KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mg-Sn-xSi ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

YUSUF BURAK KÜÇÜKER

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mg-Sn-xSi ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

YUSUF BURAK KÜÇÜKER

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Kenan YILDIZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde sağladığı önemli pozitif özellikleri ile ön plana çıkan magnezyum alaşımlarının daha da geliştirilmesi ümidiyle yapılan bu çalışmada magnezyum içerisine kalay ve silisyum ilaveleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan bazıları tatmin ediciyken bazıları ise üzerinde daha fazla çalışılması gerektiği sonucunu vermiştir. Dünya üzerinde çok yeni bir alaşım olarak gözlenen Mg-Sn-Si alaşımı üzerinde çalışmaların artırılarak devam edilmesi temenni edilmiştir.

Tez çalışmam esnasında beni yönlendiren, yetiştiren ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Erdem KARAKULAK'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca başta bölüm başkanı Sn. Prof. Dr. Muzaffer ZEREN olmak üzere tüm KOÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni destekleyip bugünlere gelmemi sağlayan annem Cemile KÜÇÜKER'e, babam Yılmaz KÜÇÜKER'e, desteğini sürekli yanımda hissettiğim kardeşim Talha KÜÇÜKER ve nişanlım Gizem TEMİZER'e teşekkürü borç bilirim.

Haziran – 2018 Yusuf Burak KÜÇÜKER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. MAGNEZYUMA GENEL BAKIŞ 3
1.1. Özellikler ve Karakteristik 5
1.2. Magnezyum Alaşımlarının Adlandırılması 6
2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI 8
2.1. Otomotiv Uygulamaları 9
2.2. Havacılık Sanayi 10
2.3. Diğer Uygulamalar 10
3. MAGNEZYUMUN DÖKÜMÜ 11
3.1. HPDC (Yüksek Basınçlı Döküm) 12
3.2. Gravity Döküm (Yer Çekimi Etkisiyle Döküm) 13
3.3. Diğer Döküm Yöntemleri 13
3.3.1. Thixomolding 14
3.3.2. Squeeze casting 14
3.4. Atmosfer 15
3.5. Tane İnceltme 15
3.6. Sıcak Yırtılma 18
4. ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ 21
4.1. Alüminyum 22
4.2. Berilyum 23
4.3. Kalsiyum 23
4.4. Bakır 23
4.5. Demir 24
4.6. Lityum 24
4.7. Mangan 24
4.8. Nikel 24
4.9. Nadir Toprak Elementleri 24
4.10. Silisyum 24
4.11. Gümüş 25
4.12. Stronsiyum 25
4.13. Toryum 25
4.14. Titanyum 25
4.15. Çinko 26
4.16. Zirkonyum 26
4.17. İtriyum 27
5. Mg-Sn ALAŞIMLARI 28
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 32

6.1. Mg-Sn-Si Alaşımlarının Dökümü 32
6.2. Mikroyapısal İncelemeler 35
6.2.1. Optik mikroskop incelemeleri 36
6.2.2. SEM incelemeleri 42
6.3. Tane Boyutu Ölçümleri 52
6.4. XRD İncelemeleri 53
6.5. Sertlik Testi 54
6.6. Aşınma Testi 57
6.6.1. Aşınmış yüzey SEM görüntüleri 60
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR 69
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 72
ÖZGEÇMİŞ 73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Dünya üzerindeki plastik, Al ve Mg üretim miktarları 8
Şekil 2.2. Magnezyum otomotiv ürün örnekleri 9
Şekil 2.3. Magnezyum hobi ürünleri örnekleri 10
Şekil 3.1. HPDC yöntemiyle üretilmiş magnezyum bilgisayar parçası 12
Şekil 3.2. Basınçlı Döküm 13
Şekil 3.3. Squuze casting işlem aşamaları 14
Şekil 4.1. Mg'a ilave edilen Al ve Zn' nin döküm özelliklerine etkisi. 22
Şekil 4.2. Al-Mg Faz diyagramı 23
Şekil 4.3. Mg-Si Faz diyagramı 25
Şekil 4.4. Mg-Zn Faz diyagramı 26
Şekil 4.5. Mg-Zr Faz diyagramı 27
Şekil 5.1. Mg-Sn Faz diyagramı 29
Şekil 5.2. Mg-Sn alaşımlarında Mg_2Sn intermetaliğinin SEM görüntüsü 29
Şekil 6.1. Döküm işleminde kullanılan İndüksiyon ocağı ve Argon tüpü 32
Şekil 6.2. Döküm işleminin gerçekleştirildiği laboratuvar görünümü 33
Şekil 6.3. İndüksiyon ocağı ve koruyucu gaz uygulaması 34
Şekil 6.4. Döküm işleminin gerçekleştirildiği metal kalıp görüntüsü 34
Şekil 6.5. Döküm işlemi neticesinde ortaya çıkan magnezyum numuneler 35
Şekil 6.6. 20x büyütmede Mg-5Sn numunesi mikroyapı görüntüsü 36
Şekil 6.7. 20x büyütmede Mg-5Sn-0,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü 37
Şekil 6.8. 20x büyütmede Mg-5Sn-1,0Si numunesi mikroyapı görüntüsü 38
Şekil 6.9. 20x büyütmede Mg-5Sn-1,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü 39
Şekil 6.10. 20x büyütmede Mg-10Sn numunesi mikroyapı görüntüsü 39
Şekil 6.11. 20x büyütmede Mg-10Sn-0,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü 40
Şekil 6.12. 20x büyütmede Mg-10Sn-1,0Si numunesi mikroyapı görüntüsü 41
Şekil 6.13. 20x büyütmede Mg-10Sn-1,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü 42
Şekil 6.14. Mg-5Sn alaşımının SEM görüntüsü 43
Şekil 6.15. Mg-5Sn SEM görüntüsü 1 nolu bölge analizi 43
Şekil 6.16. Mg-5Sn SEM görüntüsü 2 nolu bölge analizi 44
Şekil 6.17. Mg-5Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü 44
Şekil 6.18. Mg-5Sn-0,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi 45
Şekil 6.19. Mg-5Sn-1,0Si alaşımının SEM görüntüsü 45
Şekil 6.20. Mg-5Sn-1,5Si alaşımının SEM görüntüsü 46
Şekil 6.21. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi 47
Şekil 6.22. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 2 nolu bölge EDS analizi 47
Şekil 6.23. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 3 nolu bölge EDS analizi 47
Şekil 6.24. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 4 nolu bölge EDS analizi 48

Şekil 6.25. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 5 nolu bölge EDS analizi 48
Şekil 6.26. Mg-10Sn alaşımının SEM görüntüsü 49
Şekil 6.27. Mg-10Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü 50
Şekil 6.28. Mg-10Sn-0,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi 50
Şekil 6.29. Mg-10Sn-1,0Si alaşımının SEM görüntüsü 51
Şekil 6.30. Mg-10Sn-1,5Si alaşımının SEM görüntüsü 52
Şekil 6.31. Tane boyutu değerleri karşılaştırma grafiği 53
Şekil 6.32. Mg-5Sn-xSi için XRD grafikleri 54
Şekil 6.33. Mg-10Sn-xSi için XRD grafikleri 54
Şekil 6.34. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Vickers Sertlik Cihazı 55
Şekil 6.35. Mg-5Sn-xSi Sertlik ölçümleri grafiği 56
Şekil 6.36. Mg-10Sn-xSi sertlik ölçümleri grafiği 56
Şekil 6.37. Mg-5Sn-xSi ve Mg-10Sn-xSi sertlik değerleri karşılaştırması 57
Şekil 6.38. Aşınma cihazı görüntüsü 58
Şekil 6.39. Aşınma cihazı ve yazılım görüntüsü 58
Şekil 6.40. Aşınma testi karşılaştırması grafiği 59
Şekil 6.41. Mg-5Sn alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 61
Şekil 6.42. Mg-5Sn-0,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 62
Şekil 6.43. Mg-5Sn-1,0Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 63
Şekil 6.44. Mg-5Sn-1,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 63
Şekil 6.45. Mg-10Sn alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 64
Şekil 6.46. Mg-10Sn-0,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 64
Şekil 6.47. Mg-10Sn-1,0Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 65
Şekil 6.48. Mg-10Sn-1,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü 65

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Manyezit Rezervleri 3
Tablo 1.2. Yaygın olarak kullanılan bazı yapısal malzemelerin yoğunlukları…….4
Tablo 1.3. Magnezyum metalinin Atomik özellikleri ve kristal yapısı..... 5
Tablo 1.4. Mg, Al, Ti ve Fe'in bazı özelliklerinin karşılaştırması..... 6
Tablo 1.5. ASTM normunda mg için alaşım elementleri harf kodları 7
Tablo 3.1. Bazı elementler için büyüme kısıtlama faktörü değerleri..... 16
Tablo 3.2. Bazı magnezyum alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılıkları 19
Tablo 6.1. Aşınma testi için kullanılan parametreler 59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
Ag	: Gümüş
Be	: Berilyum
Ca	: Kalsiyum
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
kW	: Kilowatt
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
ml	: mililitre
mm	: milimetre
Mn	: Mangan
N	: Newton
Ni	: Nikel
nm	: nanometre
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
Ti	: Titanyum
To	: Toryum
Yt	: İtriyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum

Kısaltmalar

Ağr.%	: Ağırlıkça yüzde
At. %	: Atomik yüzde
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektroskopisi)
GRF	: Growth Restricting Factor (Büyüme Kısıtlama Faktörü)
HPDC	: High Pressure Die Casting (Yüksek Basınçlı Döküm)
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
rpm	: Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir/Dönme Sayısı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Difraktometresi)

Mg-Sn-xSi ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Türkiye'de ve dünyada düşük yoğunluğuyla popüler olan magnezyum ve alaşımlarının kullanımı 2000' li yıllardan itibaren ciddi bir artışa uğramıştır. Özellikle otomotiv sektöründe sıkça karşılaşmaya başladığımız magnezyum ve alaşımlarının bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Saf magnezyumun sahip olduğu düşük mukavemet, sürünme ve korozyon direnci gibi özelliklerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada magnezyum alaşımlarına farklı oranlarda kalay ilave edilip master alaşımlar oluşturulmuştur. Ardından Mg-Sn master alaşımlarına farklı oranlarda Si ilave edilerek sertlik, aşınma direnci gibi mekanik özelliklerin geliştirilebilirliği incelenmiştir. Buna göre artan kalay ilavesi ile sertlik değerleri, aşınma direnci artmıştır. Artan Si ilavesi ile sertlik değerleri artmakta, aşınma direnci ise tespit edilen bir noktaya kadar artarken ardından azalma eğilimi göstermektedir. Bunun sebebinin yapıda oluşan sert intermetalik fazların varlığı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Döküm, İntermetalik, Magnezyum, Mg-Sn.

