinden dolayı  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  intermetalikleri de tespit edilmiştir. Ayrıca döküm ve/veya alaşımlama esnasında ergimiş metalin üzerinde oluşan koruyucu film tabakasının kırılması sonucunda kalıba dökülen metalin içine karışan az miktardaki MgO metal oksitine rastlanmıştır.



**Şekil 5.3.** Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının XRD analiz sonuçları.

Şekil 5.3’de 3. alaşım olan Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının XRD analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde  $\alpha$ -Mg ( $\text{Li}_{0,92}\text{Mg}_{4,08}$ ),  $\beta$ -Li ( $\text{Li}_3\text{Mg}_7$ ) ve MgO piklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. 3. alaşımda Nd ilavesi ile birlikte  $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{Nd}$  intermetalikleri tespit edilmiştir. 1. ve 2. alaşımda var olan AlLi intermetaliklerine Nd ilavesi sonrası 3. alaşımın XRD analiz sonuçlarında rastlanmamıştır.



**Şekil 5.4.** Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının XRD analiz sonuçları.

Ca alaşım elementi ilavesi yapılmış olan 4. alaşımın XRD analiz sonuçları Şekil 5.4’de görülmektedir. 4. alaşımda Ca alaşım elementi ilavesi ile  $\text{Al}_2\text{Ca}$  intermetaliklerine



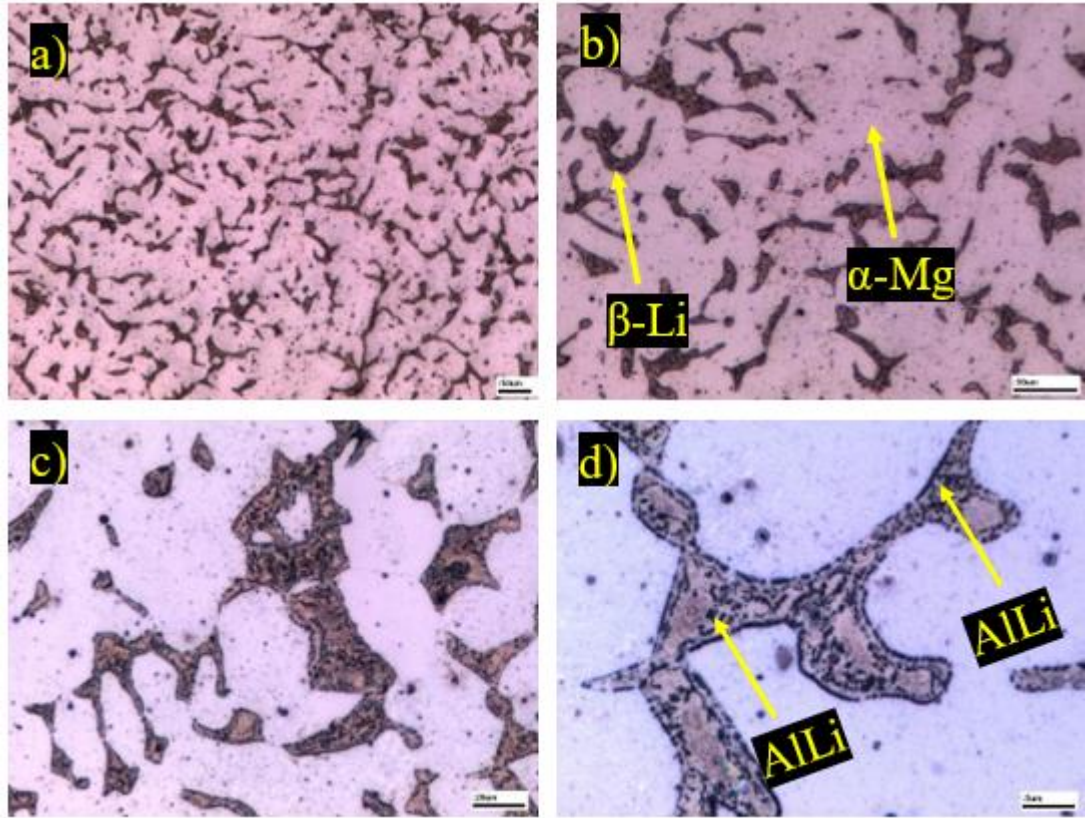
rastlanmış olup, 1, 2 ve 3. alaşımlarda olduğu gibi  $\alpha$ -Mg ( $\text{Li}_{0,92}\text{Mg}_{4,08}$ ) ve  $\beta$ -Li ( $\text{Li}_3\text{Mg}_7$ ) yanısıra MgO pikleri de tespit edilmiştir. 4. alaşımın XRD analiz sonuçlarında, 1. ve 2. alaşımda rastlanan AlLi intermetalikleri tespit edilmemiştir.

### 5.3. Üretilen Alaşımların Mikroyapı Sonuçları

Bu bölümde Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çeşitli büyütmelelerdeki OM ve SEM mikroyapı görüntüleri yer almaktadır.

#### 5.3.1. Mg-8Li-2Al alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri

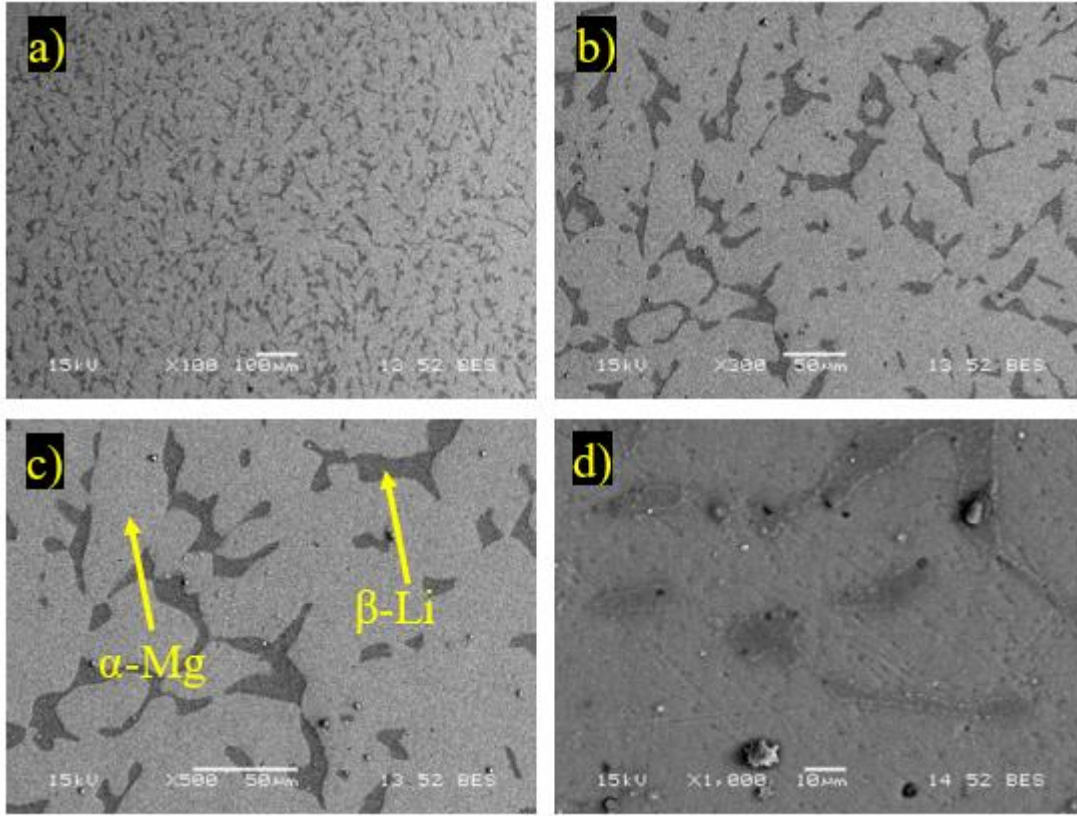
Mg-8Li-2Al alaşımının farklı büyütmelelerdeki OM ve SEM mikroyapısı sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'de görülmektedir. Mg-8Li-2Al alaşımının yüksek büyütmelelerdeki SEM mikroyapı ve EDS analiz sonuçları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de yer almaktadır.



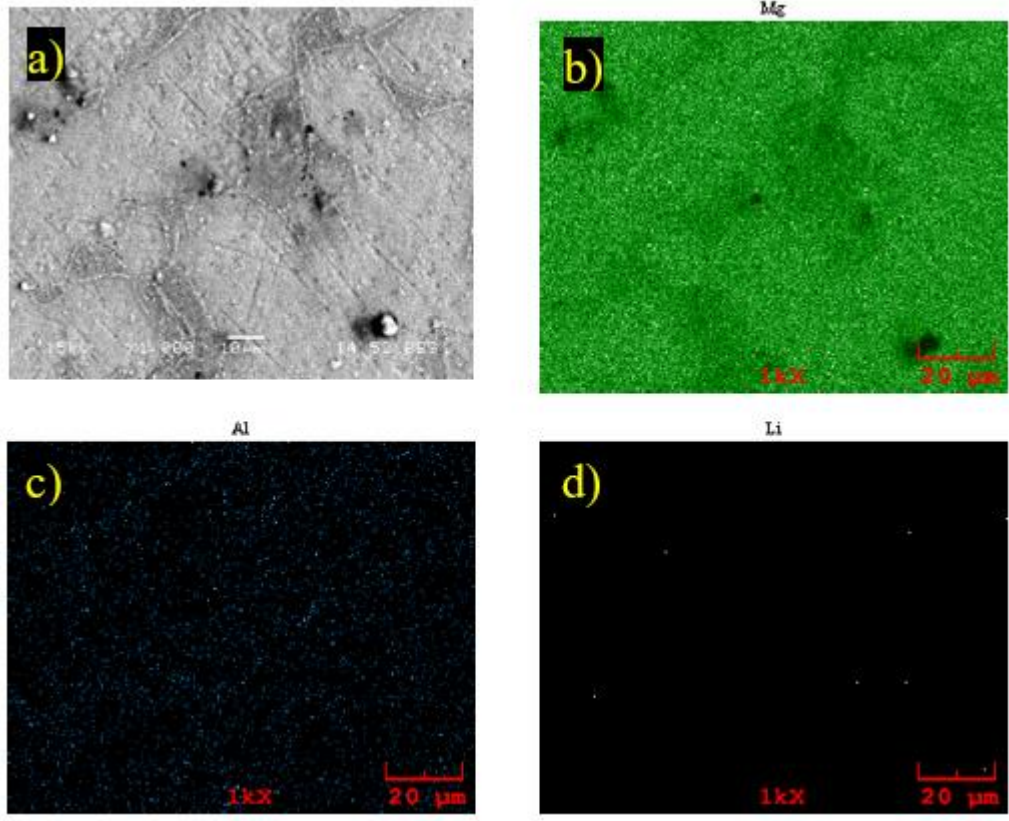
Şekil 5.5. Mg-8Li-2Al alaşımının optik mikroskop görüntüleri.

Tablo 5.1 üretilen alaşımların kimyasal analiz sonuçlarına göre Mg-8Li-2Al alaşımı ağırlıkça %8 yani %5,7-10,3 arasında Li içerdiği için çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapıdadır. Şekil 5.1'deki XRD analiz sonuçları göz önüne alındığında, mikroyapının

genel olarak  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarından oluştuğu görülmektedir. Literatür incelemelerinde, koyu renkli bölgelerin  $\beta$ -Li fazını temsil ettiği belirtilmektedir. Açık renkli alanlar ise  $\alpha$ -Mg fazları olarak tanımlanmıştır (Fu ve ark., 2018; X. Xiong ve ark., 2019; X. M. Xiong ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2018). OM görüntülerinde koyu renkli  $\beta$ -Li fazları yüksek büyütmede (Şekil 5.5.d) incelendiğinde, genelde  $\beta$ -Li faz sınırlarına yakın bölgelerde yoğunlaşan siyah renkli küresel şekilli yapılar görülmektedir. Bahsi geçen bu siyah renkli yapılar, Şekil 5.6.d, Şekil 5.7.a ve Şekil 5.8 SEM mikroyapısında beyaz renkte görülmektedir.



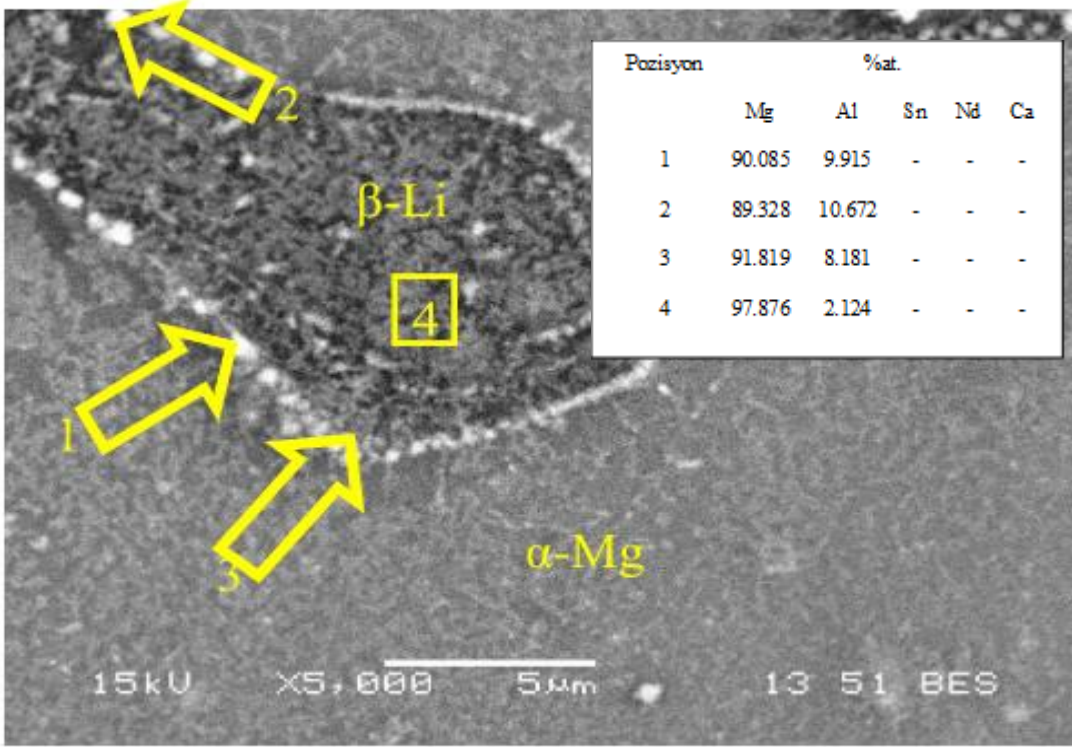
Şekil 5.6. Mg-8Li-2Al alaşıminın SEM görüntüleri.



**Şekil 5.7.** Mg-8Li-2Al alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.

Şekil 5.7’de Mg-8Li-2Al alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri incelendiğinde, matrisin Mg olduğu ve Al elementinin tüm matrise neredeyse homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Geleneksel EDS’ler lityumun saptanması için çok kullanışlı değildir çünkü karakteristik x-ışınları (Li K ~ 55 eV) çok düşük enerjiye sahiptir ve berilyum veya polimerden yapılmış olan alet penceresinde emilir (Bessette, S. ve ark., 2018). Bu nedenle Şekil 5.7.d’de Li elementinin matristeki dağılımı ile ilgili bir sonuç alınamamıştır.



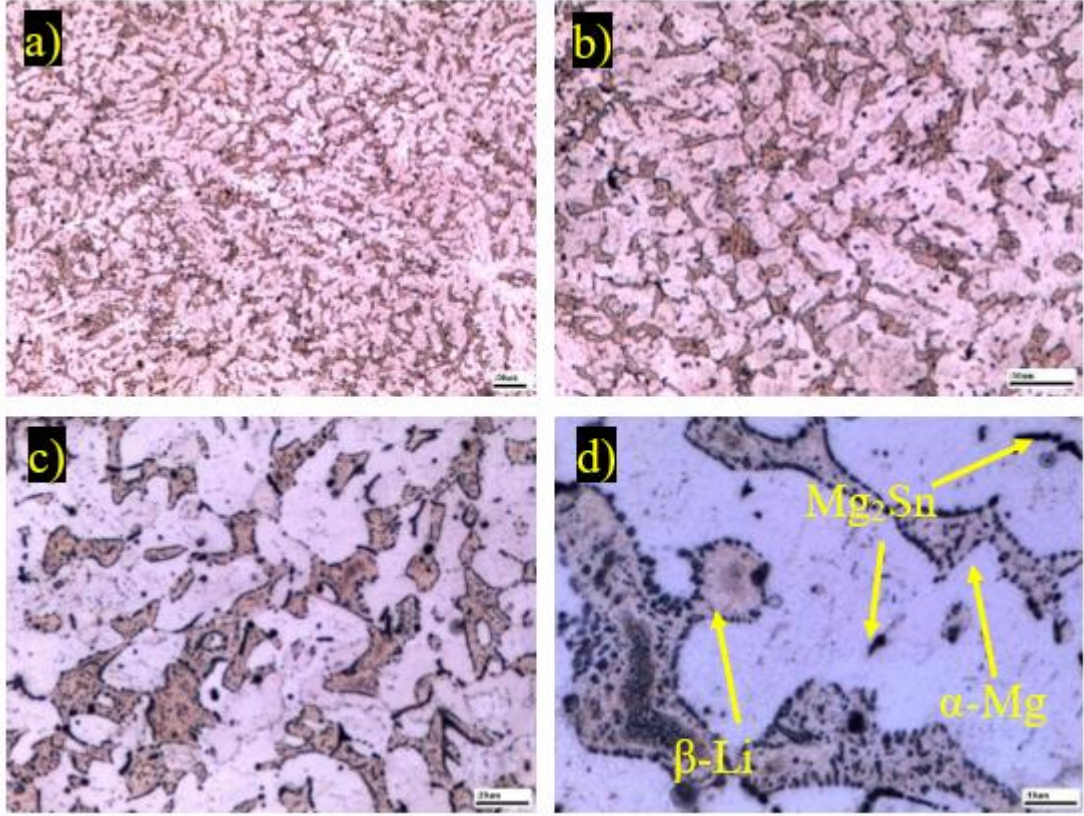


**Şekil 5.8.** Mg-8Li-2Al alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.

Genel olarak Mg-8Li-2Al mikroyapısının,  $\alpha$ -Mg matrisi içinde parçalı olarak dağılmış  $\beta$ -Li fazlarına ve  $\beta$ -Li fazları içinde ve faz sınırlarında oluşmuş AlLi intermetaliklerine sahip olduğu söylenebilir.