CASTING AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF Mg-Sn-xSi ALLOYS

ABSTRACT

The use of magnesium and its alloys, which are popular with low density in Turkey and around the world, has experienced a serious increase since 2000's. There are some restrictions on magnesium and its alloys, which are often encountered especially in the automotive sector. Properties such as low strength, creep and corrosion resistance that pure magnesium possesses need to be improved. In this study, tin was added to magnesium alloys at different ratios and master alloys were formed. Subsequently, Si is added to Mg-Sn master alloys at different ratios to investigate the possibility of improving mechanical properties such as hardness, abrasion resistance. Accordingly, hardness values and wear resistance increased with increasing tin addition. With increasing Si addition, the hardness values increase and the wear resistance increases to a fixed point and then tends to decrease. It has been determined that the reason for this is the presence of hard intermetallic phases in the structure.

Keywords: Wear, Casting, Intermetallic, Magnesium, Mg-Sn.

GİRİŞ

Dünyada, yıllar geçtikçe kısıtlı olan enerji kaynaklarının ekonomik kullanımı için talepler hızla artmaktadır. Bunun yanı sıra ham petrol fiyatlarının artışından minimum düzeyde etkilenmek ve emisyon gazları salınımının sürekli kontrol altında tutulması için çeşitli arayışlar sürdürülmektedir. Zamanla enerji kaynaklarının tükenmesi ve petrol fiyatlarının artışı nedeniyle hafif metallerin kullanımı çok önemli ve kaçınılmaz bir sonuç olmuştur [1].

Hafif metal alaşımları içinde en yaygın kullanılan alaşım grubu alüminyum esaslı alaşımlardır. Çok düşük yoğunluğa sahip magnezyum alaşım grubu, düşük yoğunluğa sahip alüminyum için bir rekabet ortamı meydana getirmektedir. Magnezyum, yapısal metal alaşımları arasında en düşük yoğunluğa sahip metaldir ve bu özelliği sayesinde mühendislik uygulamaları için umut vermektedir [1-3]. Magnezyum, yer kabuğunda en çok bulunan elementlerden biridir ve ayrıca deniz suyunda da çözünmüş halde bulunmaktadır [1].

Magnezyum ve alaşımları çeşitli ülkelerde hızla kabul görüp başlıca otomotiv, havacılık ve elektronik endüstrilerindeki uygulamalarda yerini almaya başlamıştır. Özellikle otomotiv sektöründe çekici ve geliştirilebilir özellikleriyle alüminyum alaşımlarına ve çeliğe alternatif olarak düşünülmekte ve kullanılabilmektedir [3].

Ayrıca magnezyum alaşımları çok düşük yoğunluğu ve bulunabilirliğinin yanı sıra yüksek spesifik mekanik özellikleri sayesinde ağırlık-kritik uygulamalarda endüstrinin dikkatini çekmektedir [1]. İyi dökülebilirlik, iyi işlenebilirlik, kontrollü atmosfer altında iyi kaynaklanabilirlik ve geri dönüştürülebilirlik magnezyumun çekici özelliklerindendir. Bu çekici özelliklerin yanı sıra düşük elastik modül, kötü yüksek sıcaklık özellikleri ve düşük sürünme direnci gibi özellikler de dezavantaj olarak karşımıza çıkmakta ve geliştirilmesi gerekmektedir [3].

Yüksek sıcaklık özelliklerinin geliştirilmesi ve sürünme direncinin artırılması için magnezyum alaşımlarında karşımıza çıkan yöntemlerden biri kalay ilavesidir. Mg-Sn

alaşımları, mikroyapıda gözlemlenen Mg_2Sn intermetaliği sayesinde saf magnezyumun sahip olduğu zayıf özelliklerin gelişmesine katkıda bulunup yol gösterici olmuştur [4]. Yapılan literatür taramaları sonucu Mg-Sn alaşımlarının etkinliğinin daha da artırılması hedef olarak gösterilmiş ve bu yönde çeşitli alaşım elementi ve gruplarının ilaveleri araştırılmıştır. Bu ilavelerden silisyum sağlayabileceği pozitif özellikleri ile büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Literatürde silisyumun, magnezyum alaşımlarına ilave edilmesi ile ortalama tane boyutu değerini küçülttüğü, sertlik, sürünme direnci gibi mekanik özellikleri geliştirdiği ve yapıda kararlı bir intermetalik oluşturduğu bilgilerine ulaşılmaktadır. Farklı alaşım elementleri ile beraber magnezyum yapısına ilave edilen silisyumun tez çalışmasına konu olan Mg-Sn alaşımlarına ilavesi hususunda birkaç çalışma dışında örneği gözlenmemiştir.

Bu çalışma çerçevesinde oluşturulacak alaşım gruplarında farklı oranlarda kalay ve silisyum kullanılarak sertlik, aşınma direnci ve mikroyapı değişimleri ve gelişimleri incelenecektir. Alaşımlar grupları arasında kalay oranının artması ile beraber sertlik ve aşınma direncinin artacağı, artan silisyum ilavesi ile sertlik değerinin artacağı, aşınma direnci ise önce artıp daha sonra azalması beklenmektedir. Mekanik özelliklerdeki gözlenmesi beklenen artışın, yapıda oluşan intermetalikler ve tane inceltme mekanizmasından kaynaklanacağı öngörülmektedir.

1. MAGNEZYUMA GENEL BAKIŞ

Doğada en çok bulunan elementler arasında kendine sekizinci sırada yer edinen magnezyum yer kabuğunun yaklaşık olarak %2' sini oluşturup ayrıca deniz suyunda çözülmüş halde de bulunur [5].

60'a yakın mineral içinden sadece dolomit, manyezit, brusit, karnallit ve olivin ticari öneme sahiptir [5]. Tablo 1.1' de dünya üzerindeki manyezit rezerv tablosu verilmiştir.

Tablo 1.1. Manyezit Rezervleri [5]

Ülke	Rezerv (Milyon ton)
Türkiye	45
Çin	750
Kuzey Kore	450
Rusya	650
ABD	10
Toplam	2,500

Başta düşük yoğunluğu olmak üzere sağladığı pozitif özellikleri ile güncel çalışmalarda sürekli kendine yer bulan magnezyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanımı 1. Dünya Savaşı'na kadar uzanmaktadır. Demirden %78, alüminyumdan %36 daha düşük yoğunluğa sahip magnezyum 1,74 g/cm^3 lük yoğunluğuyla ağırlık tasarrufu ile teknolojik uygulamalar için umut vermektedir [6].

Tablo 1.2. Yaygın olarak kullanılan bazı yapısal malzemelerin yoğunlukları yapısal malzemelerin yoğunlukları [1]

Malzeme	**Yoğunluk (g/cm^3)**
Çelik (Dökme demir)	7,2
Titanyum	4,51
Alüminyum	2,71
Magnezyum	1,74
Yapısal Plastikler	1,0-1,7

Magnezyum alaşımlarında düşük yoğunluğun dışında iyi spesifik mukavemet, iyi dökülebilirlik, bulunabilirlik, geri dönüştürülebilme potansiyeli ve iyi işlenebilirlik özellikleri avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu pozitif özelliklerin dışında kötü yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük sürünme dayanımı gibi olumsuz özellikler de mevcuttur. Son zamanlarda problem teşkil eden bu olumsuz özelliklerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir [3-7].

Günümüzde yapı malzemesi olarak kullanılan en düşük yoğunluğa sahip metal olan magnezyum sağladığı pozitif özellikler ile başta otomotiv ve havacılık sektöründe kendine yer bulmaktadır. Ancak kafes yapısının HSP (Hegzagonal sıkı paket) olması nedeniyle şekillend9irilebilirlik hususunda kısıtlamalar mevcuttur. Ayrıca ergitme sırasında koruyucu gaza ihtiyaç duyulması ve saf haldeki kısıtlı özellikleri geliştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır [6-7].

Magnezyum döküm alaşımları içerisinde en fazla öneme sahip olan alaşımlar AZ serisi, AM serisi ve AS serisi alaşımlar olarak gösterilmektedir. Bunlar arasında AZ serisi alaşımlar düşük ısıl direnç, düşük sürünme direnci ve sınırlı bir sünelik göstermektedir [8].

Düşük miktarda alüminyum ilavesi ile sünekliğe pozitif yönde bir katkı yapılabilmektedir. AM serisi alaşımlar kısıtlı mekanik özelliklere ve döküm kabiliyetine sahiptir [8].

AS serisi alaşımlar ise sadece döküm yöntemiyle üretilmekle beraber yüksek sıcaklık mukavemeti ve sürünme dirençleri diğer alaşım gruplarına göre daha yüksek olduğu literatür taramasında karşımıza çıkmaktadır [8].

1.1.Özellikler ve Karakteristik

Periyodik tabloda toprak alkali metal olarak kendine yer bulan magnezyum alaşımlarının atom numarası 12 olmakla beraber +2 değerliğe sahip olduğu bilinmektedir. Tablo 1.3' te magnezyumun atomik özellikleri ve kristal yapısına ilişkin bilgiler verilmiştir.

Tablo 1.3. Magnezyum metalinin Atomik özellikleri ve kristal yapısı [1]

Sembol	**Mg**
Sınıfı	Toprak alkali metal
Atom numarası	12
Atomik ağırlığı	24.3050
Atomik hacim	14.0 cm^3/mol
Atomik yarıçap	0.160 nm
İyonik yarıçap	0.072 nm
Serbest elektronların orbital dizilimi	$1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$
Değerliği	2+
Kafes yapısı	Hegzagonal sıkı paket (HSP)

Yapısal metaller arasında en düşük yoğunluğa sahip olması ile beraber diğer mekanik özellikler ile endüstride kullanım alanının genişleyeceği düşünülmektedir. Tablo 1.4' te magnezyum, alüminyum, titanyum ve demir metallerinin karakteristikleri karşılaştırılmaktadır [3, 6].

Tablo 1.4. Mg, Al, Ti ve Fe'in bazı özelliklerinin karşılaştırması [3]

Özellik	Birimler	Mg	Al	Ti	Fe
Atom Numarası	/	12	13	22	26
Atom yarıçap	[nm]	0,145	0,118	0,176	0,156
Atom ağırlığı	[g x mol^{-1}]	24,30	26,98	47,87	55,85
Yoğunluk (O.S.)	[g x cm^{-3}]	1,74	2,70	4,51	7,87
Ergime noktası	[°C]	650,00	660,00	1668,00	1538,00
Kaynama noktası	[°C]	1090,00	2519,00	3287,00	2861,00
Termal iletkenlik	[$Wm^{-1}K^{-1}$]	160,00	235,00	22,00	80,00
E-modülü	[GPa]	45,00	70,00	116,00	210,00
Mukavemet	[MPa]	90,00	98,00	150,00	275,00

Tablo 1.4'te verilen mekanik özelliklere ilaveten, magnezyum alaşımlarının sertlik değerleri konusundaki literatür taraması kapsamında kum kalıba döküm yöntemiyle üretilmiş bir parçada sertlik değeri 30 HB olarak gözlemlenirken tavlanmış bir levhada 40 HB haddelenmiş bir levhada bu değer ortalama 45 HB değerleri gözlenmektedir [1].

1.2. Magnezyum Alaşımlarının Adlandırılması

Magnezyum alaşımlarının adlandırılması için ASTM (American Society for Testing and Materials) normu kullanılmıştır ve bu şekilde dünya çapında standartlaştırılmıştır. Alaşımın adlandırılması, ana alaşım elementlerini simgeleyen harfler ve onları takiben alaşım içindeki yüzdece miktarlarını belirten rakamlar ile (genellikle iki rakam) yapılmaktadır. Alaşımların adlandırılmasında rakamlardan sonra kullanılan tek harf ise alaşımın geliştirilmişliğini ve saflığını ifade etmektedir. Örneğin AZ91D alaşımı % 9 alüminyum (A) ve % 1 çinko (Z) içermektedir ve geliştirme derecesi D' dir. Eğer bu alaşım DIN normuna göre adlandırılma yapılırsa bu alaşım MgAl9Zn1 şeklinde olurdu [1, 8]. Tablo 1.5'te ASTM normuna göre alaşım elementlerini sembolize eden harf kodları verilmiştir.

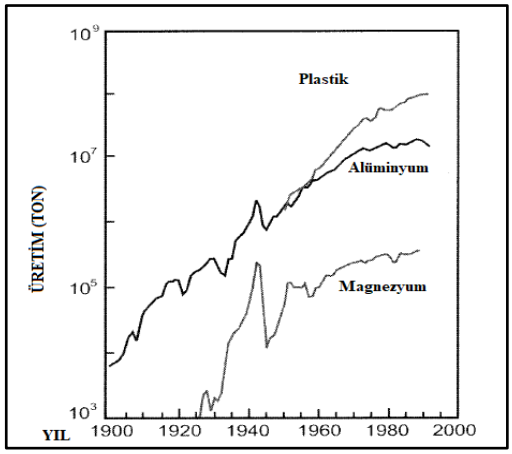
Tablo 1.5. ASTM normunda mg için alaşım elementleri harf kodları [8]

Harf Kodu	Alaşım elementi	Harf Kodu	Alaşım elementi
A	Alüminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir Toprak E.	S	Silisyum
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	W	Ytriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimuan
L	Lityum	Z	Çinko
M	Mangan		

2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI

Uygulama alanlarında kullanımı 19.yüzyılın başlarına dayanan magnezyum metali; 1. Dünya ve 2. Dünya Savaşı sırasında askeri uçaklarda kullanılmıştır ve daha sonra magnezyuma olan ilginin azaldığı literatür taramasında belirlenmiştir Günümüzde Mg alaşımları özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliğinden dolayı tercih edilir ve sahip olunan olumsuz özellikler ise metalurjik açıdan geliştirilmektedir [2]. 1920'lerde magnezyum alaşımlarının düşük yoğunluğu sebebiyle yarış araçlarında kullanılması için denemelere başlanmıştır. 1930'lu yıllara kadar araçlar için herhangi bir ticari uygulama olmamasının ardından 1930'lu yıllarda ilk defa VW (Volkswagen) Beetle aracında ortaya çıkmıştır [1-2]. Amerikan otomotiv sektöründe magnezyum kullanım miktarı 1960'lı yıllarda otomobil başına 24 kg iken 1980'li yılların sonunda bu miktar 113 kg' a kadar çıkmıştır. Yapılan bir araştırmaya göre otomotivde %1,5'luk ağırlık kazancı yakıt tasarrufu ve gaz salınımı için %1'lik bir katkı sağlamaktadır [9].

Şekil 2.1' de 1900 yılından 2000'li yıllara kadar magnezyum metalinin dünya üzerindeki üretim miktarını, alüminyum ve plastiklerin üretim miktarını ifade eden grafik verilmiştir [2].



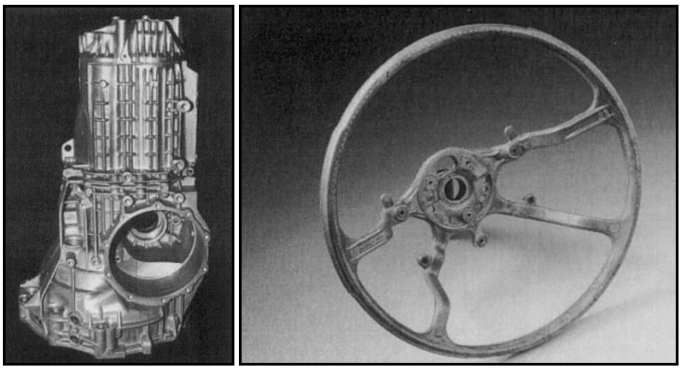
Şekil 2.1. Dünya üzerindeki plastik, Al ve Mg üretim miktarları [2]

2.1.Otomotiv Uygulamaları

Yeni üretim yöntemleri ve malzemelerin geliştirilmesi ile hali hazırda otomotivde kullanılan çelik, alüminyum, polimer gibi malzemelere rakip gelmektedir. 1950'li yıllardan itibaren neredeyse tamamen çelik yapıdan oluşan otomotiv 2000'li yıllara doğru gelindiğinde yerini geliştirilmiş ve hafifletilmiş malzemelere bırakmaktadır [2, 10].

Magnezyum alaşımları çeşitli uygulama güçlüklerine rağmen otomotiv sektörü için büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Başlıca avantajı ağırlık azaltımı ve buna bağlı olarak meydana gelen yakıt tasarrufu, gaz salınımının azaltılması, performans artımı ve ekonomiklik gibi özelliklerdir. Bu özelliklerin yanı sıra çarpma esnasında rijitliği ve enerji absorbsiyonu gibi özellikler otomotiv sektörü için önemli bir yere sahiptir [2, 10]. Ancak düşük ergime sıcaklığı ve sürünme direnci gibi özellikleri nedeniyle magnezyumun otomotivde kullanımı kısıtlanmaktadır. Alüminyum alaşımları ile rekabet edebilmesi için gerekli geliştirmelerin ve denemelerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [2].

Otomotiv sektöründeki hafifleştirme hareketleri dahilinde magnezyum ve bileşenleri koltuk iskeleti, direksiyon ve bileşenleri, jantlar, kaporta ve bagaj kapağı ve kullanıcı pedalları olarak örneklendirilebilmektedir. Bahsi geçen bileşenlerde magnezyum alaşımlarının mukavemet, yorulma direnci, darbe ve sürünme direnci gibi özelikler ön plana çıkmaktadır [2]. Şekil 2.2'de otomotivde kullanılan magnezyum bileşen örneklerinin dişli kutusu ve direksiyon görselleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Magnezyum otomotiv ürün örnekleri [2]

2.2.Havacılık Sanayi

Magnezyum alaşımlarının havacılık sanayinde kullanılması için tıpkı otomotiv sektöründe olduğu gibi bazı özellikleri karşılayabilmesi gerekmektedir. Bunlardan başlıcaları korozyon direnci, titreşim sönümleme, mukavemet ve diğer tüm uygulamalarda olduğu gibi hafifliktir. Magnezyum alaşımlarının havacılık sektöründe aktif olarak kullanılabilmesi için yanıcılık, korozyon direnci ve mukavemet değerlerinin kullanıma uygun olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Havacılık sektöründe magnezyum alaşımlarını genel itibariyle AZ, AM, QE serisi alaşımlar temsil etmektedir. Bu alaşımların beklentileri daha iyi karşılaması amacıyla çalışmalar süregelmektedir [1-3, 11].

2.3. Diğer Uygulamalar

Magnezyum alaşımlarının ortopedik ve kardiyovasküler biyobozunur implantlarda kullanılabildiği literatürde karşımıza çıkmaktadır. Toksik olmayan magnezyum alaşımları lokal doku hücrelerine pozitif katkı yapabilmektedir. Bununla birlikte dokularda hidrojen gazı varlığı implantın mekanik bütünlüğünün erken kaybına yol açabilmektedir [12].

Magnezyum alaşımları yukarıda bahsi geçen uygulama alanları dışında birçok sektörde daha kendine yer bulmuştur. Bunlardan bazıları başta bisiklet aparatları ve gövdesi olmak üzere hobi gereçleri ve ev aletleridir [1-2]. Şekil 2.3'te magnezyum gövdeli bisiklet ve tenis raketi görselleri verilmiştir.



Şekil 2.3. Magnezyum hobi ürünleri örnekleri [1]

3. MAGNEZYUMUN DÖKÜMÜ

Magnezyum ürün elde edebilmek için yıllardır birçok üretim yöntemi denenmiştir. Elde edilen ürünün mikroyapısal ve mekanik özellikleri üretim yöntemiyle doğrudan bağlantılı olduğu için üretim yöntemini seçmek oldukça önemli bir husustur [1, 2].

Magnezyum için üretim yöntemlerini sıvı faz yöntemleri ve katı faz yöntemleri olmak üzere iki başlık altında toplamak mümkündür. Katı faz yöntemleri toz metalurjisi, sinterleme, mekanik alaşımlama ve karıştırma gibi metotlardır [1, 2].

Katı faz yöntemleri sıvı faz yöntemlerine göre daha üstün mukavemet seviyeleri, mikroyapıda daha metastabil fazlar üretebilme ve daha iyi mikroyapısal özellikler gibi avantajlara sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bu avantajların yanı sıra yüksek proses maliyeti, kalınlık sınırlamaları, daha düşük kırılma tokluğu ile süneklik ve ince tozların zor sıkıştırılması gibi dezavantajlara sahip olduğunu belirtmek gerekmektedir [1-2].

Magnezyum döküm (sıvı faz yöntemleri) teknolojisi, II. Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında, magnezyumun sahip olduğu iyi dökülebilirlik özellikleri neticesinde harcanan kalıp ve kalıcı kalıp yöntemlerine göre kullanılmıştır. Ayrıca havacılık, savunma ve otomotiv sektöründe kullanım için HPDC (yüksek basınçlı döküm) yöntemi geliştirilerek kullanılmıştır.