### 5.3.2. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri

Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının farklı büyütmelerde OM ve SEM mikroyapısı Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı, Mg-8Li-2Al alaşımında olduğu gibi ağırlıkça %8 Li içeriğinden dolayı çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapıya sahiptir. Mg-8Li-2Al alaşımında olduğu gibi Mg-8Li-2Al-1,5Sn mikroyapısının,  $\alpha$ -Mg matrisi içinde parçalı olarak dağılmış  $\beta$ -Li fazlarından ve  $\beta$ -Li fazları içinde oluşmuş küresel ve iğnemsî şekilli intermetaliklerden oluşmaktadır.



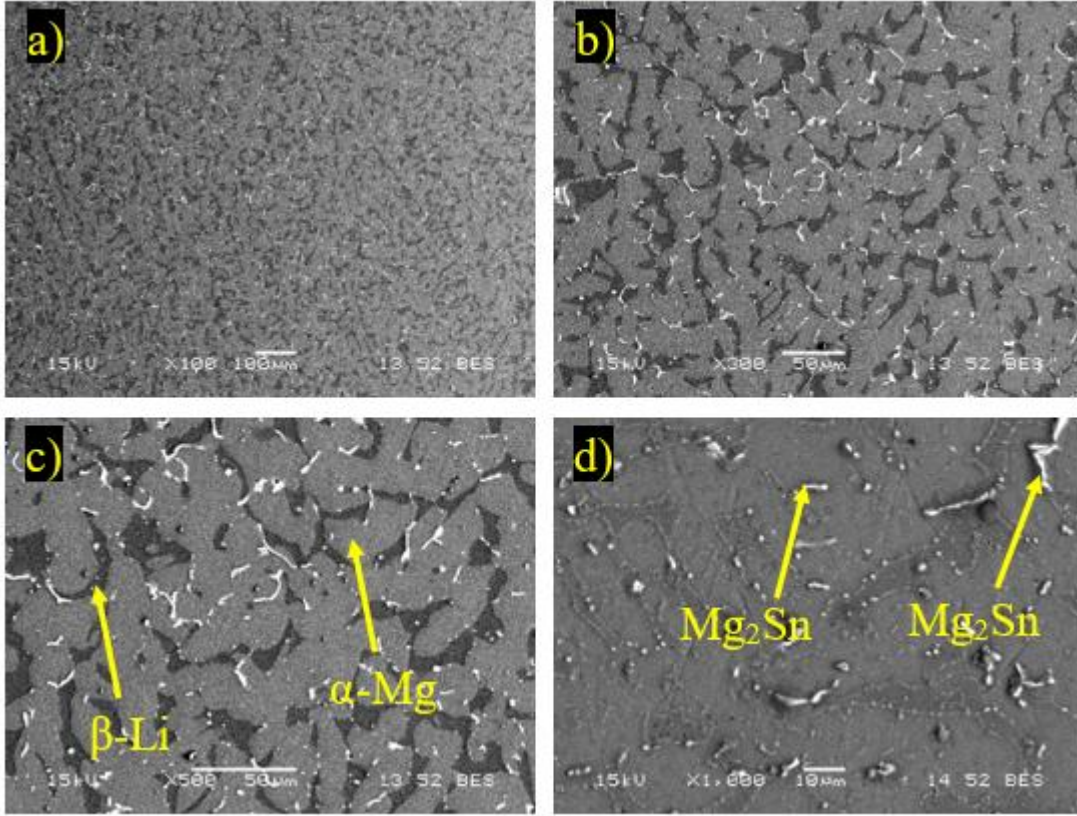
Şekil 5.9. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının optik mikroskop görüntüleri.

Sn alaşım elementi ilavesi sonrası Şekil 5.9 OM mikroyapıları incelendiğinde, özellikle  $\beta$ -Li fazlarının boyutlarının küçüldüğü, Mg-8Li-2Al alaşımı ile kıyaslandığında  $\beta$ -Li fazlarında artış olduğu ve mikroyapıda daha homojen dağıldığı görülmektedir.

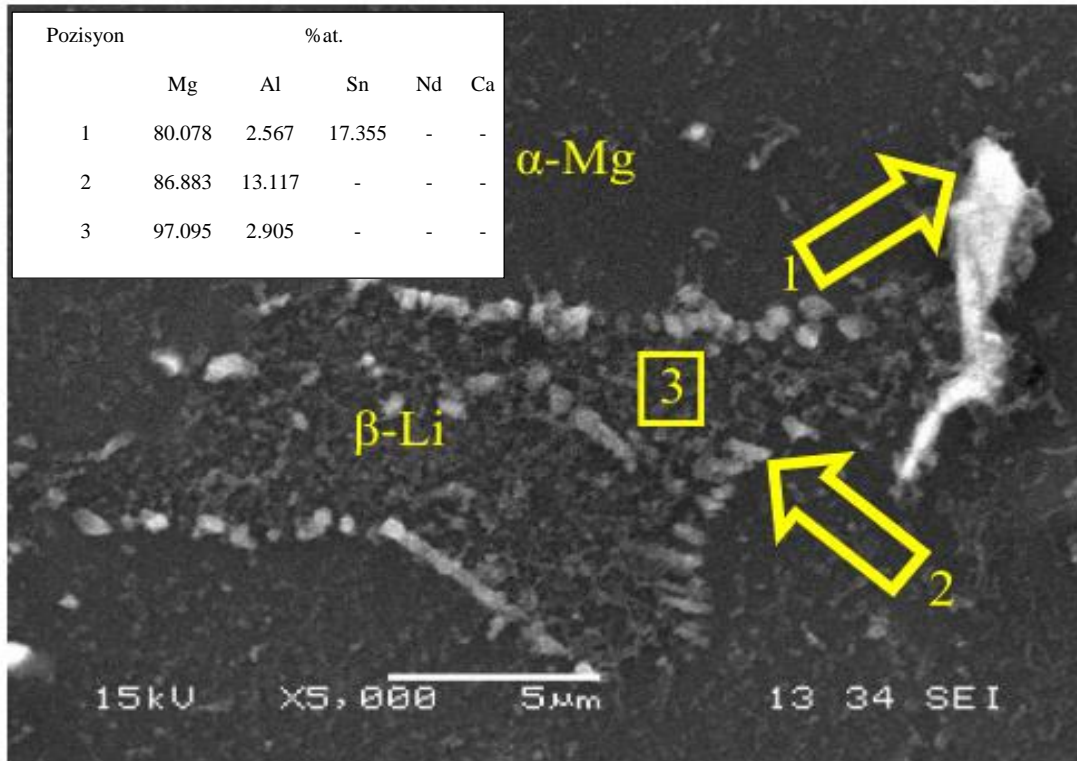
Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'deki mikroyapılar ve Şekil 5.2 XRD analiz sonuçları birlikte incelendiğinde, alaşımda  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazları ile AlLi intermetaliklerinin yanısıra Sn ilavesi sonucu  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinin de oluştuğu tespit edilmiştir.

Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının XRD analiz sonuçlarında ve Mg-Sn ikili denge diyagramında görülen  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinin mikroyapıda (Şekil 5.9.d OM görüntüsü) siyah renkli küresel ve iğnemsî yapılar olduğu görülmektedir.  $Mg_2Sn$  intermetaliklerini küresel şekilli AlLi intermetaliklerden ayırt etmek için SEM ve EDS analizlerinden faydalanılmıştır.  $Mg_2Sn$  intermetalikleri Şekil 5.10.d SEM mikroyapısında ise beyaz renkli küresel ve iğnemsî yapılar şeklinde görülmektedir.



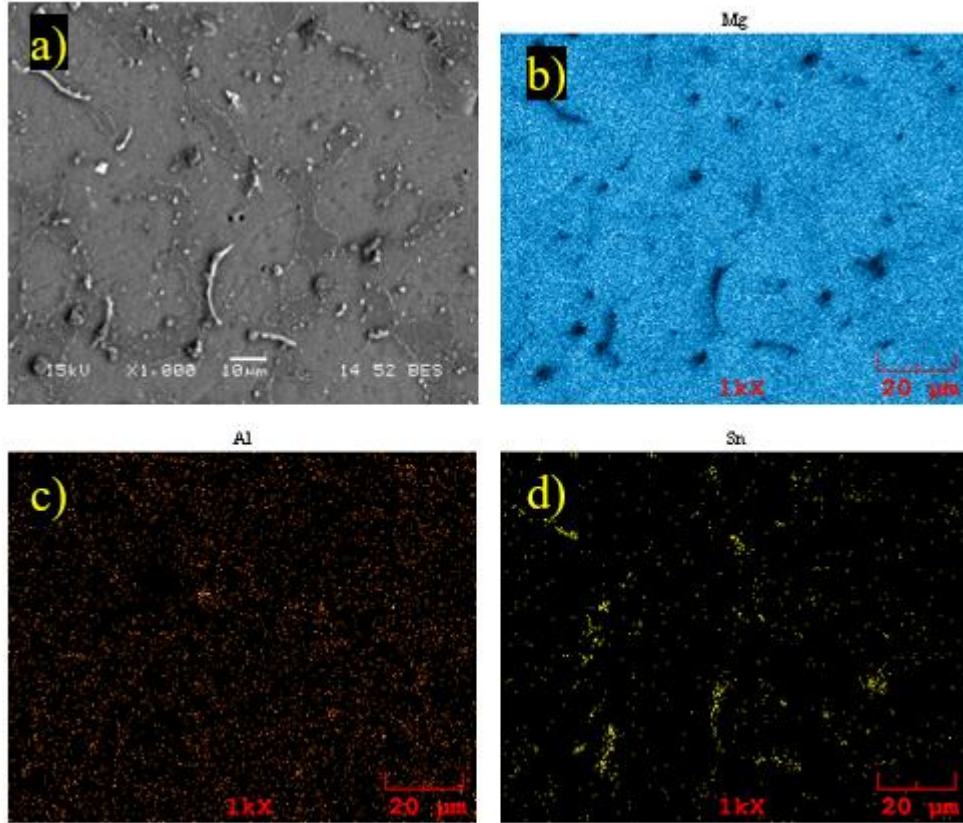


Şekil 5.10. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaışımının SEM görüntüleri.



Şekil 5.11. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaışımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.

Şekil 5.11. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri incelendiğinde, 1 numaralı beyaz renkli intermetalik Mg<sub>2</sub>Sn olduğu ve α-Mg ve β-Li fazların sınırında bulunan 2 numaralı noktanın AlLi olduğu anlaşılmaktadır. Aynı mikroyapı içinde yapılan 3 numaralı EDS analizinde β-Li fazı içinde yer alan ağimsi yapının da atomsal oranda %2,905 civarında Al içerdiği görülmektedir. Bu sonuca göre, Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımındaki β-Li fazı, Mg-8Li-2Al alaşımına kıyasla (Şekil 5.8 analiz 4) daha fazla Al içermektedir.



Şekil 5.12. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.

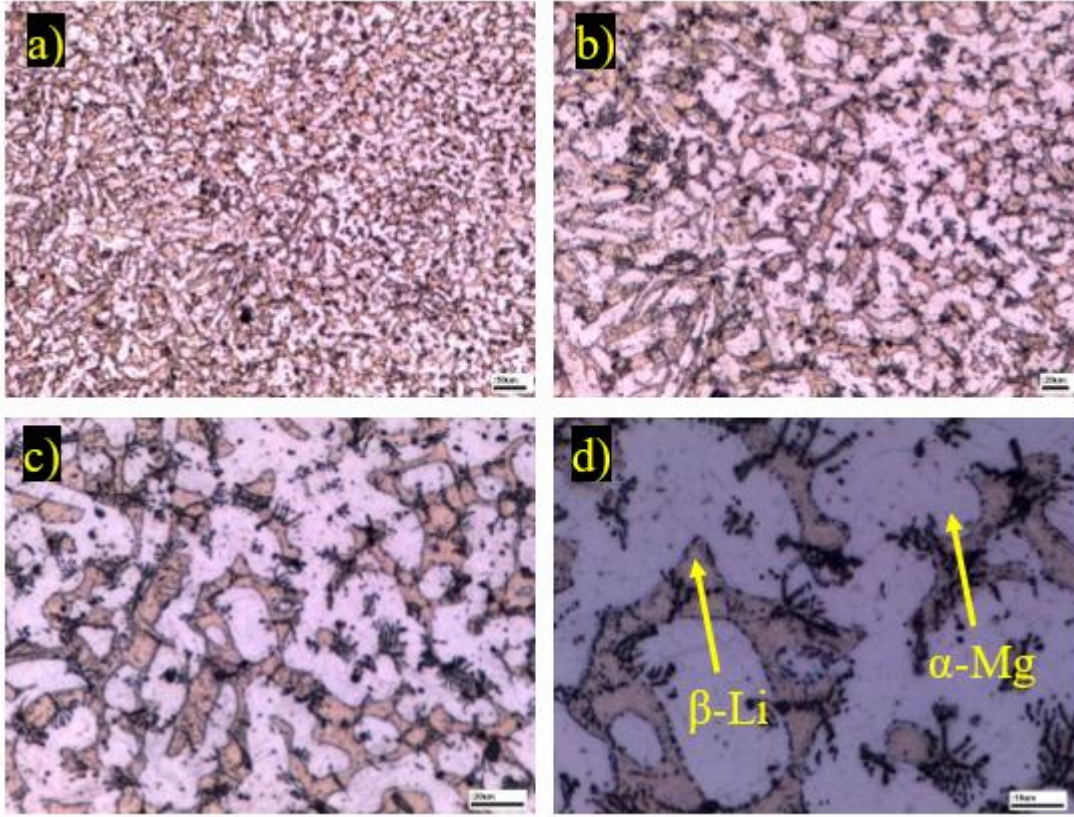
Şekil 5.12'deki Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri incelendiğinde, Al'un genelde tüm matrise dağıldığını fakat Sn elementinin yoğun olduğu bölgelerde Al miktarının azaldığı veya tespit edilemediği görülmektedir. Sn elementinin ise Mg<sub>2</sub>Sn oluşan bölgelerde yoğunlaştığı ve aynı zamanda Sn elementi α-Mg ve β-Li faz sınırlarında dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

### 5.3.3. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri

Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının OM ve SEM mikroyapısı Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımı, Mg-8Li-2Al ve Mg-8Li-2Al-1,5Sn



alaşımlarında olduğu gibi ağırlıkça %8 Li içeriğinden dolayı çift fazlı  $\alpha + \beta$  (HSP + HMK) yapıya sahiptir.



Şekil 5.13. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarının optik mikroskop görüntüleri.

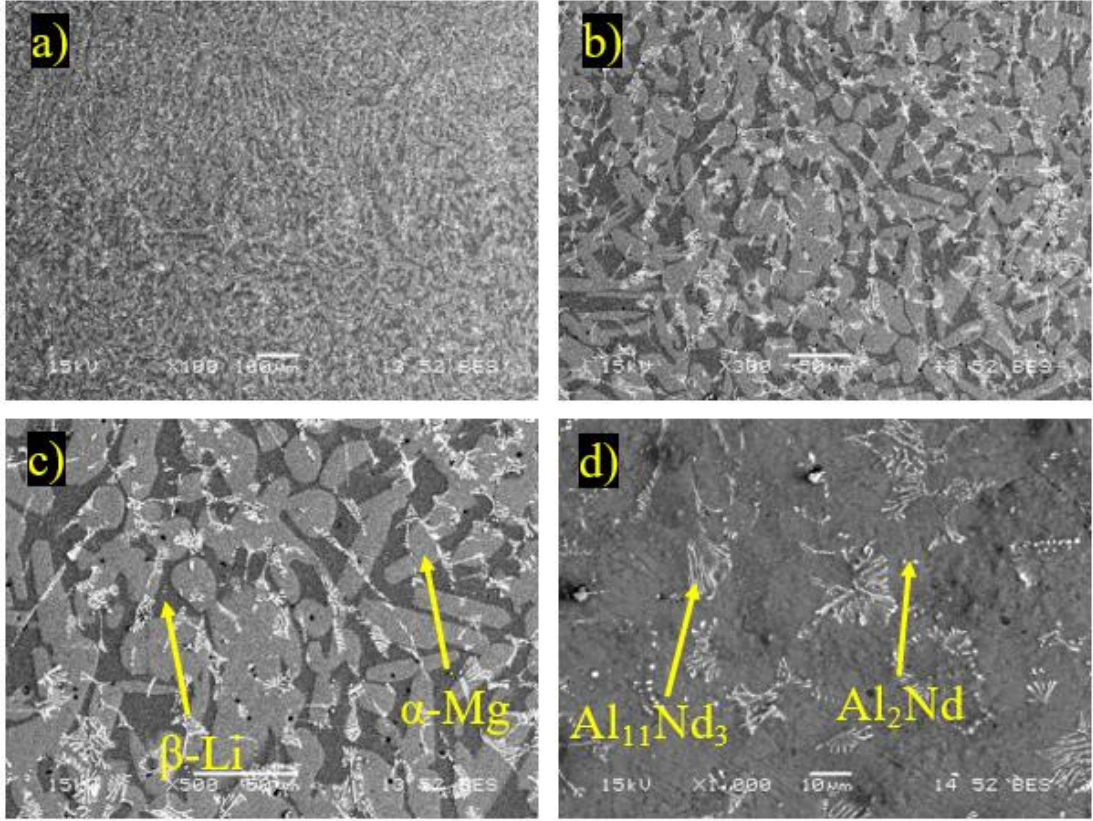
Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarının OM ve SEM mikroyapıları Nd ilavesi sonrası  $\beta$ -Li miktarında artış olduğu ayrıca  $\beta$ -Li tanelerinin küçüldüğünü göstermektedir. Bununla beraber intermetaliklerin belli bölgelerde yoğunlaştığı, hacim ve boyut olarak  $Mg_2Sn$ 'ye göre büyük olduğu görülmektedir.

Şekil 5.13.d Mg-8Li-2Al-1,5Nd mikroyapısı incelendiğinde,  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının yanı sıra bu fazların içinde oluşmuş çubuk ve dallanmış yapıli intermetalikler olduğu görülmektedir. Bu intermetalik yapılar XRD analiz sonuçlarına ve Al-Nd ikili faz diyagramlarına dayanarak,  $Al_{11}Nd_3$  ve  $Al_2Nd$  olarak tanımlanmıştır.

Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımlarında oluşan AlLi intermetaliklerine, Nd alaşım elementi ilavesi sonrasında rastlanmamıştır. Nd alaşım elementi ilavesi sonrası mikroyapı incelendiğinde,  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının boyutlarının küçüldüğü, Mg-8Li-2Al alaşımı ile kıyaslandığında  $\beta$ -Li fazlarında artış ve  $\alpha$ -Mg fazlarında azalma olduğu görülmektedir. Mikroyapı çalışmalarında,  $Al_{11}Nd_3$  ve  $Al_2Nd$  intermetalikleri, AlLi ve  $Mg_2Sn$  intermetalikleri ile kıyaslandığında, yapıda farklı morfolojide oluştuğu,

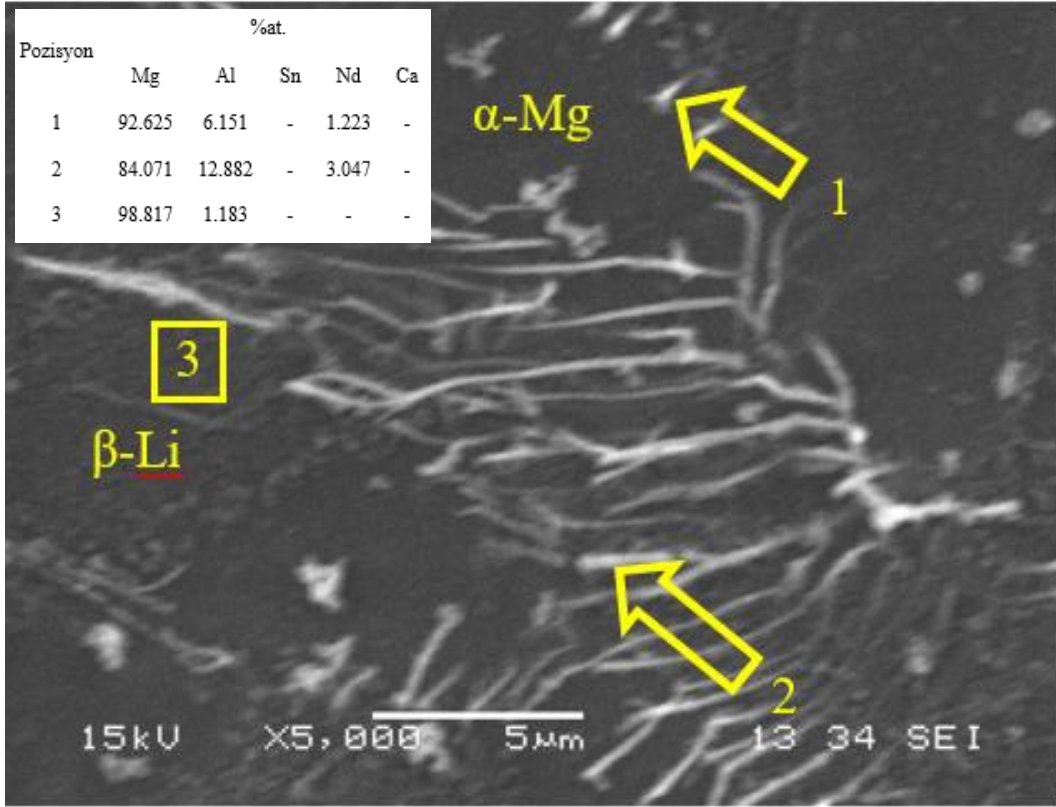


hacimsel olarak daha fazla ve belli bölgelerde kümelenmiş olarak bulunduğu görülmektedir.

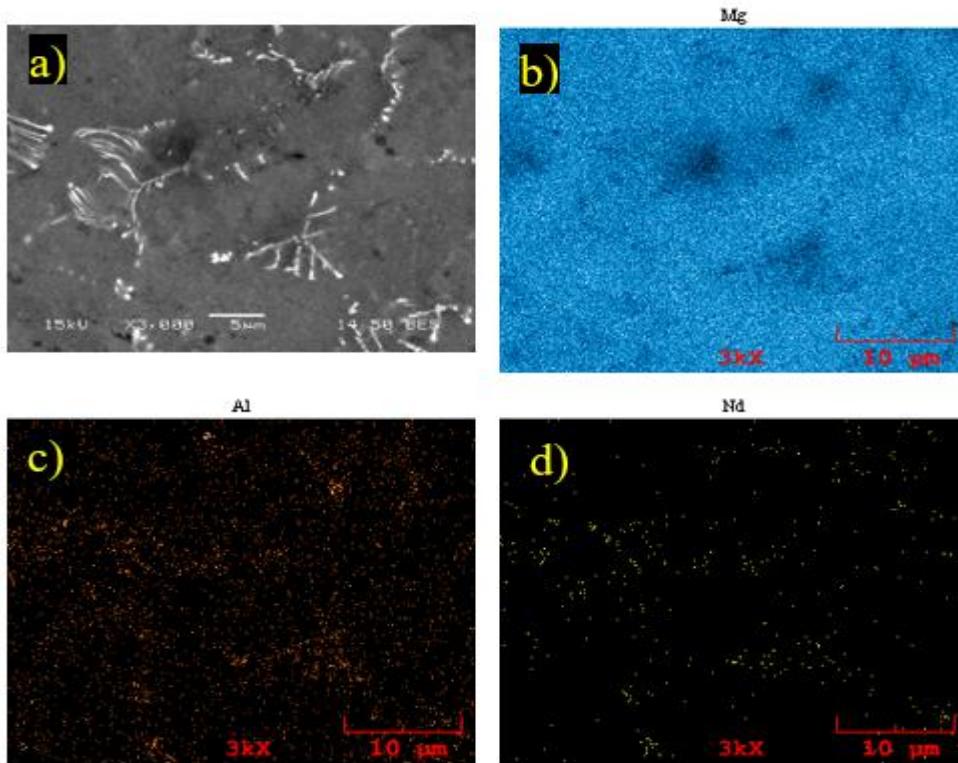


Şekil 5.14. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının SEM görüntüleri.

Şekil 5.15 Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde, 1 numaralı analizde görülen 1 μm ve altındaki intermetaliklerin Nd/Al oranının yaklaşık  $\frac{1}{2}$  olduğu görülmektedir. Bu analize göre oluşan intermetalik  $Al_2Nd$  olduğu sonucuna varılmıştır. 2 numaralı analizde ise ince uzun çubuk formunda dallanmış yapıda bulunan intermetalikler gösterilmektedir. EDS analiz sonucuna göre Nd/Al oranının yaklaşık  $\frac{3}{11}$  olduğu görülmektedir. Bu nedenle çubuk formunda dallanmış yapıda bulunan intermetaliklerin  $Al_{11}Nd_3$  olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.15. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.



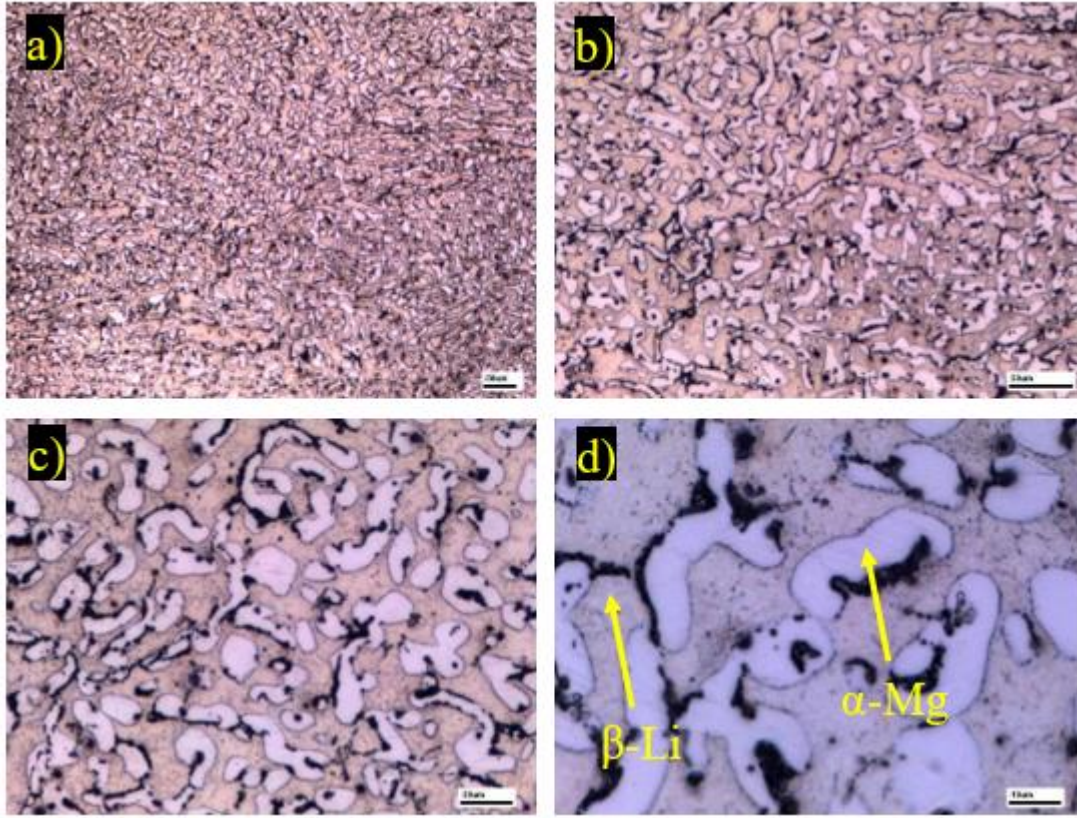
Şekil 5.16. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.

Şekil 5.16. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri incelendiğinde, Al ve Nd elementlerinin yapıda homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Al ve Nd elementlerinin SEM mikroyapısında beyaz renkli görülen Al-Nd intermetaliklerinin olduğu bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Şekil 5.15 analiz 3'ten görüldüğü gibi  $\beta$ -Li içindeki Al miktarı atomsal olarak %1,183 olarak ölçülmüştür.

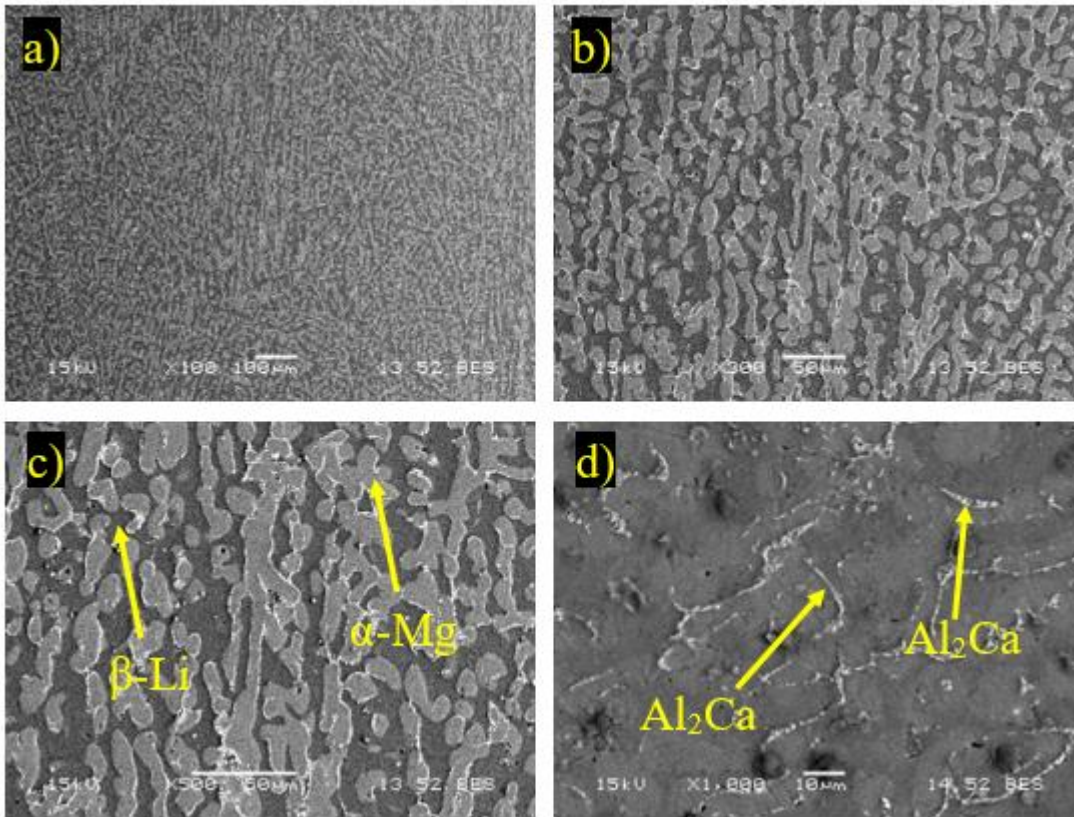
#### **5.3.4. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının OM ve SEM mikroyapı görüntüleri**

Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının optik mikroskop ile elde edilmiş mikroyapısı Şekil 5.17'de görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının diğer alaşımlarda olduğu gibi ağırlıkça %8 Li içerdiğinden dolayı, XRD analiz sonuçlarında (Şekil 5.4) görüldüğü gibi  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarını içermektedir. Aynı zamanda XRD analiz sonuçlarında Ca ilavesi sonucu  $Al_2Ca$  intermetaliklerine de rastlanmıştır. Mikroyapıda  $Al_2Ca$  intermetaliklerinin  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li faz sınırlarında konumlanan siyah bölgeler olduğu düşünülmektedir. Mg-8Li-2Al alaşımına Ca alaşım elementi ilavesi sonrası mikroyapıda özellikle  $\alpha$ -Mg faz boyutlarında küçülme olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımındaki  $\alpha$ -Mg fazları fiberimsi yani ince ve uzun bir şekile dönüşmüştür.  $Al_2Ca$  intermetaliklerinin diğer üç alaşımdaki intermetaliklere kıyasla farklı morfolojide oluştuğu ve  $Al_2Ca$  intermetaliklerinin  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li faz sınırlarında kümelenmiş olduğu Şekil 5.18.d ve Şekil 5.19.d'de görülmektedir. Mg-8Li-2Al alaşımına Ca alaşım elementi ilavesi sonucunda  $\alpha$ -Mg faz miktarı azalırken,  $\beta$ -Li faz miktarı artış göstermiştir. Şekil 5.19 görüldüğü gibi  $\beta$ -Li içindeki Al atomsal değeri %1,454 olarak ölçülmüştür.

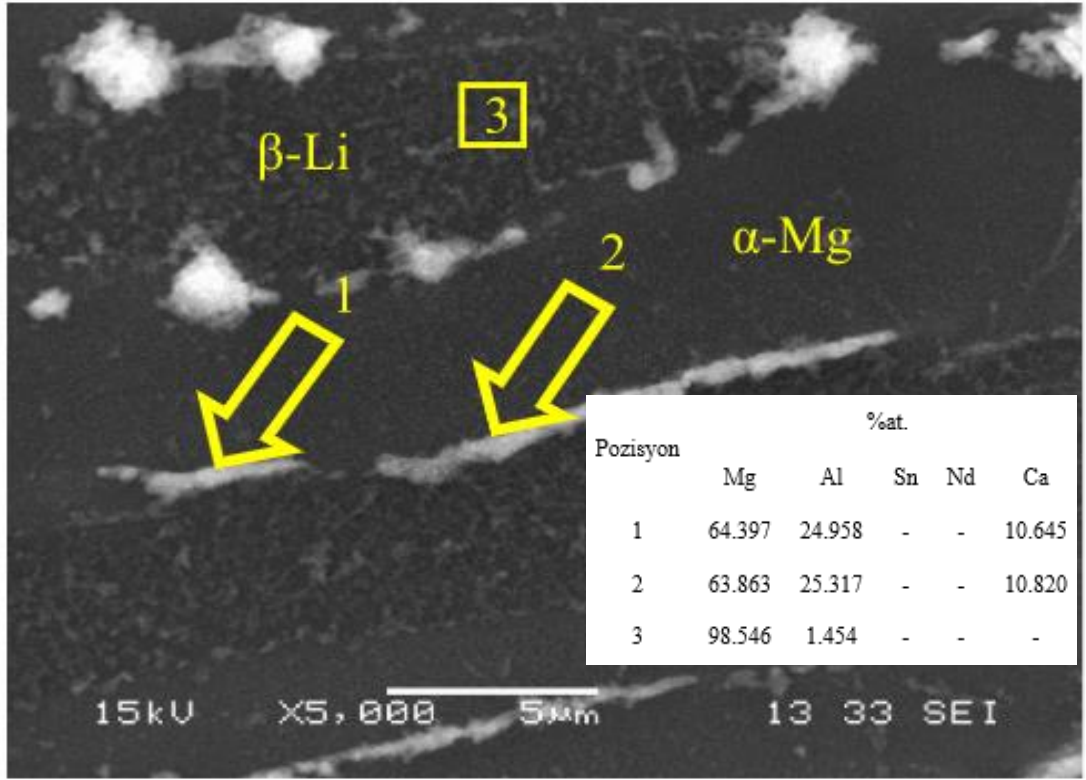




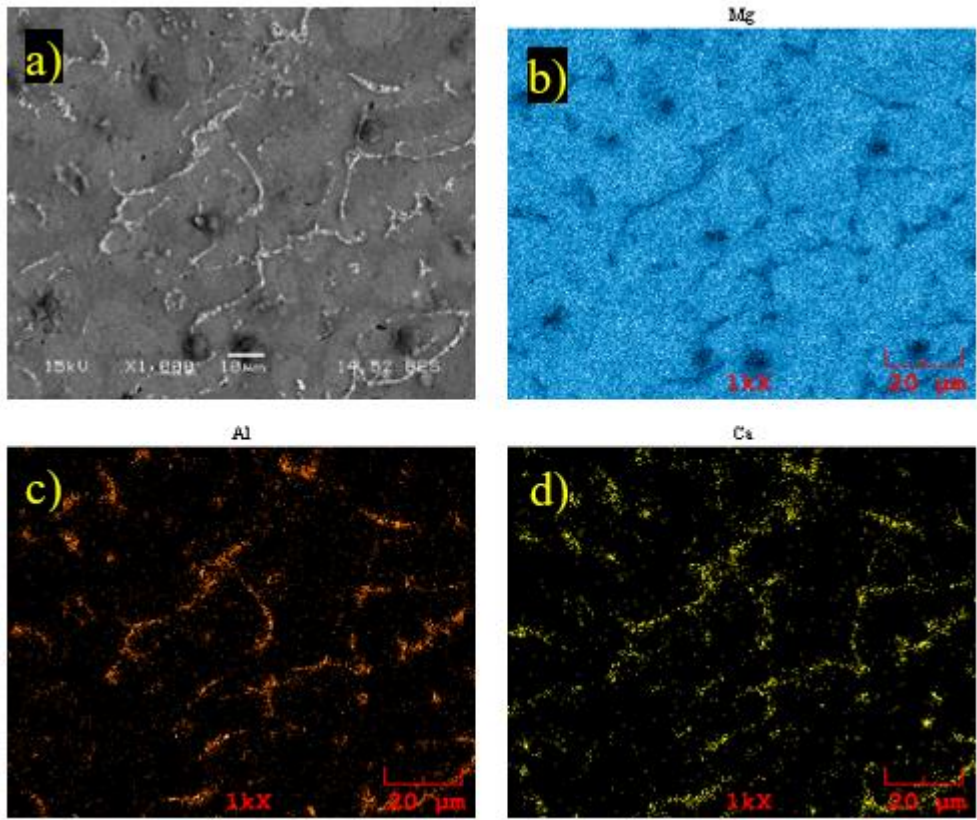
Şekil 5.17. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımanın optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 5.18. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımanın SEM görüntüleri.