Son zamanlarda, magnezyum döküm uygulamalarının daha da genişlemesi ile, döküm işlemlerinin vakumlu döküm, düşük basınçlı döküm, dolu kalıba döküm, yarı katı döküm gibi çeşitliliğe yol açmıştır [13].

Döküm yöntemi %98'lik oranıyla magnezyum ve alaşımları için baskın üretim yöntemi olmuştur. Döküm yöntemleri arasında ise en yaygın kullanılan yöntem gelişmiş döküm özellikleri sayesinde HPDC yöntemidir [13].

3.1.HPDC (Yüksek Basınçlı Döküm)

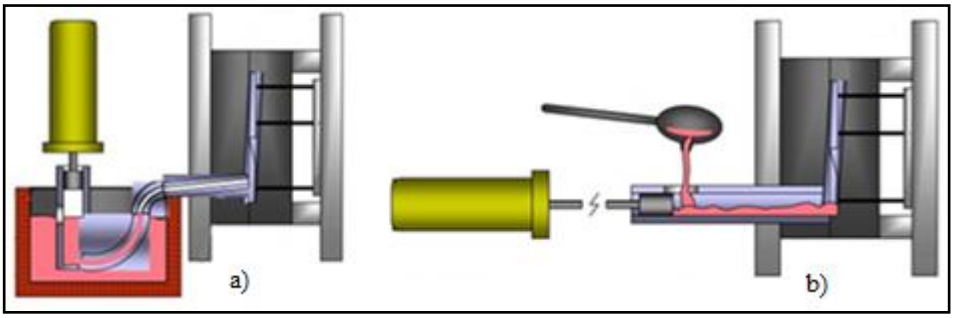
Yüksek basınçlı döküm yöntemi, hafif metaller için üretimde iyi bir esneklik sağlamakla beraber, magnezyum alaşımlarında sahip olunan mükemmel kalıp dolum özelliği sayesinde en çok kullanılan üretim yöntemidir. Basınçlı dökümün sağlamış olduğu üretim hızı, ince cidarlı ve karmaşık parça üretebilme yeteneği yeni uygulama alanları meydana getirmektedir.

HPDC yöntemiyle ölçü toleranslarında ±0,001mm'ye kadar düşülebilirken alüminyum alaşımlarında bu değer ±0,002mm civarında bulunmaktadır. Ayrıca bu yöntemle 1-1,5mm et kalınlığına sahip parçalar dökülebilirken mükemmel bir işlenebilme kabiliyeti bulunmaktadır. Şekil 3.1'de HPDC yöntemiyle üretilmiş ince cidarlı magnezyum nihai ürün görseli verilmiştir.



Şekil 3.1. HPDC yöntemiyle üretilmiş magnezyum bilgisayar parçası [13]

Yüksek basınçlı döküm yöntemi sıcak kamaralı ve soğuk kamaralı olmak üzere alt bileşenlerden oluşmaktadır [13]. Şekil 3.2'de sıcak ve soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi şematize edilmiştir.



Şekil 3.2. Basınçlı Döküm, a) Sıcak kamaralı basınçlı döküm, b) Soğuk kamaralı basınçlı döküm [13]

Sıcak kamaralı dökümde metal ergiyik halde koruyucu atmosfer ile hazne içinde tutulur ve basınç yardımıyla kalıba dolum gerçekleştirilir. Soğuk kamaralı dökümde ise ergiyik metal kepçe yardımıyla sisteme dahil edilir ve basınç etkisiyle dolum gerçekleştirilir. Yüksek basınç nedeniyle kalıba hızla dolan metal sistemdeki gazlarla etkileşime girerek gözenekli bir yapı meydana getirebilmektedir. Bu gözenekli yapıların önüne geçilmesi için vakum destekli döküm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem yüksek maliyetli olmakla beraber seri üretim koşullarına çok uygun değildir [13].

3.2. Gravity Döküm (Yer Çekimi Etkisiyle Döküm)

Geleneksel döküm yöntemi olan gravity dökümde, kalıcı ve harcanan kalıplar kullanılabilmektedir. Basınçlı döküme nazaran karmaşık bir yapıya sahip olmayan ve üretim miktarı az olacak ürünler için kullanılmaktadır [13, 14].

Ergiyik metalin sahip olduğu yüksek sıcaklık nedeniyle ciddi bir oksidasyon meydana gelebilmektedir. Bu durum döküm işlemi sırasında gözeneklilik ve inklüzyonlara sebep olmaktadır. Meydana gelen gözenekler ve inklüzyonlar döküm parçasının mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki edecektir. Bu olumsuz özelliklerin giderilmesi için kalıbın ısıtılması ve sıvı metalin hızlı bir şekilde kalıba doldurulması gerekmektedir [13, 14]. Kalıbın ısıtılması ile yapılan dökümlerde daha hızlı bir döküm işleminin gerçekleşeceği belirtilmiştir [14].

3.3. Diğer Döküm Yöntemleri

Hali hazırda endüstride farklı uygulamalar için kullanılan ve literatürde sıkça karşımıza çıkan diğer döküm yöntemleri aşağıda verilmiş ve açıklanmıştır.

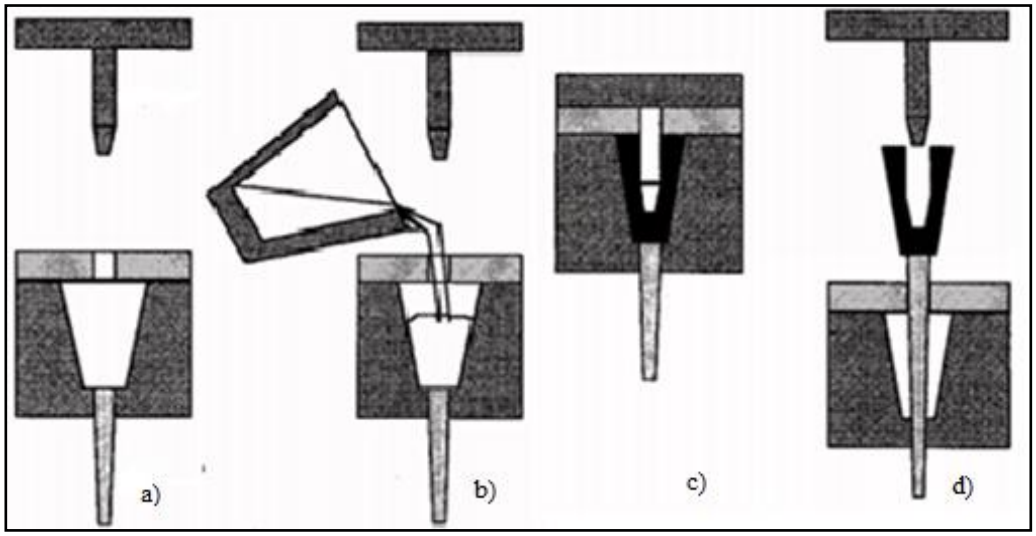
3.3.1. Thixomolding

Thixomolding, magnezyum alaşımları için kullanılabilen bir yarı katı döküm yöntemidir.

Thixomolding, günümüzde birincil eriyikten doğrudan üretim yapmanın vermiş olduğu enerji sarfiyatı ve maliyette düşüşe gitmek için kullanılan bir yöntemdir. Daha gözeneksiz bir yapı ve daha yüksek yorulma dayanımı sağlayan ürünler meydana getirebilen bu yöntemde önceden ısıtılmış kalıba yarı-katı bir bulamacın enjekte edilmesi ile ürünler oluşturulmaktadır [13, 15].

3.3.2. Squeeze casting

Bu döküm yöntemi kapalı bir kalıp içerisinde, ergiyik halde bulunan metalin yüksek basınç altında sıkıştırılması prensibine dayanmaktadır. Gravity ve basınçlı döküm yöntemlerinde meydana gelen sıvı basıncından daha yüksek sıvı basıncına sahip olan bu yöntemde çözülmüş gazlar ergiyik içinde kalır ve ergiyiği sıcak noktalardan gelen gözeneklere kadar sıkar. Sonuç olarak sıkıştırılmış olunan bu bileşende gözeneklilik yok denecek kadar az bir seviyeye düşmüş olacaktır. Buradan da yola çıkarak döküm malzemenin mekanik özellikleri diğer üretim yöntemlerine göre üstünlük sağlayabilmektedir [16]. Şekil 3.3'te Squeeze casting 4 aşamada şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.3. Squuze casting işlem aşamaları [16]

3.4. Atmosfer

Özellikle eriyik haldeki magnezyumun oksijene karşı yüksek afinitesi olduğu bilinmektedir. Mevcut olan bu afinite ve sıvı metal yüzeyindeki oksit tabakasının geçirgen olması magnezyumun sürekli olarak oksitlenmesine neden olacaktır ve koruyucu gaz ihtiyacı meydana gelmektedir [17, 18].

Ergimiş magnezyumda yanma probleminin giderilmesi için ilgili çalışmaların başlaması 1930'lu yıllara dayanmaktadır. Bu yıllarda fluks karışımları denenmiştir [18]. 1970'li yıllara gelindiğinde aşağıdaki gaz karışımları kullanılmaya başlanmıştır:

Hava/SF6, Hava/CO2/SF6, CO2/SF6.

Bu sayede SF6 gazının magnezyumun ergitme esnasında yanmaması hususunda oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Ancak yapılan araştırmalar neticesinde SF_6 gazının atmosferde tutunma süresi oldukça uzun bulunmuştur. Bu nedenle alternatif koruyucu gaz araştırmaları genişletilerek sürdürülmektedir. HFC134a, HFE7100, NovacTM612 ve Ar gaz denemeleri gerçekleştirilmektedir [13, 17, 18].

3.5. Tane İnceltme

Mekanik özelliklerin geliştirilmesi için izlenebilecek yöntemlerden biri ortalama tane boyutu değerinin azaltılması anlamına gelen tane inceltme mekanizmasıdır. Magnezyum alaşımlarında tane inceltme mekanizması temelde iki gruba ayrılmaktadır. Bu grup ayrımı yapıda alüminyum bulunup bulunmamasına göre yapılmaktadır [6].

Alüminyum içermeyen magnezyum alaşımları;

Zirkonyumun sahip olduğu olağanüstü tane inceltme özelliklerinden dolayı, alüminyum içermeyen magnezyum alaşımlarının tane inceltme mekanizmasında en sık karşılaşılan yöntem zirkonyum ilavesi olmuştur. Üstün tane inceltme özellikleri Zr'un sahip olduğu büyüme kısıtlama faktörü değeri ve magnezyum ile kafes yapısı ve parametreleri açısından gösterdiği uyumdan kaynaklanmaktadır. Tablo 3.1'de bazı elementler için büyüme kısıtlama faktörü değerleri verilmiştir [19, 20].

Tablo 3.1. Bazı elementler için büyüme kısıtlama faktörü değerleri [20]

Element	Büyüme Kısıtlama Faktörü (GRF)
Zr	38.29
Ca	11.94
Si	9.25
Zn	5.31
Cu	5.28
Al	4.32
Sn	1.47

Çözünen elemanın eklenmesi genellikle, katı / sıvı ara yüzeyinin önündeki bir difüzyon tabakasında ana metalin daha hızlı soğumasına neden olur ve bu durum dendrit benzeri bir ağ oluşması ile sonuçlanır. Böylece tane büyümesi kısıtlanmış olacaktır. Çözünen maddenin ortalama tane boyutu üzerindeki etkisi büyüme kısıtlama faktörü (GRF) olarak ifade edilebilir. GRF değeri elementin denge katsayısı, likidus çizgisinin eğimi ve ilk kompozisyonun çarpımıyla ortaya çıkmaktadır. Daha büyük bir GRF daha güçlü bir tane inceltici rolü oynayacaktır [6, 21, 22].

Yapıdaki zirkonyumun çözünmüş formu, büyüyen kristaller etrafında hızlı bir şekilde etkili aşırı soğuma bölgesi oluşturmasına neden olmaktadır. Bu nedenle saf Mg'a zirkonyum ilavesiyle etkin bir tane inceltme mekanizması gerçekleştirilmiş olunacaktır [19, 20].

Alüminyum içermeyen magnezyum alaşımlarında en çok karşılaşılan zirkonyum ilavesinin dışında bazı mekanik yöntemlerde tane inceltme mekanizması olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemler hem alüminyum içeren hem de alüminyum içermeyen magnezyum alaşımlarında kullanılmaktadır [19, 20].

Ultrasonik titreşim ve karıştırma gibi yöntemler endüstride tane inceltme mekanizması olarak karşımıza çıkan mekanik yöntemlerdir. Ultrasonik titreşimde oluşan kavitasyon ile dentritler parçalanacak ve heterojen çekirdeklenmeyi sağlayacaktır. Böylece tane sayısı artacak ve doğal olarak ortalama tane boyutunda

düşüş meydana gelecektir. Karıştırma mekanizması ise yapıyı dağıtarak yeni çekirdeklenme bölgeleri oluşturması esasına dayanmaktadır [20].

Alüminyum içeren magnezyum alaşımları:

Alüminyum içeren magnezyum alaşımlarının tane inceltme mekanizmaları için çok eski yıllardan beri birçok farklı yöntem denenmiştir. Bu yöntemler Aşırı ısıtma, Elfinal prosesi, karbon aşılama yöntemi ve alaşım elementi ilavesi başlıkları altında değerlendirilebilmektedir [6, 23, 24].

Aşırı ısıtma yöntemi sıvı metalin döküm sıcaklığının 150-260ºC üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılması ile başlamaktadır. Ardından bu sıcaklıkta bir süre bekletilmesi ve daha sonrasında döküm sıcaklığına soğutulup bekletilmeden dökülmesine dayanmaktadır. Bu bağlamda proses etkinliğin belirleyen parametreler çıkılan sıcaklık değeri, bu sıcaklıktaki bekleme süresi, yapıdaki alaşım elementleri ve miktarlarıdır. Prosesin ilk aşaması olan döküm sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa çıkılmasının ardından soğuma yavaş gerçekleştirilse ve bekleme süresi uzun tutulursa efektif bir tane inceltme mekanizması görülmeyecektir. Aşırı ısıtma yöntemiyle tane inceltme mekanizması, yüksek sıcaklıkta çözündükten sonra hızlı bir soğuma ile oluşacak çekirdekleşme bölgelerinin artışı, karbürize veya intermetalik oluşumları ile büyümenin kısıtlanması gibi hipotezler ile açıklanmaktadır [6, 21, 23].

Karbon aşılama yönteminde, yapıya hidrokarbonlar, SiC, CO, CO_2, grafit gibi ürünler halinde girebilen karbon alüminyum ile etkileşerek Al_4C_3'ü meydana getirmektedir. Oluşan bu yapının hipotezlere göre çekirdekleyici özellikte olduğu kabul edilmiştir [6, 21, 24].

Elfinal prosesi yapıya $FeCl_3$ ilave edilmesi ile gerçekleşmektedir. $FeCl_3$ hidrolizi sonucu HCl gazının oluşmakta ve çelik potadan C salınımı gerçekleşmektedir. Serbest C, yapıdaki Al ile birleşerek tıpkı karbon aşılama yönteminde olduğu gibi Al_4C_3 yapısını oluşturmakta ve bu yapı hipotezlere göre çekirdekleyici görev almaktadır [6].

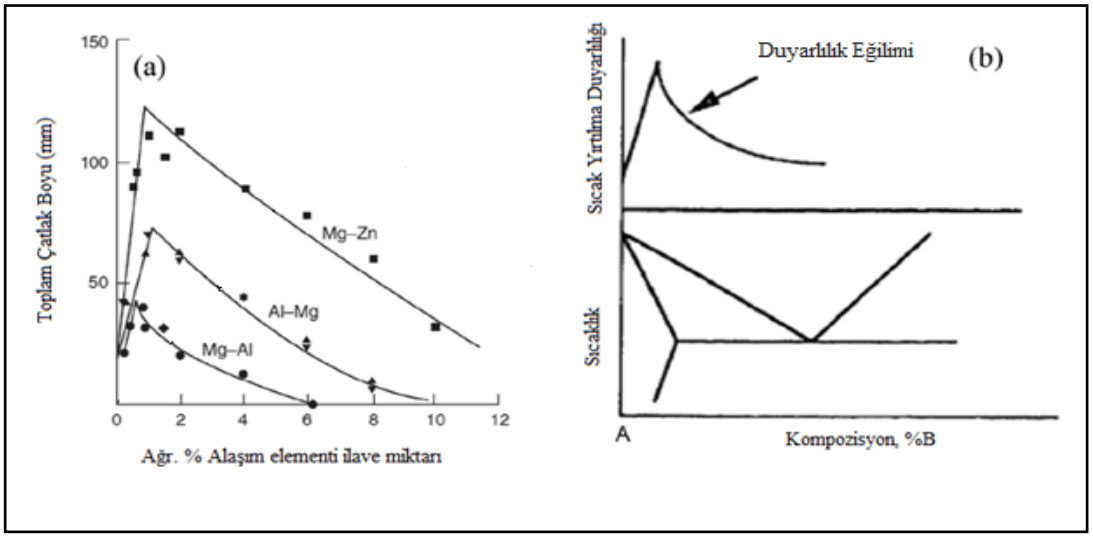
Alaşım elementi ilavesi ile tane inceltmesi konusunda geçmişte Mg-Al yapısına Si, Th, Ca, B, TiB_2, TiC gibi karbonlu yada karbonsuz ilaveler denenmiş olunup denemelerden sadece Sr diğerlerine göre daha başarılı olmuştur [6, 21].

3.6. Sıcak Yırtılma

Sıcak yırtılma döküm alaşımları için önemli bir kusurdur ve döküm ürünün kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Sıcak yırtılma oluşumu için literatürde, mekanik ve mekanik olmayan etkenler olmak üzere iki farklı mekanizma ön görülmüştür. Bu mekanizmalar yarı katı haldeki metallerin gerilim, gerinim ve gerilme oranı, katılaşma aralığı gibi öne sürülen teorilerden oluşmuştur [25].

Gerilime dayalı olan kriter için kritik bir değeri aşması halinde yarı katı haldeki malzemenin kırılacağı görüşü savunulmaktadır. Sıcak yırtılma eğilimi; katı fraksiyon değeri, yüzey enerjisi ile ters orantılı, sıvı filmin kalınlığı ile doğru orantılıdır. Gerinme / gerilme oranında ise katılaşma hızı sıcak yırtılma mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Magnin ve diğerlerinin oluşturduğu teoriye göre dökülecek kütüğün merkez kısmı sıcak yırtılmaya daha eğilimlidir ve yüksek döküm hızı yüksek sıcak yırtılma duyarlılığı oluşturmaktadır [25].

Yüksek saflıktaki metallerin sıcak yırtılmaya eğilimli olmadığı iyi bilinmekte ve bunun gerekçesi olarak saf metal sabit bir sıcaklıkta katılaştığı teorisi kabul edilmiştir. Az miktarda da olsa ilave bir metal olması halinde katılaşma olayı bir sıcaklık aralığında gerçekleşecek ve bu da sıcak yırtılma eğilimi gösterecektir. İkili magnezyum alaşımlarının çoğunun ötektik faz diyagramına sahip olduğu bilindiği için Şekil 3.4‘te ötektik faz diyagramı üzerinden katılaşma aralığı – sıcak yırtılma eğilimi ifade edilmiştir. Şekil 3.4’e ikili mg alaşımlarındaki ilave bileşen miktarının artımı ile sıcak yırtılmadan kaynaklanan toplam çatlak boyutu grafiği ve ötektik faz diyagramına göre sıcak yırtılma duyarlılığı grafiği verilmiştir [25].