Şekil 5.19. Mg-8Li-2Al-1.5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.



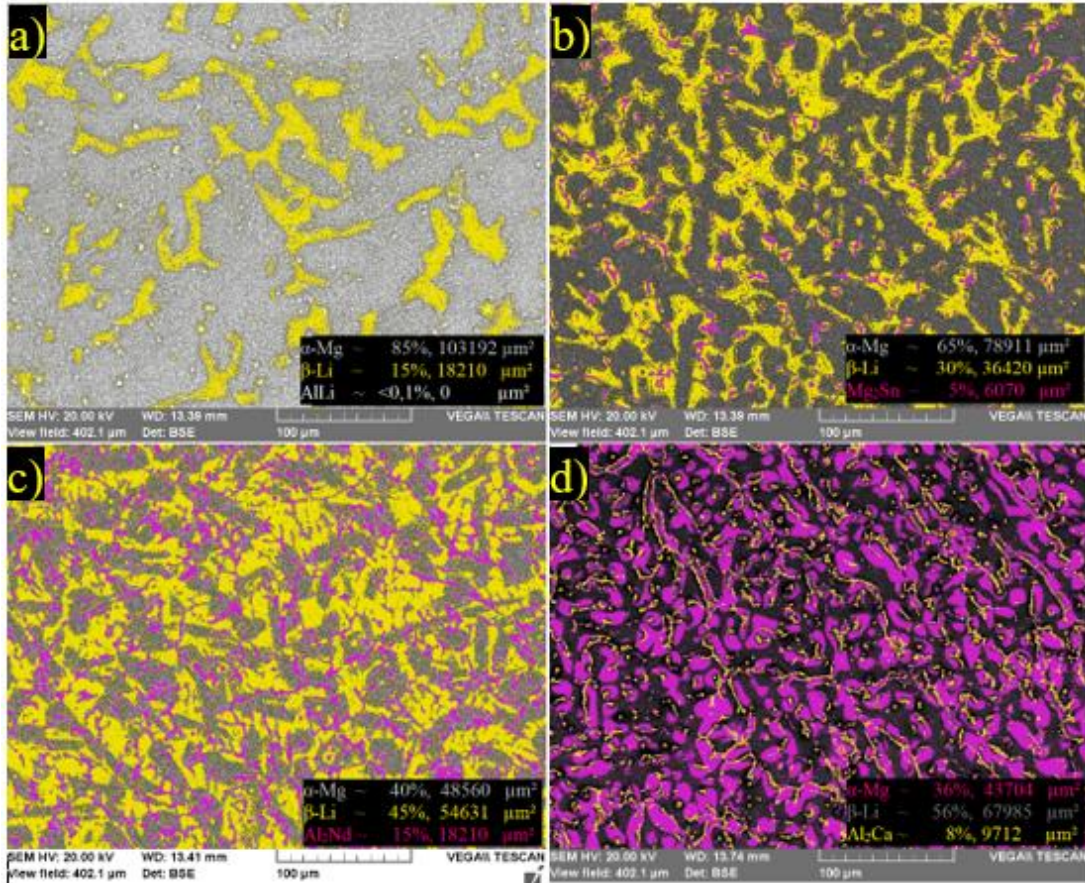
Şekil 5.20. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri.



Şekil 5.20'deki Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri incelendiğinde, Mg-8Li-2Al ve Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımlarının aksine, Al ve Ca elementlerinin yapıda homojen dağılmadığı ve belli bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. SEM mikroyapısında yer alan beyaz renkli Al<sub>2</sub>Ca intermetaliklerinin olduğu bölgelerde Al ve Ca elementlerinin yoğunlaştığı görülmektedir.

### 5.3.5. Üretilen alaşımlardaki $\alpha$ -Mg, $\beta$ -Li ve intermetalik fazlarının alan fraksiyonlarının SEM yardımı ile karşılaştırılması

Şekil 5.21'de (a) Mg-8Li-2Al, (b) Mg-8Li-2Al-1,5Sn, (c) Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve (d) Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının kontrast farkı oluşturularak elde edilmiş SEM mikroyapıları görülmektedir. Her alaşımın SEM mikroyapısının alt sağ köşesinde, alaşımın içerdiği  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve intermetalik fazlarının alan fraksiyonu değerleri yer almaktadır.



Şekil 5.21. a) Mg-8Li-2Al, b) Mg-8Li-2Al-1,5Sn, c) Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve d) Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının kontrast farkı oluşturularak elde edilmiş SEM mikroyapıları.

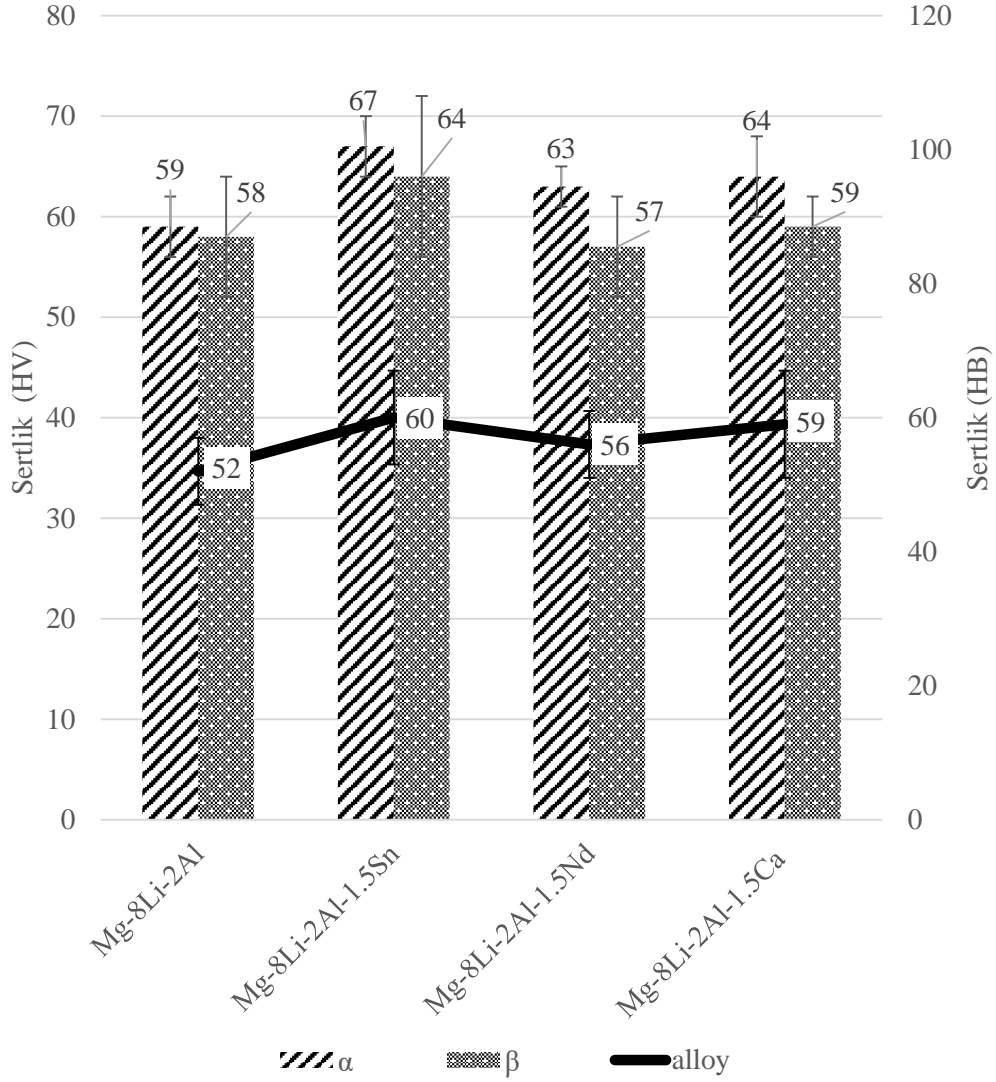
Şekil 5.21.a incelendiğinde, Mg-8Li-2Al alaşımında  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve intermetalik fazların alan fraksiyonlarının sırasıyla %85, %15 ve < %1 olduğu görülmektedir. Şekil 5.21.b, 5.21.c ve 5.21.d incelendiğinde ise intermetalik fazların alan fraksiyonu %5, %15 ve sırasıyla %8 olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber Şekil 5.21.b, 5.21.c ve 5.21.d mikroyapı görüntülerine göre Sn, Ca ve Nd ilaveli alaşımlarda  $\alpha$ -Mg miktarı azalırken  $\beta$ -Li miktarı artmıştır. Mg-8Li-2Al alaşımı ile Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı karşılaştırıldığında,  $\beta$ -Li fazı miktarı %15'ten %26'ya yükselirken,  $\alpha$ -Mg fazı %85'ten %69'a düşmüştür ve Mg<sub>2</sub>Sn fazları %5 civarında oluşmuştur. Ancak Mg-8Li-2Al-1,5Nd'deki ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımındaki  $\alpha$ -Mg miktarı sırasıyla %40 ve %36'ya azalmıştır.

#### **5.4. Mekanik Deneylerin Sonuçları**

Bu bölümde üretilen alaşımların sertlik deney sonuçları ile çekme ve basma deney sonuçları verilmektedir.

##### **5.4.1. Sertlik deneylerinin sonuçları**

Şekil 5.22'de Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının ölçülen olan Brinell sertlik değerleri ve bu alaşımların yapısında bulunan  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının ölçülen Vickers mikrosertlik değerleri verilmiştir. Şekil 5.22 Sertlik grafikleri incelendiğinde, Mg-8Li-2Al alaşımı en düşük sertlik değerine sahiptir. Sn, Nd ve Ca ilavesi ile elde edilen Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının Mg-8Li-2Al alaşımına kıyasla sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının Brinell sertlik değerleri sırasıyla 52, 60, 56 ve 59 HB olarak ölçülmüştür. Mg-8Li-2Al alaşımına ilave edilen Sn, Nd ve Ca elementleri sonrasında  $\alpha$ -Mg fazlarının mikrosertlik değerleri artış gösterirken,  $\beta$ -Li mikrosertlik değerlerinde sadece Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında kayda değer bir artış meydana gelmiştir.



**Şekil 5.22.** Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları ve bu alaşımların içerdiği  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının sertlik değerleri.

#### 5.4.2. Çekme deneylerinin sonuçları

Tablo 5.3’de üretilen Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çekme ve basma deneylerinin sonuçları verilmiştir. Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımları, Mg-8Li-2Al alaşımını ile karşılaştırıldığında çekme, akma ve basma mukavemetlerinde artışlar meydana gelmiştir. Artan mukavemet değerleri ile birlikte çekme uzaması değerleri bir miktar azalmıştır.

Mg-8Li-2Al alaşımının çekme, akma ve basma mukavemeti değerleri sırasıyla 115 MPa, 74 MPa ve 244 MPa olarak llmüştür. Çekme uzaması ve basma deneyinde birim Şekil değişimi değerleri ise sırasıyla %12,8 ve %27 olarak llmüştür.



Literatürdeki araştırmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Fu ve ark., 2018, Li ve ark., 2012).

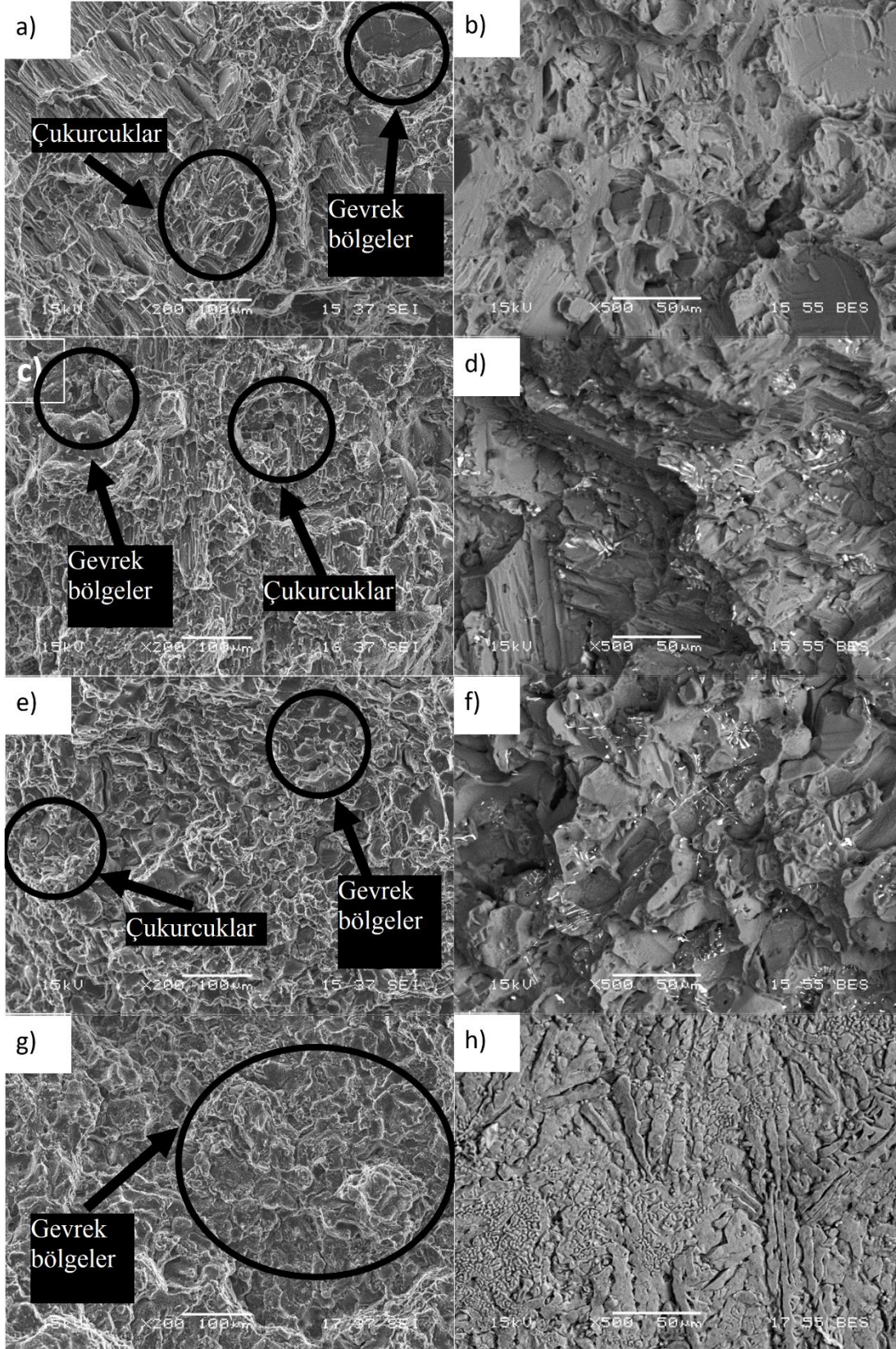
Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının çekme, akma ve basma mukavemeti değerleri sırasıyla 136 MPa, 110 MPa ve 327 MPa olarak ölçülmüştür. Aę. %1,5 Sn ilaveli Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı Mg-8Li-2Al alaşımı ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemeti değerinde %18 artış, akma mukavemetinde %46, basma mukavemeti değerinde ise %34 artış sağlanmıştır. Çekme uzaması ve birim Şekil değişimi değerlerinde ise sırasıyla yaklaşık %19 ve %11 azalışlar meydana gelmiştir.

Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının çekme ve basma deneyi sonuçları Mg-8Li-2Al alaşımı ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemeti değerinde %12 artış, akma mukavemetinde %42, basma mukavemeti değerinde ise %14 artış sağlanmıştır. Çekme uzaması ve basma birim Şekil değişimi değerlerinde ise sırasıyla yaklaşık %22 azalış ve %30 artış elde edilmiştir. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının çekme, akma ve basma mukavemeti değerleri sırasıyla 129 MPa, 105 MPa ve 278 MPa olarak ölçülmüştür.

Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının çekme, akma ve basma mukavemeti değerleri sırasıyla 125 MPa, 102 MPa ve 262 MPa olarak ölçülmüştür. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımı Mg-8Li-2Al alaşımı ile karşılaştırıldığında, çekme mukavemeti değerinde %9 artış, akma mukavemetinde %38, basma mukavemeti değerinde ise %7 artış sağlanmıştır. Çekme uzaması ve basma birim Şekil değişimi değerlerinde ise sırasıyla yaklaşık %38 azalış ve %26 artış gerçekteşmiştir.

**Tablo 5.3.** Alaşımların çekme mukavemeti, akma mukavemeti, çekme uzaması, basma mukavemeti ve birim Şekil değişimi değerleri.