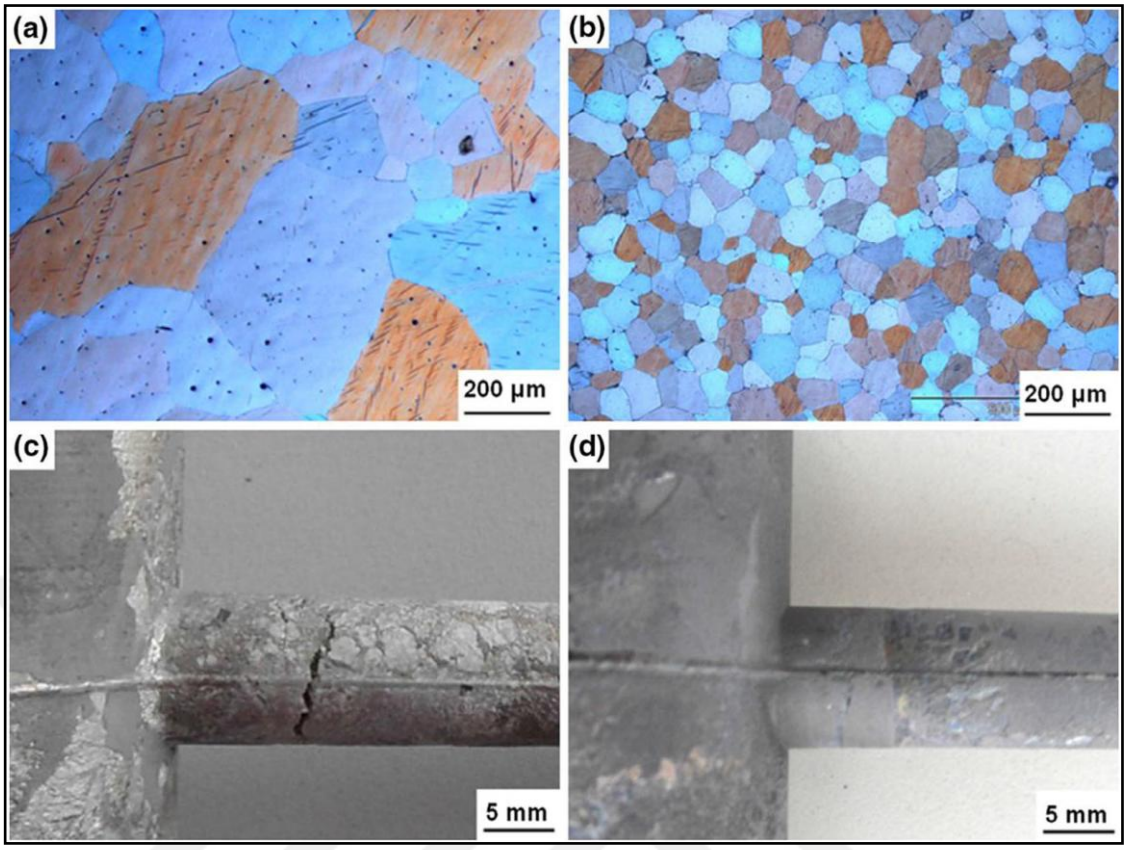
Şekil 3.4. Magnezyum alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılıkları; a) Alaşım elementi ilavesi türü ve miktarına göre sıcak yırtılma sonucu oluşmuş toplam çatlak boyutu, b) Ötektik faz diyagramı ile sıcak yırtılma duyarlılık eğilimi [25]

Günümüzde Mg-Al, Mg-Ca, Mg-Zn ve Mg-RE(Nadir toprak elementleri) gibi ikili, Mg-Al-Zn, Mg-Al-Ca, Mg-Al-Sr, Mg-Zn-Y ve Mg-Zn-Ca gibi üçlü alaşımların sıcak yırtılma davranışları incelenmiştir. Bu alaşımlardaki ilave miktarları değiştirilerek sıcak yırtılma konusundaki davranışlar hakkında yorumlar yapılmıştır [20]. Tablo 3.2'de çeşitli magnezyum alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılıkları verilmiştir.

Tablo 3.2. Bazı magnezyum alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılıkları [25]

Magnezyum Alaşımı	**Sıc. Yırtılma Duyarlılığı Oranı**
AZ91D	20
AM50A	44
AS21	69
AE42	94
AJ62	0
AX51	61

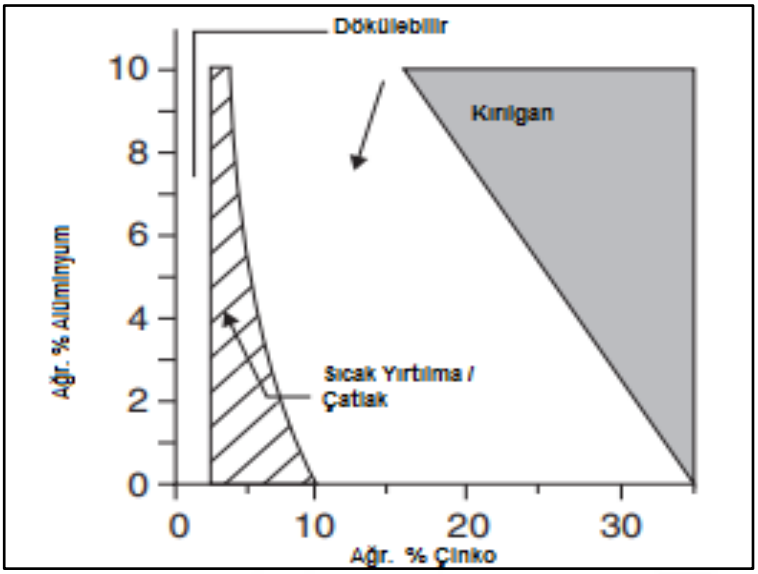
Tane boyutu ve morfolojisi sıcak yırtılma davranışları için oldukça önemlidir. Geçmişten bugüne kadar yapılan çalışmalar azalan tane boyutu ile sıcak yırtılma davranışlarında gelişmeler olduğu raporlanmış ve ilgili görseller Şekil 3.5'te verilmiştir [25].



Şekil 3.5. Tane boyutunun sıcak yırtılma davranışları etkisinin gözlemlenebilmesi için hazırlanan optik mikroskop görüntüleri ve makro görüntüler (a, c) Mg-4.5Zn 0.4Y, (b, d) Mg-4.5Zn-0.4Y-0.2Zr [25]

4. ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİ

Magnezyum alaşımlarının ortaya çıkmasından bu yana, saf magnezyumun özelliklerini geliştirebilmek için farklı alaşım elementi ilaveleri ile çok çaba harcanmıştır. Magnezyum kimyasal olarak aktiftir ve diğer metalik alaşım elementleriyle reaksiyona girerek intermetalik bileşikler oluşturmaktadır. İntermetalik fazın stabilitesi diğer elementin elektronegatifliği ile artar. Mekanik özeliklerin geliştirilmesi için ana mekanizma çökelti sertleştirmesi veya katı-çözelti sertleşmesidir. Katı çözelti sertleştirmesi atom yarıçaplarındaki farklılıklar ile belirlenirken çökeltme sertleşmesinin etkinliği esasen düşük sıcaklıklarda çözünürlüğün azalması, oluşan intermetaliğin magnezyum içeriği ve uygulama sıcaklığında kararlılığı üzerine kuruludur. 1920'li yıllara gelindiğinde alüminyum, magnezyum alaşımları için en önemli alaşım elementi haline gelmiştir. $Mg_{17}Al_{12}$ intermetaliği sayesinde alaşımın mukavemeti artmaktadır. Benzer etkileri mangan ve çinko ilavesi ile de görebilmekteyiz. Gümüş ve kalay ilaveleri yüksek sıcaklık özelliklerini pozitif yönde etkilerken demir, bakır ve nikel korozyon özelliklerini düşürdüğü için tercih edilmemektedir. Alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarına ilavesi konusunda optimum miktarların belirlenmesi için çalışmalar artarak devam etmektedir. Şekil 4.1' de magnezyuma ilave edilen alüminyum ve çinkonun ilave miktarlarına göre meydana çıkan karakteristikler verilmiştir. Aşağıda magnezyuma ilave edilen alaşım elementleri verilmiştir [4, 26, 27].

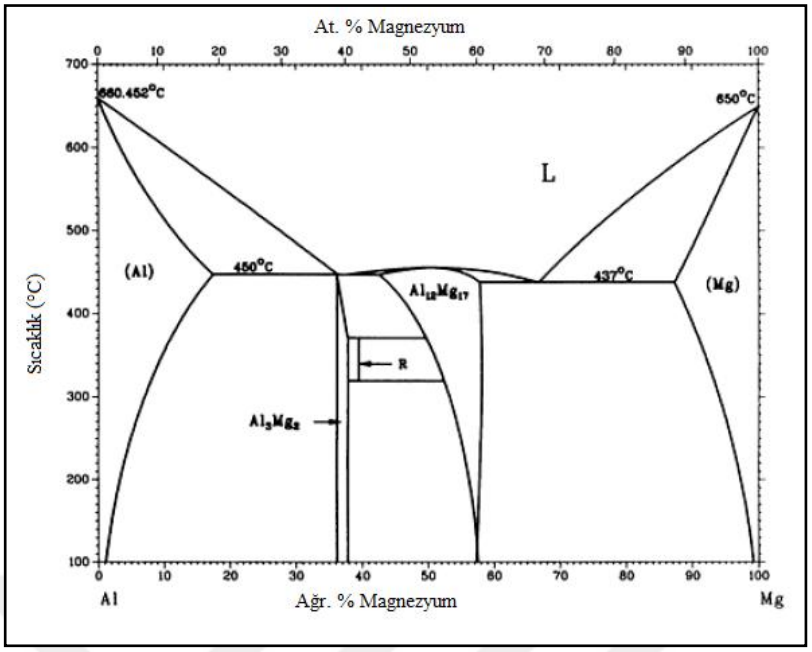


Şekil 4.1. Mg'a ilave edilen Al ve Zn' nin döküm özelliklerine etkisi [4].

4.1.Alüminyum

Alüminyum, çok sayıda verdiği pozitif katkı ile magnezyuma ilave edilen alaşım elementlerinin başında gelmektedir. Magnezyumun sahip olduğu düşük yoğunluk değerinde fazla bir kayıp oluşturmadan sertlik ve mukavemetin artmasını sağlamaktadır. Diğer yandan alüminyum ilavesi dökülebilirliği de artırmaktadır [1, 27]. Şekil 4.2'de Al-Mg faz diyagramı verilmiştir.

Magnezyum alaşımlarına genel itibariyle %2 ila 9 arasında ilave edilen alüminyum ayrıca %6'yı aşan ilavelerde ısıl işlem yapılarak mekanik özelliklerin daha da artması sağlanabilmektedir. Bazı alaşım elementleri, alüminyum ile birlikte magnezyum alaşımlarına ilave edilebilmektedir. Bu sayede daha fazla geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olunacaktır. Günümüzde AZ, AM, AS gibi üçlü magnezyum alaşımlarıyla sıkça karşılaşmaktayız [1, 27].



Şekil 4.2. Al-Mg Faz diyagramı [28]

4.2.Berilyum

Berilyum ilavesi çok az miktarda yapılmaktadır. Berilyum ilavesi döküm, ergitme ve kaynak proseslerinde yüzey oksidasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca tane kabalaşması sonucu da vermektedir [1, 27].

4.3. Kalsiyum

Kalsiyum ilavesi tane inceltme ve sürünme direnci için kullanılabilmektedir. Ayrıca kalsiyum magnezyum alaşımlarının korozyon özelliklerini, termal ve mekanik özelliklerini geliştirebilmektedir [1, 27].

4.4. Bakır

Magnezyum alaşımlarına ilave edilen bakır, yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirirken korozyon direncini ve sünekliği düşürmektedir. Ayrıca bakırın magnezyum içerisindeki katı çözünürlüğü sınırlıdır ve bakır ve magnezyum Mg_2Cu intermetaliğini oluşturmaktadır [1, 27].

4.5. Demir

Demir, magnezyum alaşımları için korozyon hususu başta olmak üzere zararlı bir alaşım elementidir [1].

4.6. Lityum

Lityum ilavesi, mukavemeti düşürürken sünekliği artırmaktadır ve alaşıma ilave edilen lityum yoğunluğu da düşürmektedir [1].

4.7. Mangan

Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarına ilave edilen mangan, bu alaşımların tuzlu sudaki korozyon direncini artırmaktadır. Manganın magnezyum içindeki çözünürlüğü sınırlı olduğu için ilave miktarları düşük olmaktadır. Bunun yanı sıra genelde alüminyum ile birlikte magnezyuma ilave edilmektedir [1, 27].

4.8.Nikel

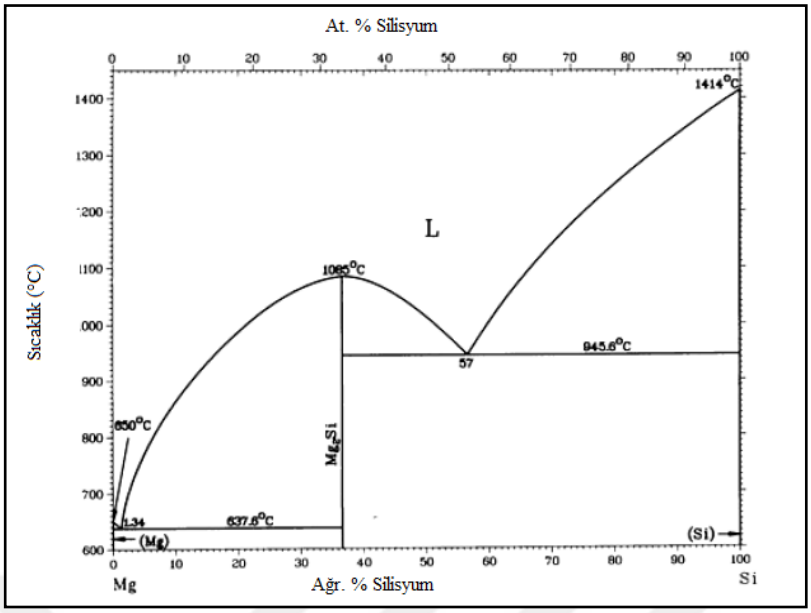
Nikelin magnezyum içinde katı çözünürlüğü sınırlıdır. Mg ve Ni bir araya gelerek Mg_2Ni intermetaliğini oluşturmaktadır ve nikel ilavesi oda sıcaklığında mukavemet değerlerini artırmaktadır. Bunun yanı sıra korozyon direncini düşürmesi tercih edilmeme sebebidir [1].

4.9. Nadir Toprak Elementleri

Nadir toprak elementleri, yüksek sıcaklık dayanımı, sürünme direnci ve korozyon direnci gibi özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilmektedir. Oldukça maliyetli olan bu elementler öncelik olarak ileri teknoloji alaşımlarında kullanılmaktadır [1].

4.10. Silisyum

Silisyum, ergiyiklerin akışkanlığını artırabilmektedir. Ancak demir ile birlikte kullanılması korozyon direnci için çok ciddi bir tehlikedir. Özellikle sürünme direncini artırmak için doğru bir seçim olacaktır ve genel itibariyle basınçlı döküm yönteminde kullanılması tavsiye edilmektedir [27]. Şekil 4.3'te Mg-Si faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.3. Mg-Si Faz diyagramı [28]

4.11. Gümüş

Gümüş, nadir toprak elementleri ile birlikte ilave edildiğinde yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme direnci gibi özellikleri geliştirebilmektedir [1].

4.12. Stronsiyum

Stronsiyum normalde diğer ana alaşım elementleri ile birlikte magnezyuma ilave edilmektedir. Stronsiyum sürünme direncini artırır fakat mukavemet değerlerine önemli bir etki göstermemektedir [1, 27].

4.13. Toryum

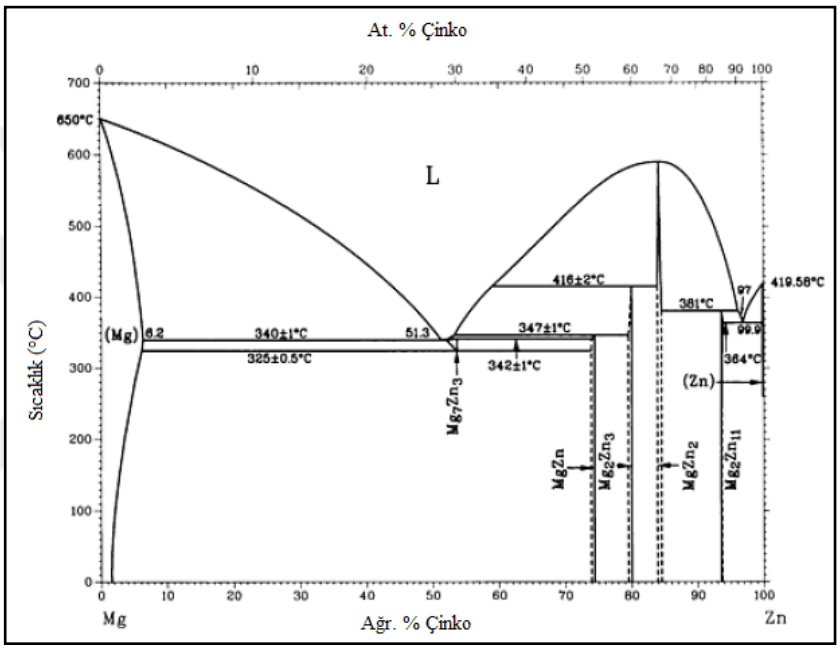
Toryum ilavesi 370°C'ye kadar sürünme direncinin artmasını sağlamaktadır. Çinko içeren magnezyum alaşımlarına ilave edildiğinde kaynaklanabilirliği artırmaktadır [1].

4.14. Titanyum

Titanyum ve magnezyumun karşılıklı olarak çözünürlükleri çok kısıtlıdır. Ti ve Mg arasında intermetalik oluşmamasıyla beraber Ti ilavesi ile mukavemet ve süneklik artışı gözlemlenebilmektedir [1].

4.15. Çinko

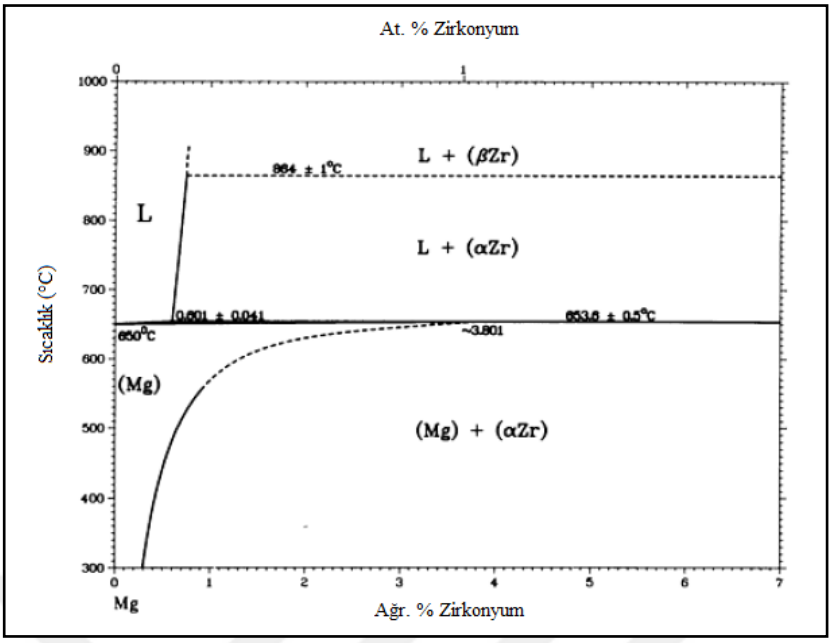
Magnezyuma ilave edilen alaşım elementlerinden en çok karşımıza çıkanlardan biri de çinkodur. Alaşıma genellikle alüminyum ile birlikte ilave edilmektedir. Nikel ve demir gibi safsızlıklara sahip olunan alaşımlarda korozyon direncinin geliştirilmesinde kullanılabilmektedir. Mukavemet artımı sağlayan çinko ilavesinde farkın belirgin bir şekilde ortaya çıkması için farklı alüminyum miktarları ile kombine edilmelidir [1, 27]. Şekil 4.4'te Mg-Zn faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.4. Mg-Zn Faz diyagramı [28]

4.16. Zirkonyum

Zirkonyum, alüminyum içermeyen magnezyum alaşımlarında mükemmel bir tane inceltici olarak görev yapmaktadır. [1, 27]. Şekil 4.5'te Mg-Zr faz diyagramı verilmiştir.



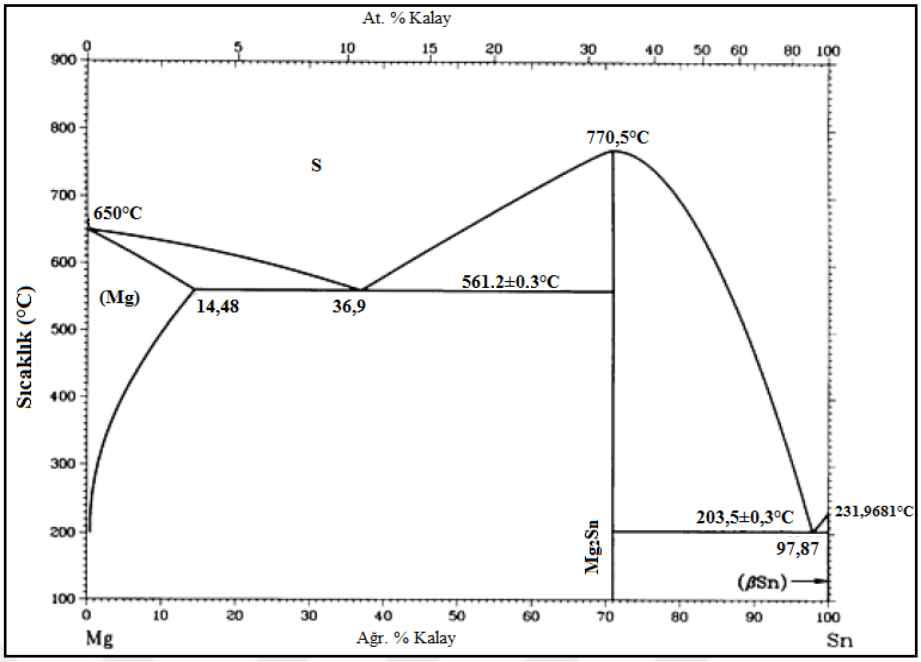
Şekil 4.5. Mg-Zr Faz diyagramı [28]