Alaşım	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Uzaması(%)	Basma Mukavemeti (MPa)	Birim Şekil Değişimi(%)
Mg-8Li-2Al	115±6	74±5	12,8±0,4	244±8	27±1,2
Mg-8Li-2Al-1,5Sn	136±4	110±5	10,4±0,7	327±6	24±1,5
Mg-8Li-2Al-1,5Nd	129±5	105±4	10±0,3	278±8	35±2
Mg-8Li-2Al-1,5Ca	125±4	102±6	8±1,1	262±5	34±2,1

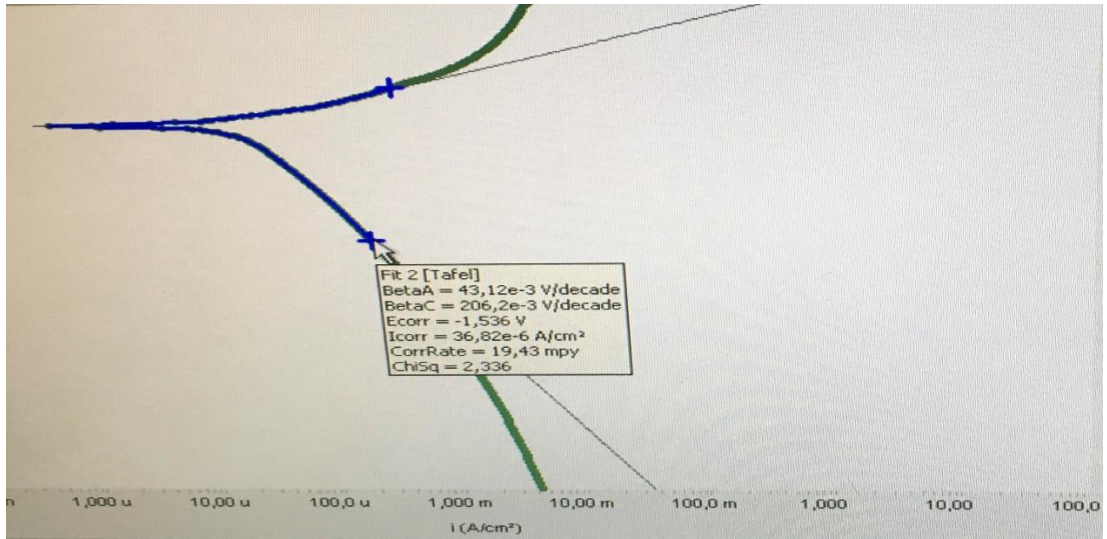


**Şekil 5.23.** (a-b) Mg-8Li-2Al, (c-d) Mg-8Li-2Al-1,5Sn, (e-f) Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve (g-h) Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çekme deneyi sonrası elde edilmiş kırık yüzey SEM fotoğrafları.

Şekil 5.23.'de görüldüğü gibi alaşımların kırılma yüzeyi incelemesinde Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn ve Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarının kırılma rejimlerinin benzer olduğu görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının kırılma yüzeyi ise, diğer alaşımların kırılma yüzeylerinden farklıdır. Mg-8Li-2Al-1,5Sn ve Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarında çukurcukların (dimple) boyutunun ve derinliğinin Mg-8Li-2Al ile karşılaştırıldığında nispeten azaldığını görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımı kırılma yüzeyi boyunca düz ve pürüzsüz bir görünüme sahiptir. Kırılma yüzeylerinin bazı bölgelerinde bazı gevrek yapıda bölgeler ve işaretli yerlerde çukurcuklar yer almaktadır. Bu çukurcukların bazılarının içinde ise ikincil fazlar görülmektedir.

### 5.5. Korozyon Deneylerinin Sonuçları

Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının yoğunlukları sırasıyla 1,32526, 1,5727, 1,5633 ve 1,5061 gr/cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Alaşımların potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrası elde edilen tafel eğrileri sırası ile Şekil 5.24, Şekil 5.25 Şekil 5.26 ve Şekil 5.27' de verilmiştir. Tablo 5.4' de ise potansiyodinamik polarizasyon deneylerinden elde edilen korozyon potansiyeli (E<sub>corr</sub>), korozyon yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) ve korozyon hızı (CorrRate) değerleri görülmektedir.

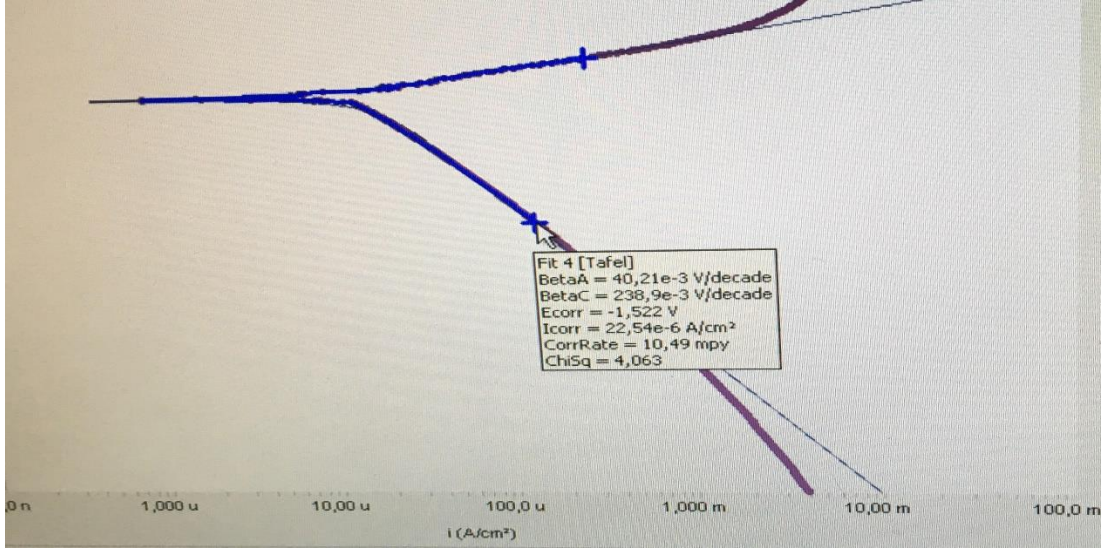


**Şekil 5.24.** Mg-8Li-2Al alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.

Şekil 5.24 Mg-8Li-2Al alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi ve Tablo 5.4 incelendiğinde, Mg-8Li-2Al alaşımının korozyon potansiyeli değeri (E<sub>corr</sub>) -1,536

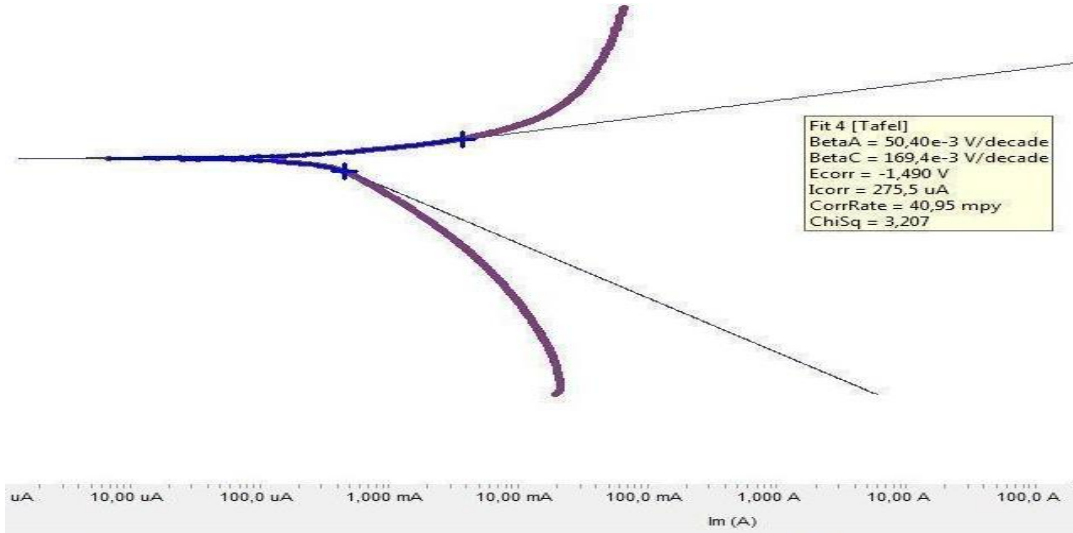


$V_{SCE}$  , korozyon yoğunluğu değeri ( $I_{corr}$ )  $36,82 \mu A/cm^2$  ve korozyon hızı değeri (CorrRate) ise  $19,43$  mpy olarak hesaplandığı görülmektedir.



Şekil 5.25. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.

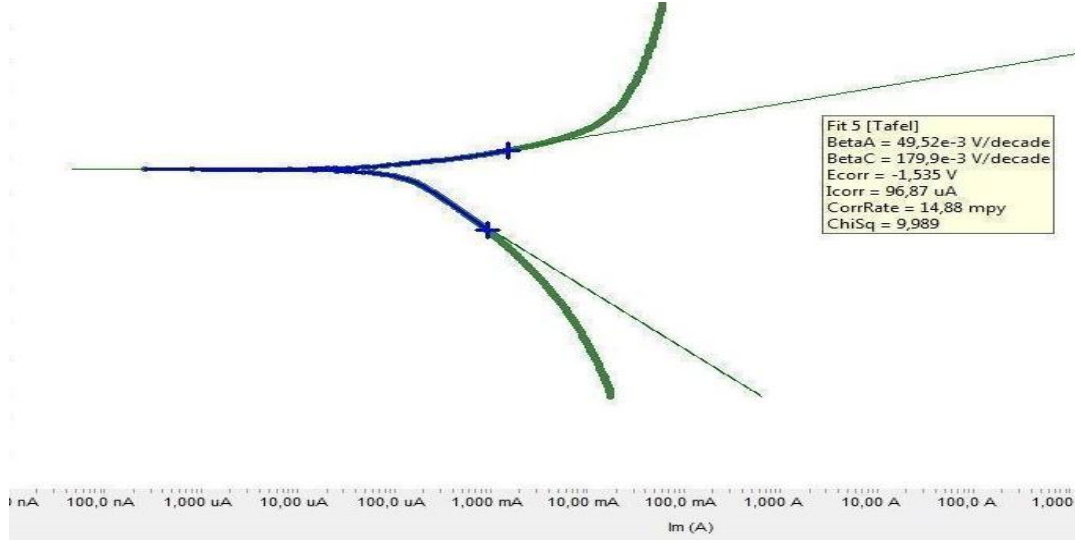
Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımasının korozyon potansiyeli değeri ( $E_{corr}$ )  $-1,522 V_{SCE}$  , korozyon yoğunluğu değeri ( $I_{corr}$ )  $22,54 \mu A/cm^2$  ve korozyon hızı değeri (CorrRate) ise  $10,49$  mpy olarak hesaplandığı Şekil 5.25 ve Tablo 5.4 incelendiğinde görülmektedir.



Şekil 5.26. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.

Şekil 5.26 Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının potansiyodinamik polarizasyon eğrisi ve Tablo 5.4'e göre, Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımasının korozyon potansiyeli değeri ( $E_{corr}$ ) -

1,490 V<sub>SCE</sub>, korozyon yoğunluğu değeri (I<sub>corr</sub>) 90,70 μA/cm<sup>2</sup> ve korozyon hızı değeri (CorrRate) ise 41 mpy olarak hesaplanmıştır.

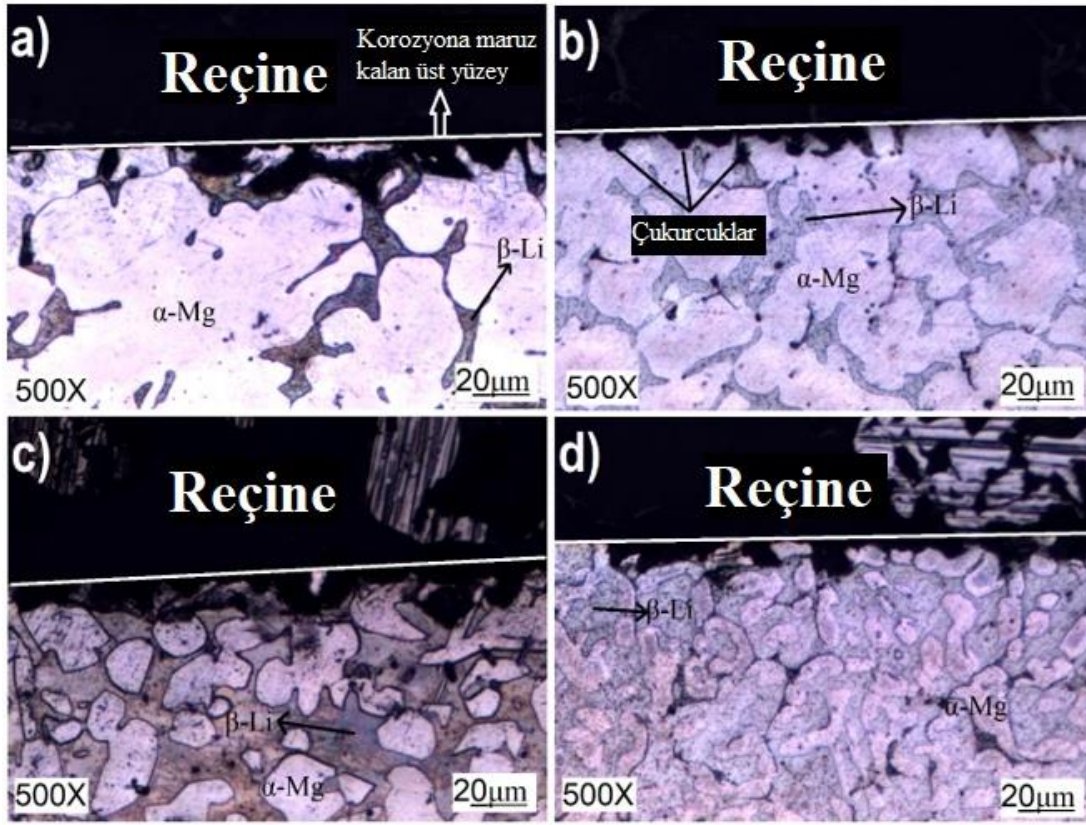


**Şekil 5.27.** Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrisinin ekran görüntüsü.

Şekil 5.27 ve Tablo 5.4 incelendiğinde Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının korozyon potansiyeli değeri (E<sub>corr</sub>) -1,535 V<sub>SCE</sub>, korozyon yoğunluğu değeri (I<sub>corr</sub>) 37,14 μA/cm<sup>2</sup> ve korozyon hızı değeri (CorrRate) ise 14,88 mpy olarak hesaplanmış olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.4.** Üretilen alaşımların korozyon potansiyeli (E<sub>corr</sub>), korozyon yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) ve korozyon hızı (CorrRate) değerleri.

Alaşım	E <sub>corr</sub> (V <sub>SCE</sub> )	I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	CorrRate(mpy)
Mg-8Li-2Al	-1,536	36,82	19,43
Mg-8Li-2Al-1,5Sn	-1,522	22,54	10,49
Mg-8Li-2Al-1,5Nd	-1,490	90,70	41
Mg-8Li-2Al-1,5Ca	-1,535	37,14	14,88



**Şekil 5.28.** a) Mg-8Li-2Al, b) Mg-8Li-2Al-1,5Sn, c) Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve d) Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının 0,1M NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.28’de Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının 0,1M NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon deneyi sonrası mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Anodik katodik bölgeler nedeniyle üretilen tüm numunelerin yüzeylerinde birçok korozyon çukuru görülmektedir. Elde edilen görüntüler Tablo 6’daki sonuçları desteklemektedir. Korozyona uğrayan bölgelerdeki çukurların derinlikleri göz önüne alındığında, en derin korozyon çukurları Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında görülürken, en sığ korozyon çukurları ise Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında görüntülenmiştir.

## 6. DENEYSEL SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

### 6.1. Mikroyapı Sonuçlarının Tartışılması

Bu çalışmada birinci alaşım olarak üretilen Mg-8Li-2Al alaşımının mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, ağırlıkça %8 Li içerdiği için mikroyapının genel olarak  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarından oluştuğu görülmektedir. Literatür incelendiğinde, optik mikroskop mikroyapılarında koyu renkli bölgelerin  $\beta$ -Li fazını temsil ettiği görülmektedir. Açık renkli alanlar ise  $\alpha$ -Mg fazları olarak tanımlanmıştır (Fu ve ark., 2018; X. Xiong ve ark., 2019; X. M. Xiong ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2018). XRD analiz sonuçları da, mikroyapının  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve intermetalik fazlardan oluştuğunu desteklemektedir.

Alaşımarda bileşenler arasında oluşan intermetaliklerin oluşumu, alaşım elementlerinin elektronegatiflik farklılıkları ve kimyasal reaksiyon aktivitesi karşılaştırılarak tahmin edilebilir (Li ve ark., 2012; Ma ve ark., 2018; X. Xiong ve ark., 2019). Elementlerin elektronegativite değerleri Tablo 6.1'te listelenmiştir.

**Tablo 6.1.** Çalışmada kullanılan elementlerin elektronegativite değerleri.

Element	Elektronegativite
Mg	1,31
Li	0,98
Al	1,61
Sn	1,96
Nd	1,12
Ca	1,1

Tablo 6.1'e göre elektronegativite farkı fazla olan elementlerin oluşturacağı bileşiğin oluşma ihtimali daha yüksektir. Mg-8Li-2Al alaşımında Mg ile Li elementi arasında elektronegativite farkı 0,33 iken, Al ile Li elementi arasındaki fark 0,63'tür. Bu nedenle Mg-8Li-2Al alaşımında Al ve Li elementlerinin bir araya gelerek yeni bir AlLi intermetalliğini oluşturma ihtimali yüksektir. Şekil 5.8 EDS analiz (Pozisyon 1, 2 ve 3) sonucunda, Al-Li ikili faz diyagramında ve XRD analiz sonuçlarında görülmekte olan intermetaliklerin AlLi olduğu elektronegativite değerleri ile doğrulanmıştır.

Homayun ve Afshar, (2014) yaptıkları çalışma incelendiğinde, ağırlıkça %3'e kadar olan Al elementi ilavelerinde mikroyapıya iyi yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Ancak daha fazla miktarda Al elementi ilavelerinde mikroyapıda istenmeyen kırılmalı ve iri intermetaliklerin ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) oluşabileceği rapor edilmiştir. Alaşıma ilave edilmiş olan ağırlıkça %2 Al ve %8 Li elementi sayesinde istenmeyen kırılmalı ve iri intermetaliklerin oluşumu engellenmiş ve bu kırılmalı ve iri intermetaliklerin yerine mikroyapıya iyi yönde etki eden küçük tane boyutlu AlLi intermetalikleri oluşmuştur.

İkinci alaşım olarak üretilen ağırlıkça %1,5Sn ilaveli Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının mikroyapıları ve XRD analiz sonuçları incelendiğinde, yapının  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının yanı sıra AlLi ve  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinden oluştuğu görülmektedir. Tablo 6.1'deki Li, Al ve Sn elementlerinin elektronegativite değerleri incelendiğinde, Li ve Sn'nin elektronegativite değerinin diğerlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat reaksiyon aktiviteleri göz önüne alındığında Al elementi Sn elementine göre daha reaktiftir. Bu nedenle Al ve Li elementlerinin bileşik oluşturma ihtimali yüksektir. Bununla beraber elektronegativite farkından dolayı Mg ve Sn elementlerinden  $Mg_2Sn$  intermetalikleri oluşmuştur. Mg-8Li-2Al alaşımı ile Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının mikroyapıları karşılaştırıldığında, AlLi ve  $Mg_2Sn$  intermetalikleri mikroyapıda  $\alpha$ -Mg fazlarının boyutlarında küçülmeye neden olarak mikroyapıya iyi yönde etki etmiştir. Bu etki literatürde şu şekilde açıklanmıştır; katılaşma esnasında ilk olarak sıvı fazdan intermetalik fazlar çökelir ve sıcaklık likidüs sıcaklığından daha düşük olduğunda, intermetalik fazlar katı-sıvı ara yüzeyinde toplanır ve bu da yapısal aşırı soğumaya yol açar. Arayüzeydeki çekirdeklenme oranı artar ve  $\alpha$ -Mg fazının sınırında oluşan AlLi ve  $Mg_2Sn$  fazları,  $\alpha$ -Mg tanelerinin büyümesini engeller (Ma ve ark., 2018).

Üretilen üçüncü alaşım olan Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, yapının  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarından ve intermetalik fazlardan oluştuğu görülmektedir. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının XRD sonuçları incelendiğinde yapıda oluşan intermetalik fazların  $Al_2Nd$  ve  $Al_{11}Nd_3$  olduğu anlaşılmıştır. Tablo 6.1 incelendiğinde, Nd ve Al arasındaki elektronegatiflik farkı, Al ve Mg arasındaki farktan daha büyüktür. Bu nedenle Mg-8Li-2Al alaşımına Nd ilavesi ile  $Al_2Nd$  ve  $Al_{11}Nd_3$  fazları oluşmuştur. Bu yapılar, EDS sonuçları ile doğrulanmıştır (Şekil 5.15. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri). Şekil 5.15. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizlerinden Al'nın Nd'ye



atomik oranı yaklaşık 2/1 ve 11/3 olarak hesaplanmıştır. Böylece Şekil 5.14'deki 1 ve 2 noktalarının sırasıyla  $Al_2Nd$  ve  $Al_{11}Nd_3$  olduğu görülmektedir.

Tiancai Xu ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0.5 ~ 3 Nd elementi içeren LA93 alaşımı üzerinde çalışılmış ve alaşıma Nd ilavesi sonucunda blok şeklinde  $Al_2Nd$  ve çubuk formda  $Al_{11}Nd_3$  intermetaliklerinin tespit edildiğini bildirmişlerdir. Benzer  $Al_2Nd$  ve çubuk formda  $Al_{11}Nd_3$  fazları Şekil 5.14.d ve Şekil 5.15'de görülmektedir. Ayrıca Mishra ve ark. (2017) yüksek Nd konsantrasyonu nedeniyle peritektik reaksiyon hızının arttığını bildirmişlerdir. Bu durumda  $Al_2Nd$  fazı oluşmuştur. Araştırmacılar, proötektik  $Al_2Nd$  ile sıvı Al arasında peritektik reaksiyon meydana geldiğinde, alaşımda  $Al_{11}Nd_3$  fazının oluştuğunu bildirmişlerdir. Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında oluşan çubuk formda  $Al_{11}Nd_3$  intermetalikleri yaklaşık 10-15  $\mu m$  uzunluğuna ve 1  $\mu m$  kalınlığa sahipken,  $Al_2Nd$  intermetalikleri ise yaklaşık 1-3  $\mu m$  uzunluğuna ve 1  $\mu m$  kalınlığa sahiptir.  $Al_{11}Nd_3$  fazı, hem  $\alpha$ -Mg hem de  $\beta$  fazlarında da mevcuttur. Mg-8Li-2Al alaşımındaki  $\alpha$ -Mg ile karşılaştırıldığında,  $\alpha$ -Mg boyutu Nd ilavesiyle küçülmüştür. Ancak,  $\beta$ -Li fazları daha kaba hale gelmiştir.

Şekil 5.19'daki Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının SEM mikroyapısı ve EDS analizleri ve XRD sonuçlarına göre alaşımının  $\beta$ -Li,  $\alpha$ -Mg ve  $Al_2Ca$  (yaklaşık 8-12  $\mu m$  uzunluğunda ve 1-2  $\mu m$  kalınlığında) fazlarından oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.19 incelendiğinde Al/Ca at. oranının yaklaşık 2/1 olduğu görülmektedir. Bununla beraber Ca ve Al arasındaki elektronegatiflik farkının Al ve Mg arasındaki farktan daha büyük olması  $Al_2Ca$  oluşumunun daha kolay olacağını göstermektedir.  $Al_2Ca$  fazları hem  $\alpha$ -Mg hem de  $\beta$ -Li fazlarında oluşmuştur.  $Al_2Ca$  fazları,  $\alpha$ -Mg fazları için heterojen bir çekirdeklenme bölgesi olarak hareket ettikleri için Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımı için etkili tane incelticilerdir (Y. Zeng ve ark., 2013). Benzer şekilde, bu çalışmada yapıdaki  $Al_2Ca$  partiküllerinin varlığından dolayı  $\alpha$ -Mg boyutu küçülmüştür. Ca ilavesi ile  $\alpha$ -Mg boyutu, Mg-8Li-2Al alaşımındaki  $\alpha$ -Mg boyutundan daha küçük hale gelmiştir. Ancak, Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında olduğu gibi,  $\beta$ -Li fazı Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımında daha kaba hale gelmiştir.

Mg-8Li-2Al ve Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımları ile kıyaslandığında Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarındaki  $\alpha$ -Mg miktarı büyük oranda azalmış ve  $\beta$ -Li miktarı artmıştır. Wu ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada benzer artan ve azalan sonuçlar elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlardan,  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li miktarlarındaki

değişimin, ilave edilen alaşım elementlerine ve sonrasında oluşan intermetaliklere bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6.2. Mekanik Deney Sonuçlarının Tartışılması

Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının sertlik deneyi sonuçları ile çekme ve basma deney sonuçları Bölüm 6.2.1 ve Bölüm 6.2.2’de karşılaştırılarak tartışılmıştır.

### 6.2.1. Sertlik deney sonuçlarının tartışılması

Sertlik deneyi yapılan alaşımların sertlik değerleri Şekil 5.22’de verilmiştir. Mg-8Li-2Al alaşımın sertlik değeri 52 HB olarak ölçülmüştür. Mg-8Li-2Al ile Sn, Nd ve Ca alaşım elementi ilaveli alaşımlar karşılaştırıldığında, alaşım elementi ilavesi sonrası tüm alaşımların sertlik değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımı Mg-8Li-2Al alaşımı ile karşılaştırıldığında,  $\alpha$ -Mg tanelerinin küçülmesi ile birlikte artan tane sınırlarının yanı sıra yapıda oluşan  $Al_2Nd$  ve  $Al_{11}Nd_3$  intermetaliklerin etkisi ile Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının sertlik değerlerinde artış sağlanmıştır.

Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımında, Ca ilavesi sayesinde küçülen  $\alpha$ -Mg taneleri ve yapıda oluşan  $Al_2Ca$  intermetaliklerinin etkisi ile alaşımın sertlik değerlerinde artış sağlanmıştır.

Tüm üretilen alaşımların sertlik değerleri karşılaştırıldığında ise, ağırlık %1,5Sn ilaveli Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı en yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.22’de verilen Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının hem  $\alpha$ -Mg hem de  $\beta$ -Li fazlarının Vickers mikrosertlik değerleri diğer alaşımlardan yüksek hesaplanmıştır. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında oluşan AlLi ve özellikle yüksek sertliğe sahip  $Mg_2Sn$  (Ma ve ark., 2018) intermetaliklerinin de alaşımın sertliğini yükseltmekte etkili olduğu düşünülmektedir.

Üretilen alaşımların sertlik değerlerindeki artışların, alaşım elementi ilavesi sonucu yapıda oluşan AlLi,  $Mg_2Sn$ ,  $Al_2Nd$ ,  $Al_{11}Nd_3$  ve  $Al_2Ca$  intermetaliklerinden ve mikroyapıdaki tane küçülmesinden kaynaklanmaktadır. Tane küçülmesi sonucu tane sınırı miktarı arttıkça alaşımın deformasyona karşı direnç yeteneği de artmaktadır (A.

Luo ve Pekguleryuz, 1994). Fei ve ark. (2015) yaptıkları çalışma incelendiğinde, alaşım sertliklerinin bu iki faktör tarafından artırıldığı rapor edilmiştir.

### 6.2.2. Çekme ve basma deney sonuçlarının tartışılması

Bölüm 5'te üretilen alaşımların  $\alpha+\beta$  (HSP+HMK) dubleks faz yapısına sahip olduğu gösterilmişti. Hsp yapısı nedeniyle daha az kayma sistemine sahip  $\alpha$ -Mg fazı yüksek mukavemet değerine sahipken, hmk yapısı nedeniyle daha fazla kayma sistemine sahip  $\beta$ -Li fazı daha yüksek deformasyon kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle, iki fazlı bu alaşımlar  $\alpha/\beta$  tek fazlı alaşımlardan daha iyi mekanik özellikler göstermektedir.  $\alpha$ -Mg fazından daha yumuşak olan  $\beta$ -Li fazının deforme olması çok daha kolaydır, ancak daha sert  $\alpha$ -Mg fazı artan uygulanan kuvveti absorbe edemediğinde kayar, böylece dubleks fazların plastik olarak uyumlu deformasyonunu sağlamış olur ve sonuçta iyi mekanik özelliklerde bir alaşım ortaya çıkar (Zou ve ark., 2018).

Tablo 5.3'te üretilen Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının çekme ve basma deneylerinin sonuçları görülmektedir. Mg-8Li-2Al alaşımının akma mukavemeti değeri 74 MPa, çekme mukavemeti değeri 115 MPa ve uzama değeri %12,8 olarak ölçülmüştür. Basma ve birim şekil değişimi değerleri ise sırasıyla 244 MPa ve %27 olarak ölçülmüştür. Üretilen alaşımlar karşılaştırıldığında, Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı, diğer deneysel alaşımlara göre çekme ve basma deneylerinde daha iyi sonuçlar göstermiştir. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı ile Mg-8Li-2Al alaşımı karşılaştırıldığında, çekme mukavemetinin %18,3, basma mukavemetinin ise %34 daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca'dan daha yüksek olan uzama değeri %10,4 olarak ölçülmüştür. Benzer sonuçlar L. Ma ve ark. (2018) tarafından rapor edilmiştir.

İntermetalikler deformasyon sırasında dislokasyonlara karşı etkili bariyerler olarak mukavemeti artırmaya yardımcı olurlar. Tablo 5.3'te görüldüğü gibi, Mg-8Li-2Al alaşımına Sn, Nd ve Ca'nın ayrı ayrı eklenmesiyle çekme ve akma mukavemetleri artmıştır. Bu artış, Hall-Petch ilişkisine ve Orowan güçlendirme etkisine göre tane küçülmesine, intermetalik bileşiklerin oluşumuna ve katı eriyik güçlendirmesine bağlanabilir. Alaşımında oluşan Mg<sub>2</sub>Sn, Al<sub>2</sub>Nd, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca, yüksek bir sertliğe ve erime noktasına sahiptir. Bu intermetalik bileşikler alaşımında farklı yerlerde konumlanarak, dislokasyon hareketini engellemiş ve alaşımı güçlendirmiştir (Jiang ve

ark., 2013; Liu ve ark., 2008; A. Luo ve Pekguleryuz, 1994). Ancak tane sınırlarında toplanan intermetalik parçacıklar kırılğan bir faz oluşturur. Bir alaşımın mekanik özellikleri, ikincil faz boyutu, şekli, miktarı ve dağılımından da etkilenebilir (D. K. Xu ve ark., 2006). Daha önce yapılan bir araştırmaya göre (Park ve ark., 2015), alaşımdaki büyük partiküller malzemenin mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir ve alaşımın mukavemeti, küçük ikinci faz partiküllerinin eklenmesiyle geliştirilebilir. Bu nedenle, intermetalik parçacıkların morfolojisi ve boyutu, bir alaşımın mekanik özellikleri üzerinde çok etkilidir. Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının (Şekil 5.14.c, 5.14.d ve 5.18.c, 5.18.d) SEM mikroyapıları, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca fazlarının çok daha büyük boyut ve yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir, bu da mekanik özellikleri kötü yönde etkileyebilir. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımındaki Mg<sub>2</sub>Sn ve AlLi fazları Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca'ya göre yapı içinde çok daha küçük ve daha homojen bir şekilde dağılmıştır. Bu nedenle Mg<sub>2</sub>Sn ve AlLi fazları alaşımın mekanik özelliklerini daha iyi yönde etkilemiştir.

$\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarında çözünen Al elementi, katı eriyik güçlendirmesi etkisi ile alaşımda mukavemet artışı sağlamaktadır (Zou ve ark., 2018). Şekil 5.8 ve Şekil 5.11'e göre, Mg-8Li-2Al ve Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında, AlLi parçacıkları  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li faz sınırında yer almaktadır. Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımında  $\beta$ -Li fazındaki Al miktarının azalmış ve Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>Nd ve Al<sub>2</sub>Ca oluşumu nedeniyle AlLi parçacıklarının kaybolmuştur. Al<sub>2</sub>Nd, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca oluşmaya başladığında,  $\beta$ -Li fazlarında çözünen Al'ın bir kısmını tüketilir. Bu nedenle, Al'in katı eriyik güçlendirici etkisi azalır.  $\beta$ -Li fazlarında azalan Al miktarı Şekil 5.15 ve 5.19'da görülebilir. Mg<sub>2</sub>Sn'nin oluşumuyla Şekil 5.11'de 3 numaralı pozisyonlarında görüldüğü gibi, Al miktarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Bunun ışığında Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının hem Mg<sub>2</sub>Sn fazının hem de Al elementinin katı eriyik güçlendirici etkisinin etkisiyle diğer alaşımlara göre mukavemeti daha fazla artış göstermiştir.

Şekil 5.21'e göre, Mg-8Li-2Al alaşımına alaşım elementlerinin eklenmesiyle, alaşımların  $\alpha$ -Mg fazının alan fraksiyonu azalmış ve intermetalik bileşiklerin alan fraksiyonu artmıştır. Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı ile karşılaştırıldığında,  $\alpha$ -Mg fazının alan fraksiyonununun %40'a (Mg-8Li-2Al-1,5Nd) ve %36'ya (Mg-8Li-2Al-1,5Ca) düşmesi, çekme mukavemeti ve akma mukavemetinde daha az artışa neden olmuştur. Benzer şekilde, önceki araştırmalar, alaşımda  $\alpha$ -Mg fazının hacim fraksiyonu

azalmasının, çekme mukavemetinde ve akma mukavemetinde azalmaya neden olduğunu bildirmiştir (X. Xiong ve ark., 2019).

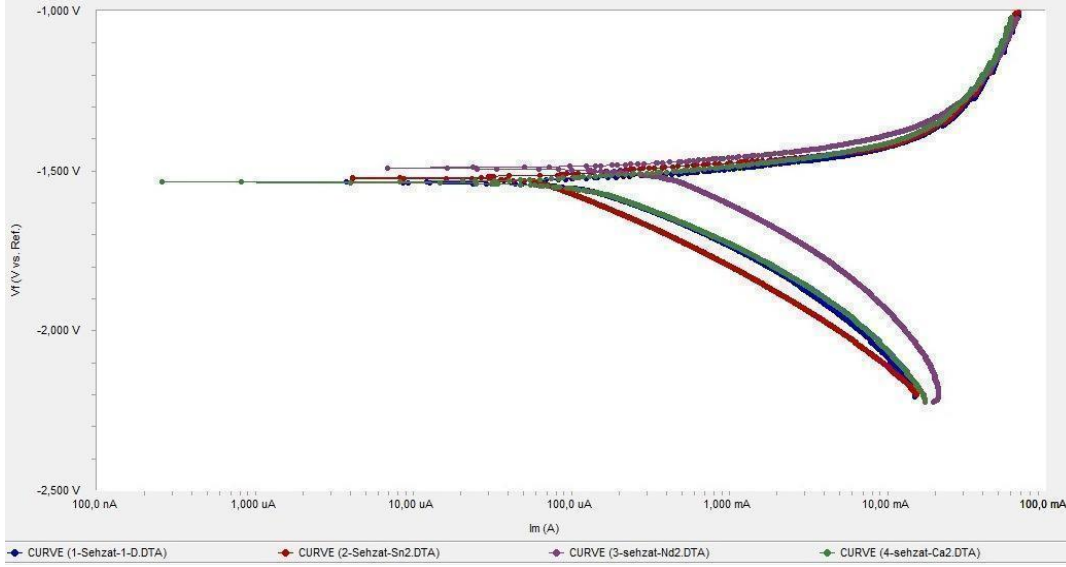
Üretilen alaşımların çekme deneyi sonuçlarına göre, mukavemet artışı için etkili mekanizmalar;

- Al'nin katı eriyik güçlendirici etkisi,
- alaşım elementlerinin (Sn, Nd ve Ca) mikroyapı üzerindeki iyileştirme etkisi
- $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve intermetalik fazların boyut, şekil, miktar ve dağılım değişiklikleri nedeniyle alaşımın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi şeklinde açıklanabilir.

Çekme deneyi sonuçlarına göre Mg-8Li-2Al-1,5Sn ve Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarının uzama değerleri Mg-8Li-2Al alaşımının uzama değerine yakındır. Çekme deneyi sonrası elde edilen kırık yüzey SEM fotoğraflarında da benzer sonuçlara rastlanmıştır. Mg-8Li-2Al-1,5Sn ve Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımlarının kırık yüzey görüntüleri Mg-8Li-2Al alaşımına benzer iken Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının kırık yüzey fotoğrafı daha düz ve pürüzsüz bir görünüme sahiptir. Gevrek Al<sub>2</sub>Ca fazları, diğer intermetalik bileşiklerin (Mg<sub>2</sub>Sn, Al<sub>2</sub>Nd, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub>) aksine, çoğunlukla  $\alpha$ -Mg/ $\beta$ -Li tane sınırlarında ve  $\beta$ -Li fazı içinde toplanmıştır. Bu nedenle, gevrek Al<sub>2</sub>Ca fazları, dış kuvvet altında çatlak başlama yerleri olarak davranmış ve süneklikte bir azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde, önceki araştırmalar, alaşımdaki büyük Al<sub>2</sub>Ca fazlarının daha kötü mekanik özelliklerle neden olduğunu göstermiştir (X. Xiong ve ark., 2019).

### **6.3. Korozyon Deney Sonuçlarının Tartışılması**

Tablo 5.4'de potansiyodinamik korozyon eğrilerinden elde edilen deney sonuçlarının sayısal verileri verilmiştir. Şekil 6.1'de ise üretilen alaşımların potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrası elde edilen tafel eğrilerinin karşılaştırılması görülmektedir.



**Şekil 6.1.** Mg-8Li-2Al, Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması.

Nd ilavesi Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında CorrRate ve icorr değerlerini artırarak, alaşımın korozyon özelliklerini kötü yönde etkilemiştir. Mg-8Li-2Al alaşımı ile karşılaştırıldığında Ca içerikli Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Sn ilavesi ile alaşımın korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) azalmış ve korozyon direnci önemli derecede artmıştır. Bu nedenle, Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı, üretilen alaşımlar arasında en iyi korozyon direncine sahiptir.

Morishige ve ark. (2013) yaptığı çalışmada, Mg-Li dubleks yapıli alaşımlar için Mg fazının korozyon potansiyeli -1,75 VSCE ve  $\beta$ -Li fazı -2,38 VSCE olduğunu ve Volta potansiyellerindeki farklılık nedeniyle,  $\alpha$ -Mg fazının korozyon direnci  $\beta$ -Li fazından daha iyi olduğunu ve  $\beta$ -Li fazlarında korozyonun daha şiddetli olduğunu rapor etmişlerdir (R. C. Zeng ve ark., 2014). Ayrıca metaller arası fazlar ve  $\alpha$ -Mg+ $\beta$ -Li matrisi karşılaştırıldığında, intermetalik fazlar kimyasal olarak daha kararlıdır (X. Xiong ve ark., 2019).

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi numunelerin korozyon süreci üç aşamada açıklanabilir; Aşama I’de, matristeki intermetalik parçacıklar ve  $\beta$ -Li fazları arasında mikro-galvanik eşleşmeler meydana gelir ve numune yüzeyinde korozyon ile devam eder.

Aşama II’de, Şekil 6.2’de gösterildiği gibi, intermetalik partiküller içeren  $\beta$ -Li fazı korozyona uğrar ve çözünür, bu da korozyon çukurlarının oluşmasına neden olur.

Aşama III'te ise, II. aşamaya benzer şekilde, intermetalik partiküller içeren  $\alpha$ -Mg fazı çözünür ve korozyon çukurları oluşur, bu da intermetaliklerin ayrılmasına neden olur.

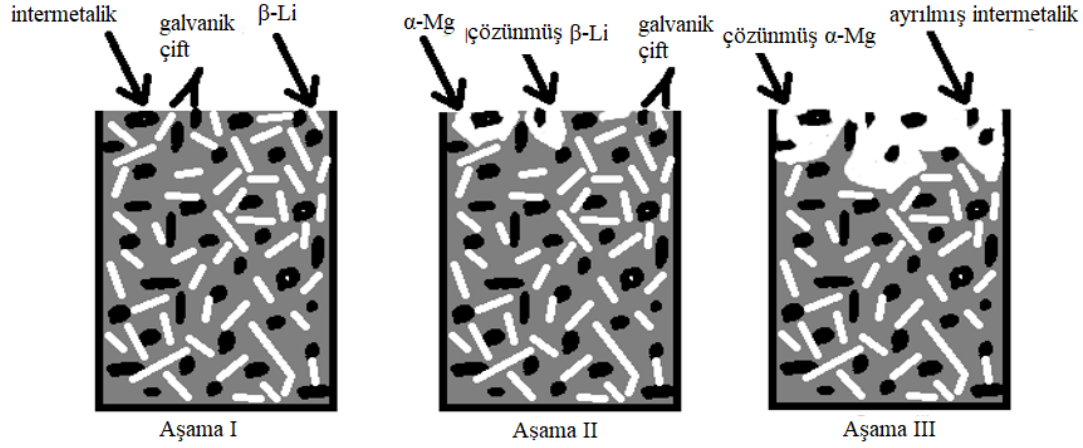
Araştırmalar, tanelerin incelmelerini sağlayan alaşım elementlerinin eklenmesinin tane sınırlarını artırdığını rapor etmişlerdir (X. Xiong ve ark., 2019). Bu çalışmada da Sn ilavesi ile  $\beta$ -Li fazı daha küçük hale gelmiş ve küçük boyutta  $Mg_2Sn$  fazları oluşmuştur. Benzer şekilde, önceki araştırmalar, küçük partikül boyutunun, fiziksel bir korozyon bariyeri görevi görmesi nedeniyle korozyon direncini artırdığını bildirmektedir (Jeong ve Kim, 2014).

Şekil 6.2, Aşama I'de açıklandığı gibi, ilk mikro-galvanik korozyon  $\beta$ -Li matrisi ile intermetalik parçacıklar arasında meydana gelmiştir.  $\beta$ -Li matrisi ve intermetalik parçacıklar arasındaki azalan sınırlar, daha büyük bir korozyon alanı ve alaşımın daha düşük korozyon direnci ile sonuçlanmıştır. Şekil 5.14.d'ye göre  $Al_{11}Nd_3$  ve  $\beta$ -Li fazlarının boyutlarının diğer numunelere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle Şekil 6.2 Aşama I'deki korozyon işleminin Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında gerçekleştiği düşünülmektedir.

Şekil 5.28.a ve 5.28.d'de, Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımının aşınmış (korozyona uğramış) yüzeyi, Mg-8Li-2Al alaşımınıninkine neredeyse benzerdir.  $\beta$ -Li fazlarının boyutunu arttırdığı için Ca ilavesinin alaşımın korozyon direnci üzerinde neredeyse hiçbir etkisi olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca Mg-8Li-2Al alaşımına ilave edilen Sn elementi sonrası artan tane sınırları ve yapıda oluşan küçük boyutlu  $Mg_2Sn$  intermetaliklerinin fiziksel bir korozyon bariyeri oluştuğu ve korozyon direncinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Magnezyum alaşımlarının korozyon direnci bir dereceye kadar  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve ikincil fazlarının boyutlarına ve sürekli/sürekli oluşlarına bağlıdır (Jeong ve Kim, 2014; Y. L. Song ve ark., 2007). Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımının mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde,  $\alpha$ -Mg taneleri etrafında sürekli bir şekilde yer alan  $\beta$ -Li fazları görülmektedir. Aynı zamanda, hem  $\alpha$ -Mg hem de  $\beta$ -Li fazları üzerinde oluşmuş  $Al_2Nd$  ve özellikle korozyon davranışını kötü yönde etkileyen büyük boyutlu  $Al_{11}Nd_3$  fazları yer almaktadır. Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımında ise daha küçük boyutta  $\alpha$ -Mg fazları bulunmasına karşın Nd ilaveli alaşıma benzer şekilde sürekli bir formda yer alan  $\beta$ -Li fazları görünmektedir. Üretilen alaşımlar arasında en iyi korozyon davranışına sahip olan Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımının mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, Mg-8Li-2Al

alaşımına kıyasla, daha küçük boyutta  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve  $Mg_2Sn$  fazları görülmektedir. Ayrıca hem  $\beta$ -Li hem de  $Mg_2Sn$  fazları süreksiz formdadır. Özetle, mikro yapıdaki değişiklik söz konusu olduğunda, Sn ilavesi,  $\beta$ -Li ve  $Mg_2Sn$  fazının boyutunu ve fraksiyonunu azaltarak alaşımın korozyon direncini iyileştirebilir.



Şekil 6.2. Mg-Li alaşımlarının korozyonu sürecinin temsili çizimi.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kokil kalıba döküm yöntemi ile ilk olarak Mg-8Li-2Al alaşımı üretilmiş ve sonrasında Sn, Nd ve Ca alaşım elementleri ayrı ayrı her biri ağı. %1,5 oranında ilave edilerek üretilen Mg-8Li-2Al-1,5Sn, Mg-8Li-2Al-1,5Nd ve Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımlarının mikroyapıları, mekanik özellikleri ve korozyon davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Dupleks yapılı Mg-8Li-2Al alaşımı  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve AlLi olmak üzere toplam üç fazdan oluşmuştur. Sn, Nd ve Ca'nın Mg-8Li-2Al alaşımına ayrı ayrı eklenmesi, Mg<sub>2</sub>Sn, Al<sub>2</sub>Nd, Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> ve Al<sub>2</sub>Ca fazlarının oluşumuna neden olmuştur. Sn ilavesi sonrası yapıda oluşuma devam eden AlLi intermetaliklerine, Nd ve Ca ilaveli alaşımların mikroyapılarında rastlanmamıştır.
- Sn, Nd ve Ca'nın ayrı ayrı eklenmesi  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının biçim ve fraksiyonlarında değişikliğe sebep olmuştur. Sn ilavesi sonrası minimum  $\beta$ -Li ve intermetalik faz boyutları Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında ölçülmüştür. Nd ilavesi sonrası  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li boyutları küçülürken,  $\beta$ -Li fazının fraksiyonunda artış gözlenmiştir. Aynı zamanda büyük boyutlu Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub> intermetalikleri oluşmuştur. Ca ilavesi sonrasında  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li boyutları küçülürken,  $\beta$ -Li fazının fraksiyonunda artış gözlenmiştir. Ayrıca  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li ara faz yüzeyinde yer alan Mg<sub>2</sub>Sn intermetaliklerine kıyasla nispeten daha büyük boyutlu Al<sub>2</sub>Ca intermetalikleri oluşmuştur.
- Alaşımların korozyon özelliklerinin  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Li ve ikincil fazlarının boyutlarına ve sürekli/süreksiz oluşlarına göre değişiklik gösterdiği anlaşılmıştır. Üretilen alaşımların korozyon deneyleri sonrası sonuçlar değerlendirildiğinde, korozyon özellikleri bakımından en iyi sonuçlar ağı. %1,5Sn ilavesi sonrası yapıda oluşan Mg<sub>2</sub>Sn intermetaligi ve süreksiz formda oluşan  $\beta$ -Li fazları nedeniyle Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında elde edilmiştir. Ca ilaveli Mg-8Li-2Al-1,5Ca alaşımı korozyon özellikleri bakımından Mg-8Li-2Al alaşımı ile kıyaslandığında, kayda değer bir artış gözlenmemiştir. Nd

ilaveli Mg-8Li-2Al-1,5Nd alaşımında ise, yapıda oluşan iri ve uzun boyutlu  $Al_{11}Nd_3$  intermetaliklerinden ve sũrekli formdaki  $\beta$ -Li fazlarından dolayı korozyon hızı ve korozyon akım yoğunluğu artmıştır.

- Mekanik Ȗzellikler açısından ise, Mg-8Li-2Al alaşımına kıyasla Ȗretilen diğer alaşımların tũmũnde ilave edilen Sn, Nd ve Ca alaşım elementleri neticesinde sertlik değerleri artışı sağlanmıştır. En yũksek sertlik değerleri ise Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında Ȗlũlmũřtũr.
- Çekme deneyi sonuçlarına gȖre, en iyi uzama değeri Mg-8Li-2Al alaşımında elde edilirken, Sn, Nd ve Ca alaşım elementleri ilavesi sonrasında optimum çekme değerleri Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımında Ȗlũlmũřtũr. Alaşım elementlerinin ilavesi sonrasında  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarının kũũlmesine karşın, Nd ve Ca ilaveleri alaşımlarda  $\beta$ -Li faz miktarlarının artışına sebep olmuş ve çekme mukavemeti değerlerini artırmada Sn elementi kadar etkili olamamıştır.
- Ȗretilen alaşımların tũmũnũn kırılma yũzeyleri, gevrek kırılma tũrũnde gȖrũnmektedir. Mg-8Li-2Al alaşımına Sn ve Nd ilavesi alaşımın çekme uzamasında Ȗnemli bir azalmaya neden olmamış ve deformasyon kabiliyetinden Ȗdũn vermeden mukavemet artışı sağlanmıştır.  $Mg_2Sn$ ,  $Al_2Nd$  ve  $Al_{11}Nd_3$  gibi intermetalik bileşikler, çoğunlukla  $\alpha$ -Mg/ $\beta$ -Li tane sınırlarında toplanan kırılğan  $Al_2Ca$  fazlarının aksine  $\alpha$ -Mg ve  $\beta$ -Li fazlarında dağılmıştır. Bu nedenle Ca ilavesi alaşımının çekme uzaması değerini azaltmıştır. Aynı zamanda Nd ve Ca ilavesi sonrası yapıda oluşan  $Al_{11}Nd_3$  ve  $Al_2Ca$  intermetalikleri  $Mg_2Sn$  intermetaliklerine kıyasla nispeten daha bũyũk boyutlu ve yũksek fraksiyonda olduğundan kırılma için çatlak oluşumu ve ilerlemesine neden olduğu dũřũnũlmektedir. **Ȗzetle çalışmanın amaçlarından olan uzama değerlerinden fazla Ȗdũn vermeden mukavemeti artırılan alaşım Mg-8Li-2Al-1,5Sn alaşımı olmuştur.**

Mg-Li alaşımları dũřũk yoğunluğundan dolayı havacılık ve elektronik gibi alanlarda kullanılmaktadır. Mg-Li alaşımları iyi bir plastisiteye sahipken, dũřũk mukavemete ve zayıf korozyon direncine sahiptir. Alaşımın mukavemet değerlerini ve korozyon direncini artırmak için yũksek maliyetli RE elementleri de kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasından yola çıkılarak Mg-Li-Al alaşımlarında yũksek maliyetli alaşım elementleri yerine ergime derecesi dũřũk ve kolay elde edilebilen Sn gibi elementler

kullanılabilir. Böylece hem düşük maliyetli hem de yüksek mukavemet ve korozyon direncine sahip yeni alaşımların üretilmesi hedefine ulaşılabilir. Üretilen alaşımların mekanik işlem ya da ısıl işlemler sonucunda hem mekanik hem de korozyon özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Acikgoz, S., ve Kurnaz, S. C. (2022). The Effects of Individual Addition of Sn, Nd, and Ca on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of the Mg–Li–Al Alloy. *International Journal of Metalcasting, February*. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00869-8>
- Açıkgöz, Ş. (2009). *Mg-Al esaslı AM60 alaşımının üretimi ve özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi] Sakarya üniversitesi.
- ASM International. (1998). *ASM handbook volume 3: Alloy phase diagrams*. In ASM Handbook.
- Ben-Hamu, G., Eliezer, D., ve Shin, K. S. (2007). The role of Si and Ca on new wrought Mg-Zn-Mn based alloy. *Materials Science and Engineering A*, 447(1–2), 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.059>
- Cain, T. W., Glover, C. F., ve Scully, J. R. (2019). The corrosion of solid solution Mg-Sn binary alloys in NaCl solutions. *Electrochimica Acta*, 297, 564–575. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.118>
- Cain, T. W., ve Labukas, J. P. (2020). The development of  $\beta$  phase Mg–Li alloys for ultralight corrosion resistant applications. *Npj Materials Degradation*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-020-0121-2>
- Dimeski, D., ve Srebrenkoska, V. (2014). The role of contemporary ferrous and nonferrous materials in ballistic protection of military vehicles. *VI Th International Metallurgical Congress*, 1–4.
- Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P., ve Li, Y. (2014). Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: A review. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(14), 1912–1933. <https://doi.org/10.1039/c3tb21746a>
- Dziubińska, A., Gontarz, A., Dziubiński, M., ve Barszcz, M. (2016). The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 10(31).
- Elsayed, F. R., Sasaki, T. T., Mendis, C. L., Ohkubo, T., ve Hono, K. (2013). Compositional optimization of Mg-Sn-Al alloys for higher age hardening response. *Materials Science and Engineering A*, 566, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.041>
- Fei, P., Qu, Z., ve Wu, R. (2015). Microstructure and hardness of Mg-9Li-6Al-xLa (x=0, 2, 5) alloys during solid solution treatment. *Materials Science and Engineering A*, 625, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.014>
- Fu, X., Yang, Y., Hu, J., Su, J., Zhang, X., ve Peng, X. (2018). Microstructure and mechanical properties of as-cast and extruded Mg-8Li-1Al-0.5Sn alloy. *Materials Science and Engineering A*, 709(October 2017), 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.036>

- Gokhale, Amol & Prasad, N. & Basu, Biswajit. (2019). *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation*. The Springer Press. 10.1007/978-981-15-1263-6.
- Gray, Je., ve Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336(1–2), 88–113.
- Guo, F., Liu, L., Ma, Y., Jiang, L., Zhang, D., ve Pan, F. (2020). Mechanism of phase refinement and its effect on mechanical properties of a severely deformed dual-phase Mg–Li alloy during annealing. *Materials Science and Engineering A*, 772(December 2019), 138792. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138792>
- Gupta, M., ve Ling, S. N. M. (2011). *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. John Wiley & Sons.
- Homayun, B., ve Afshar, A. (2014). Microstructure, mechanical properties, corrosion behavior and cytotoxicity of Mg-Zn-Al-Ca alloys as biodegradable materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 607, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.04.059>
- Hort, N., Huang, Y. D., Leil, T. A., Rao, K. P., ve Kainer, K. U. (2011). Properties and processing of magnesium-tin-calcium alloys. *Kovove Materialy*, 49(3), 163–177. [https://doi.org/10.4149/km\\_2011\\_3\\_163](https://doi.org/10.4149/km_2011_3_163)
- Huang, Y. D., Hort, N., Leil, T. A., Kainer, K. U., ve Liu, Y. L. (2007). Effect of Microstructural Inhomogeneity on Creep Response of Mg-Sn Alloys. *Key Engineering Materials*, 345–346, 561–564. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.345-346.561>
- Imandoust, A., Barrett, C. D., Al-Samman, T., Inal, K. A., ve El Kadiri, H. (2017). A review on the effect of rare-earth elements on texture evolution during processing of magnesium alloys. *Journal of Materials Science*, 52(1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0371-0>
- Jeong, Y. S., ve Kim, W. J. (2014). Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of Mg-Ca alloys through microstructural refinement by indirect extrusion. *Corrosion Science*, 82, 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.01.041>
- Jiang, B., Zeng, Y., Zhang, M. X., Yin, H. M., Yang, Q. S., ve Pan, F. S. (2013). Effects of Sn on microstructure of as-cast and as-extruded Mg-9Li alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 23(4), 904–908. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62546-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62546-7)
- K.U. Kainer. (2003). Magnesium alloys and their applications. *Magnesium Proceedings of the 6th International Conference*, 13(3), 121–122. <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752784>
- Khademian, N., ve Peimaei, Y. (2021). Magnesium alloys and applications in automotive industry. *5th International Conference on Science and Development of Nanotechnology*, August.
- Khalilpour, H., Mahdi Miresmaeili, S., ve Baghani, A. (2016). The microstructure and impression creep behavior of cast Mg-4Sn-4Ca alloy. *Materials Science and Engineering A*, 652, 365–369. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.085>

- Kim, D. H., Lee, J. Y., Lim, H. K., Kyeong, J. S., Kim, W. T., ve Kim, D. H. (2008). The effect of microstructure evolution on the elevated temperature mechanical properties in Mg-Sn-Ca system. *Materials Transactions*, 49(10), 2405–2413. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MER2008140>
- King, J. F. (2006). Technology of magnesium and magnesium alloys. In HE Friedrich and BL Mordike(Ed.), *Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 219–233.
- Kleiner, S., Beffort, O., Wahlen, A., ve Uggowitz, P. J. (2002). Microstructure and mechanical properties of squeeze cast and semi-solid cast Mg-Al alloys. *Journal of Light Metals*, 2(4), 277–280. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(03\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00012-9)
- Król, M., Snopiński, P., Pagáč, M., Hajnyš, J., ve Petrů, J. (2020). Hot deformation treatment of grain-modified mg–li alloy. *Materials*, 13(20), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204557>
- Kulekci, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9–10), 851–865. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>
- Kumar, A., Kumar, S., ve Mukhopadhyay, N. K. (2018). Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(3), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.006>
- Kumar, N., & Agarwal, R. (2015). *Comparison of Microstructures and Properties of Ae42 Magnesium Alloy and Its Composites* [Doctoral Tezi]. National Institute of Technology, Rourkela, Indian.
- Kumar, Sameer, D., Sasanka, C. T., Ravindra, K., ve Suman, K. N. S. (2015). Magnesium and Its Alloys in Automotive Applications – A Review. *American Journal of Materials Science and Technology*, 4(1), 12–30. <https://doi.org/10.7726/ajmst.2015.1002>
- Kumar, V., Govind, Shekhar, R., Balasubramaniam, R., ve Balani, K. (2012). Microstructure evolution and texture development in thermomechanically processed Mg-Li-Al based alloys. *Materials Science and Engineering A*, 547, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.074>
- Li, M., Hao, H., Zhang, A., Song, Y., ve Zhang, X. (2012). Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al alloy. *Journal of Rare Earths*, 30(5), 492–496. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60078-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60078-7)
- Li, S., Yang, X., Hou, J., ve Du, W. (2020). A review on thermal conductivity of magnesium and its alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.08.002>
- Li, X., Cheng, C., Le, Q., Bao, L., Jin, P., Wang, P., Ren, L., Wang, H., Zhou, X., ve Hu, C. (2020). Investigation of Portevin–Le Chatelier effect in rolled  $\alpha$ -phase Mg-Li alloy during tensile and compressive deformation. In *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 52, pp. 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.022>
- Lim, S. C. V, Gupta, M., ve Lu, L. (2001). Processing, microstructure, and properties of Mg–SiC composites synthesised using fluxless casting process. *Materials Science and Technology*, 17(7), 823–832.



- Liu, B., Zhang, M., ve Wu, R. (2008). Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of as-cast LA141 alloys. *Materials Science and Engineering A*, 487(1–2), 347–351. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.073>
- Luo, A. A. (2013). Magnesium casting technology for structural applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(1), 2–22. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.002>
- Luo, A., ve Pekguleryuz, M. O. (1994). Cast magnesium alloys for elevated temperature applications. *Journal of Materials Science*, 29(20), 5259–5271. <https://doi.org/10.1007/BF01171534>
- Ma, L., Yang, Y., Wang, X., Fu, X., Hu, J., Shao, H., ve Peng, X. (2018). Microstructure and mechanical properties of Mg–6Li–xAl–0.8Sn alloys. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 34(17), 2078–2086. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1510071>
- MA, X. chun, JIN, S. yuan, WU, R. zhi, WANG, J. xiu, WANG, G. xiang, KRIT, B., ve BETSOFEN, S. (2021). Corrosion behavior of Mg–Li alloys: A review. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 31(11), 3228–3254. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65728-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65728-X)
- Mahmudi, R., Kabirian, F., ve Nematollahi, Z. (2011). Microstructural stability and high-temperature mechanical properties of AZ91 and AZ91+2RE magnesium alloys. *Materials and Design*, 32(5), 2583–2589. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.040>
- Mahmudi, R., ve Moendarbari, S. (2013). Effects of Sn additions on the microstructure and impression creep behavior of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 566, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.076>
- Mallick, P. K. (2012). Advanced materials for automotive applications: an overview. *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 5–27. <https://doi.org/10.1533/9780857095466.5>
- Marukawa, E., Tamai, M., Takahashi, Y., Hatakeyama, I., Sato, M., Higuchi, Y., Kakidachi, H., Taniguchi, H., Sakamoto, T., ve Honda, J. (2016). Comparison of magnesium alloys and poly-l-lactide screws as degradable implants in a canine fracture model. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 104(7), 1282–1289.
- Maurya, R., Mittal, D., ve Balani, K. (2020). Effect of heat-treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of Mg-Li-Al based alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4749–4762. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.101>
- Mesbah, M. B. (2020). Effects of Sn on microstructure and dynamic grain growth in a binary Mg-Ca alloy [Yüksek Lisans Tezi] Bangladeş Üniversitesi.
- Mishra, S., Chaubey, A., ve Mandal, A. (2017). Effect of Heat Treatment on the Microstructure of Mg-4Al-Nd Alloys. *Technologies*, 5(2), 23. <https://doi.org/10.3390/technologies5020023>
- Monteiro, W. A. (2014). The influence of alloy element on magnesium for electronic devices applications—a review. *Light Metal Alloys Applications*, 12, 229.

- Morishige, T., Doi, H., Goto, T., Nakamura, E., ve Takenaka, T. (2013). Exfoliation corrosion behavior of cold-rolled Mg-14 mass% Li-1 mass% Al alloy in NaCl solution. *Materials Transactions*, 54(9), 1863–1866. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MAW201301>
- Narayana, K. L. (2020). Development and characterization of stir casted AZ31 magnesium alloy -CaSiO<sub>3</sub> composites [Doktora Tezi] Koneru Lakshmaiah Education Foundation, India.
- Nene, S. S., Kashyap, B. P., Prabhu, N., Estrin, Y., ve Al-Samman, T. (2014). Microstructure refinement and its effect on specific strength and bio-corrosion resistance in ultralight Mg-4Li-1Ca (LC41) alloy by hot rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 501–506. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.151>
- Okamoto, H. (2007a). Al-La (Aluminum-Lanthanum). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 28(6), 581. <https://doi.org/10.1007/s11669-007-9178-7>
- Okamoto, H. (2007b). Mg-Nd. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 28(4), 405. <https://doi.org/10.1007/s11669-007-9117-7>
- Okamoto, H. (2013). La-Mg (Lanthanum-Magnesium). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 34(2), 161–162. <https://doi.org/10.1007/s11669-012-0166-1>
- Parande, G., ve Gupta, M. (2022). Machining of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced magnesium rare earth alloys using wire electrical discharge turning process. *Machining Science and Technology*, 26(2), 160–182.
- Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Viejo, F., Arrabal, R., ve Feliú, S. (2008). Influence of microstructure and composition on the corrosion behaviour of Mg/Al alloys in chloride media. *Electrochimica Acta*, 53(27), 7890–7902. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.06.001>
- Parfenov, E. V., Kulyasova, O. B., Mukaeva, V. R., Mingo, B., Farrakhov, R. G., Cherneikina, Y. V., Yerokhin, A., Zheng, Y. F., ve Valiev, R. Z. (2020). Influence of ultra-fine grain structure on corrosion behaviour of biodegradable Mg-1Ca alloy. *Corrosion Science*, 163(May 2019). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108303>
- Park, S. H., Jung, J. G., Yoon, J., ve You, B. S. (2015). Influence of Sn addition on the microstructure and mechanical properties of extruded Mg-8Al-2Zn alloy. *Materials Science and Engineering A*, 626, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.039>
- Peng, X., Liu, W., Wu, G., Ji, H., ve Ding, W. (2022). Plastic deformation and heat treatment of Mg-Li alloys: a review. *Journal of Materials Science and Technology*, 99, 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.04.072>
- Polmear, I. J. (2012). Magnesium alloys and applications. *Materials Science and Technology*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.1179/026708394790163401>
- Powell, B. R., Krajewski, P. E., ve Luo, A. A. (2021). Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. LTD. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818712-8.00004-5>
- Qu, Z., Wu, R., Zhan, H., ve Zhang, M. (2012). The solution and room temperature aging behavior of Mg-9Li-xAl(x = 3, 6) alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 536, 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.05.021>

- Song, G. (2005). Recent progress in corrosion and protection of magnesium alloys. *Advanced Engineering Materials*, 7(7), 563–586.
- Song, G. S., ve Kral, M. V. (2005). Characterization of cast Mg-Li-Ca alloys. *Materials Characterization*, 54(4–5), 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.12.001>
- Song, J., She, J., Chen, D., ve Pan, F. (2020). Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.003>
- Song, Y. L., Liu, Y. H., Yu, S. R., Zhu, X. Y., ve Wang, S. H. (2007). Effect of neodymium on microstructure and corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Materials Science*, 42(12), 4435–4440. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0661-z>
- Tammann G. M., ve Masing G. (1960). 10. Behavior of Lithium, toward Sodium, Potassium, Yin, Cadmium and Magnesium. *Zeitschrift Fur Anorganische and Allgemeine Chemie*, 67, 197–198.
- Tekumalla, S., Seetharaman, S., Almajid, A., ve Gupta, M. (2014). Mechanical properties of magnesium-rare earth alloy systems: A review. *In Metals*, Vol. 5, Issue 1. <https://doi.org/10.3390/met5010001>
- Thakur, S. K., Kwee, G. T., ve Gupta, M. (2007). Development and characterization of magnesium composites containing nano-sized silicon carbide and carbon nanotubes as hybrid reinforcements. *Journal of Materials Science*, 42(24), 10040–10046.
- Thakur, S. K., Srivatsan, T. S., ve Gupta, M. (2007). Synthesis and mechanical behavior of carbon nanotube–magnesium composites hybridized with nanoparticles of alumina. *Materials Science and Engineering: A*, 466(1–2), 32–37.
- The esa impress team. (2015). Al-Ca faz diyagramı. [http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Glossary/Glossary\\_I.html](http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Glossary/Glossary_I.html) adresinden 5 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- Thomas, E. L. (2012). *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*. National Academies Press. <https://doi.org/10.1002/9781118217498.ch13>
- Todeschini, L. (2021). *Can surface modification enhance the mechanical properties through microstructural changes of magnesium alloys?* [Yüksek Lisans Tezi] Universitat Politècnica de Catalunya.
- Vadiraj, A., Abraham, M., ve Bharadwaj, A. S. (2019). Trends in automotive light weighting. In *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* (pp. 89–102). Springer.
- Villafuerte, J., ve Zheng, W. (2007). Corrosion protection of magnesium alloys by cold spray. *Advanced Materials and Processes*, 165(9), 53–54.
- Villegas-Armenta, L. A., Drew, R. A. L., ve Pekguleryuz, M. O. (2020). The Ignition Behavior of Mg–Ca Binary Alloys: The Role of Heating Rate. *Oxidation of Metals*, 93(5), 545–558. <https://doi.org/10.1007/s11085-020-09970-x>

- Viswanadhapalli, B., ve Bupesh Raja, V. K. (2019). Application of Magnesium Alloys in Automotive Industry-A Review. *International Conference on Emerging Current Trends in Computing and Expert Technology*, 519–531.
- Walker, J., Shadanbaz, S., Woodfield, T. B. F., Staiger, M. P., ve Dias, G. J. (2014). Magnesium biomaterials for orthopedic application: A review from a biological perspective. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 102(6), 1316–1331. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33113>
- Wang, Q., Chen, Y., Xiao, S., Zhang, X., Tang, Y., Wei, S., ve Zhao, Y. (2010). Study on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Sn-Nd alloys. *Journal of Rare Earths*, 28(5), 790–793. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(09\)60202-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(09)60202-7)
- Wei, G. B., Peng, X. D., Zhang, B., Hadadzadeh, A., Xu, T. C., ve Xie, W. D. (2015). Influence of I-phase and W-phase on microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-3Zn alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(3), 713–720. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63656-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63656-1)
- Wei, L. Y., ve Dunlop, G. L. (1996). The solidification behaviour of Mg-Al-rare earth alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 232(1–2), 264–268. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01897-2](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01897-2)
- Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C. J., ve Windhagen, H. (2005). In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response. *Biomaterials*, 26(17), 3557–3563. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.09.049>
- Wong, H. M., Yeung, K. W. K., Lam, K. O., Tam, V., Chu, P. K., Luk, K. D. K., ve Cheung, K. M. C. (2010). A biodegradable polymer-based coating to control the performance of magnesium alloy orthopaedic implants. *Biomaterials*, 31(8), 2084–2096. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.111>
- Wu, R. Z., Qu, Z. K., ve Zhang, M. L. (2012). Influences of alloying elements on the microstructure and properties of Mg-Li alloys. *Zhuzao/Foundry*, 61(3), 275–279.
- Xiong, X. M., Yang, Y., Ma, L. N., Li, M. L., Ren, F. J., Hu, J. W., Wei, G. B., ve Peng, X. D. (2019). Microstructure and mechanical properties of Mg–8Li–xAl–0.5Ca alloys. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 35(1), 26–36. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1533153>
- Xiong, X., Yang, Y., Deng, H., ve Li, M. (2019). Effect of Ca Content on the Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of Extruded Mg–7Li–3Al Alloys. *Metal*, 9(1212). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/met9111212>
- Xu, D. K., Liu, L., Xu, Y. B., ve Han, E. H. (2006). The influence of element Y on the mechanical properties of the as-extruded Mg-Zn-Y-Zr alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 426(1–2), 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.02.035>
- Xu, T., Shen, X., Li, B., Peng, X., Liu, Q., Wei, G., Liu, G., ve Ma, Z. (2019). Effect of Nd on microstructure and mechanical properties of dual-phase Mg-9Li-3Al alloys. *Materials Research Express*, 6(7), 76548.
- Yang, Y., Xiong, X., Chen, J., Peng, X., Chen, D., ve Pan, F. (2021). Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(3), 705–747. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.04.001>

- Zeng, R. C., Sun, L., Zheng, Y. F., Cui, H. Z., ve Han, E. H. (2014). Corrosion and characterisation of dual phase Mg-Li-Ca alloy in Hank's solution: The influence of microstructural features. *Corrosion Science*, 79, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.028>
- Zeng, R., Dietzel, W., Witte, F., Hort, N., ve Blawert, C. (2008). Progress and challenge for magnesium alloys as biomaterials. *Advanced Engineering Materials*, 10(8). <https://doi.org/10.1002/adem.200800035>
- Zeng, Y., Jiang, B., Huang, D., Dai, J., ve Pan, F. (2013). Effect of Ca addition on grain refinement of Mg-9Li-1Al alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.12.002>
- Zhang, J. S., Sun, Y., Cheng, W. L., Que, Z. P., Li, Y. M., ve Liushan, L. (2013). The effect of Ca addition on microstructures and mechanical properties of Mg-RE based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 554, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.094>
- Zhang, J., Zhang, D., Tian, Z., Wang, J., Liu, K., Lu, H., Tang, D., ve Meng, J. (2008). Microstructures, tensile properties and corrosion behavior of die-cast Mg-4Al-based alloys containing La and/or Ce. *Materials Science and Engineering A*, 489(1–2), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.12.024>
- Zhang, L., Cao, Z. Y., Liu, Y. B., Su, G. H., ve Cheng, L. R. (2009). Effect of Al content on the microstructures and mechanical properties of Mg-Al alloys. *Materials Science and Engineering A*, 508(1–2), 129–133. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.029>
- Zhang, L., Deng, K. kun, Nie, K. bo, Xu, F. jun, Su, K., ve Liang, W. (2015). Microstructures and mechanical properties of Mg-Al-Ca alloys affected by Ca/Al ratio. *Materials Science and Engineering A*, 636, 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.100>
- Zhang, X. P., Chen, Y. G., Xiao, S. F., Tang, Y. B., Niu, G., Wei, S. H., ve Zhao, Y. H. (2008). Microstructure, tensile properties and compressive creep resistance of Mg-(5-8.5)%Sn-2%La alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 18(SPEC. ISSUE 1), s299–s305. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(10\)60221-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(10)60221-x)
- Zhao, C., Chen, X., Pan, F., Gao, S., Zhao, D., ve Liu, X. (2018). Effect of Sn content on strain hardening behavior of as-extruded Mg-Sn alloys. *Materials Science and Engineering A*, 713(September 2017), 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.074>
- Zhou, Y., Bian, L., Chen, G., Wang, L., ve Liang, W. (2016). Influence of Ca addition on microstructural evolution and mechanical properties of near-eutectic Mg-Li alloys by copper-mold suction casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 664, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.198>
- Zou, Y., Zhang, L., Li, Y., Wang, H., Liu, J., Liaw, P. K., Bei, H., ve Zhang, Z. (2018). Improvement of mechanical behaviors of a superlight Mg-Li base alloy by duplex phases and fine precipitates. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2625–2633. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.025>

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Şehzat AÇIKGÖZ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2009, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010-2014 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Öğretim Elemanı
- 2014- Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Öğretim Elemanı

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Acikgoz, S., ve Kurnaz, S. C.. (2022). The Effects of Individual Addition of Sn, Nd, and Ca on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of the Mg–Li–Al Alloy. *International Journal of Metalcasting, February*. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00869-8>

### DİĞER ESERLER:

- Güler, Ö., Başgöz, Ö., Güler, S.H., Canbay, C.A., Acikgoz, S., ve Boyrazlı M.. (2021) The synergistic effect of GNPs+CNTs on properties of polyester: comparison with polyester–CNTs nanocomposite. *J Mater Sci: Mater Electron* 32, 17436–17447. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06275-w>
- Acikgoz, N.; Acikgoz, S.; Sevik, H.; ve Kurnaz, S.. (2013) The Effect of Sn (0, 0.5, 1 and 3 wt.%) on the Mechanical Properties of Gravity Casting Mg-3Al Alloy and a Neural Network Application for Prediction. 3rd International Advances In Applied Physics and Materials Science Congress, 1569, 11-14.

- Açıkgöz, Ş., Sevik, H., ve Kurnaz, S.. (2011). Influence of silver addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Mg–6Al–1Sn–0.3Mn–0.3Ti. *Journal of Alloys and Compounds – J. Alloys Compounds*. 509. 7368-7372. 10.1016/j.jallcom.2011.04.112.
- Kurnaz, S., Sevik, H., Açıkgöz, Ş., ve Ozel, A.. (2011). Influence of titanium and chromium addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Mg–6Al alloy. *Journal of Alloys and Compounds – J. Alloys Compounds*. 509. 3190-3196. 10.1016/j.jallcom.2010.12.055.
- Sevik, H., Açıkgöz, Ş., ve Kurnaz, S.. (2010). The effect of tin addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast AM60 alloy. *Journal of Alloys and Compounds – J. Alloys Compounds*. 508. 110-114. 10.1016/j.jallcom.2010.07.185.