4.17. İtriyum

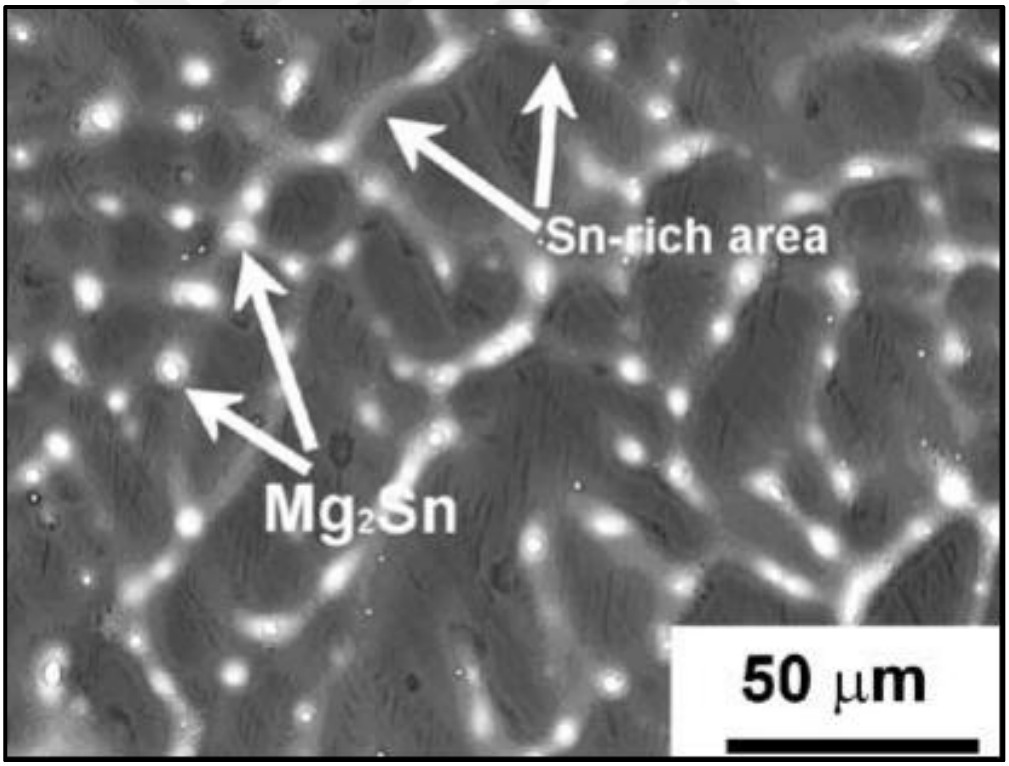
İtriyum, magnezyumda nispeten yüksek katı çözünürlüğüne sahiptir. Yüksek sıcaklık dayanımını ve sürünme direncini geliştirebilmesi için nadir toprak elementleri ile birlikte kullanılmaktadır [1, 27].

5. Mg-Sn ALAŞIMLARI

Yıllardır süregelen magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi çalışmaları özellikle son yıllarda artarak devam etmektedir. Otomotiv sektöründe ticari olarak en çok kullanılan ve beklentileri karşılayan magnezyum alaşımı AZ alaşım grubudur. Sağladığı pozitif özellikleri ile otomotiv sektöründeki magnezyum kullanımının %90' ını oluşturan AZ alaşım grupları düşük sürünme direnci göstermektedir. Bu çerçevede mekanik özellikleri geliştirmek ve sürünme direncini artırmak için magnezyuma alaşım elementi ilavelerinden kalay ilavesi karşımıza çıkmaktadır [4]. Şekil 5.1' de görülen magnezyum-kalay faz diyagramına göre kalayın geniş bir sıcaklık aralığında katı çözünürlüğü bulunmaktadır. Katılaşma sırasında termal olarak kararlı Mg_2Sn intermetaliği oluşmaktadır. Oluşan bu intermetaliğin ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 770 °C'dir. Bu kararlı intermetaliğin varlığı Mg-Sn alaşımlarının üzerindeki çalışmaların artmasına yol açmaktadır. Şekil 5.2'de Mg-Sn alaşımının SEM görüntüsü verilmiştir. İlgili görüntüde tane sınırlarında paralak kontrastta Mg_2Sn'nin, sönük görünümlü kontrastta ise kalayca zengin fazın bulunduğu gösterilmiştir [29].



Şekil 5.1. Mg-Sn Faz diyagramı [28]



Şekil 5.2. Mg-Sn alaşımlarında Mg_2Sn intermetaliğinin SEM görüntüsü [29]

Magnezyum alaşımlarına kalay ilavesi için daha önce yapılan çalışmalarda Kato H. ve diğerleri tarafından Mg-Al-Ca alaşımına kalay ilave ederek incelemeler gerçekleştirmiştir. Yüksek ısıl dirence sahip olan bu alaşıma kalay ilavesi ile dökülebilirliğin arttığı ve ısıl direnç özelliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Kalay

ilavesinin ötektik faz miktarını bir miktar arttırdığı ve iç yapıdaki gerilimleri engellediği ifade edilmiştir [30].

Bir diğer çalışmada Hort N., Kainer K.U. ve diğerleri tarafından Mg-Sn-Ca alaşımlarının sürünme dirençleri incelenmiş olunup kalay ilavesinin magnezyum alaşımlarında sürünme direncine pozitif bir etki sağladığı ifade edilmiştir [29].

You J. H. Ve diğerleri tarafından Mg alaşımlarının ısıl direncini artırmak amacıyla yapıya Sn, Sr, Si ve Ca ekledikleri görülmüştür. Oluşturulan döküm alaşımlarında α-Mg, Mg_2Sn, Mg_2Si, MgSnSr gibi fazlar gözlenmiştir. Ayrıca son yıllarda yüksek sıcaklık uygulamaları için Mg-Sn-Ce, Mg-Sn-Nd, Mg-Sn-Zn gibi alaşımların denendiği yazarlar tarafından ifade edilmiştir [31].

Zhao C. ve diğerleri Mg-Sn alaşımlarını ortopedik uygulamalarda kullanımı için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada magnezyuma %1 ve 3'lük kalay ilaveleri yapılırken ayrıca oluşturulan numunelere ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Mikroyapıda α-Mg ve Mg_2Sn yapılarının gözlendiği, kalay miktarının artışı ile birlikte ortalama tane boyutunda bir miktar düşüşün gözlendiği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda biyobozunur bir malzeme olarak kullanılması temenni edilen ekstrüzyon yapılmış alaşım gruplarında yapıdaki kalay miktarının artması ile beraber çekme ve akma mukavemetlerinde artış, elastiklikte de düşüş meydana geldiği ifade edilmiştir [32].

Chen Y. ve diğerleri Mg-5Sn-3Zn yapısına farklı oranlarda (%0,2 – 0,8 arası) itriyum ederek incelemelerini yapmıştır. İtriyumun tane inceltici özelliğinin dışında yapıda yüksek stabiliteye sahip MgSnY fazına katıldığı ifade edilmiştir. Artan itriyum ile beraber MgSnY fazının arttığı gözlenmiş ve yapıda ayrıca Mg_2Sn, Mg_2Zn yapılarının da oluştuğu gösterilmiştir. %0,5 Y ilavesi ile çekme mukavemet değeri 229 MPa ulaşmıştır [33].

Kang D. H. ve diğerleri Mg-Sn-Al-Si alaşımlarını sürünme ve yüksek sıcaklık uygulamaları için incelemiştir. Buna göre tane sınırlarında termal olarak kararlı Mg_2Sn ve Mg_2Si fazlarının oluştuğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen TAS831(Mg-Sn-Al-Si) alaşımı ile çalışmaya konu olan hususlar hakkında AZ91 gibi

endüstride çok karşılaşılan magnezyum alaşımından daha üstün özelliklerin elde edildiği belirtilmiştir [34].

Zhao C. ve diğerleri Mg-Sn alaşımlarındaki kalay oranının sertleştirilebilirlik için etkisini araştırmıştır. Buna göre artan kalay miktarının bu karakteristik özelliği olumsuz etkilediği fakat akma mukavemeti ve uzamanın ise arttığı ifade edilmiştir [35].

Wang Y. ve diğerleri Mg-Sn-Zn alaşımına Cu ekleyerek ortaya çıkan özellikleri ve karakteristikleri incelemiştir. Yapıya ilave edilen bakır ile MgZnCu fazının oluştuğu ve bu fazın ortalama tane boyutunda bir azalma meydana getirdiği belirtilmiştir [36].

Liu C. Q. ve diğerleri %9,8Sn içeren Mg-Sn alaşımında meydana gelen Mg_2Sn intermetaliğinin karakteristiğini incelemiştir. Geleneksel çökelmelerin aksine bu intermetaliğin yüzey merkezli kübik olduğu ifade edilmiştir. Bu fazın metastabil bir faz olduğu belirtilip fazın plaka morfolojisine sahip olduğu ifade edilmiştir [37].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Mg-Sn-Si Alaşımlarının Dökümü

Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların döküm işlemi KOÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü döküm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi için Inductotherm marka 15 kw gücünde indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 1100^0C sıcaklığa çıkabilen bu indüksiyon ocağında ergitme işlemi yapılırken grafit pota kullanılmıştır. Magnezyum metalinin var olan yanma-oksitlenme özelliği nedeniyle ergitme ve döküm işleminde koruyucu atmosfer kullanılmıştır. Bu çalışma için koruyucu atmosfer Ar gazı seçimi yapılmıştır. Ayrıca döküm işleminde yer alan tüm metaller saf hallerinde kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Döküm işleminde kullanılan İndüksiyon ocağı ve Argon tüpü

Döküm işlemine ilk olarak master alaşımlarının oluşturulması ile başlanmıştır. Bu bağlamda Mg-5Sn ve Mg-10Sn olmak üzere 2 master alaşım elde edilmiştir. Döküm işlemi için pota hacmi metaller ile tamamen doldurulmuştur. Bu işlem için magnezyum ve kalay miktarları toplamı 2 kg olacak şekilde ayarlanmıştır. Ergitme işlemi indüksiyon ocağında kullanılan güce göre 40-50 dakika sürmüştür. Bu süre boyunca argon gazı koruyucu atmosfer olarak kullanılmıştır. Ergimenin ardından sıvı metal çelik kalıplara dökülmüştür ve yine dökülürken argon gazı koruyucu atmosfer olarak kullanılmıştır. Bu işlem iki master alaşım için de uygulanmıştır.



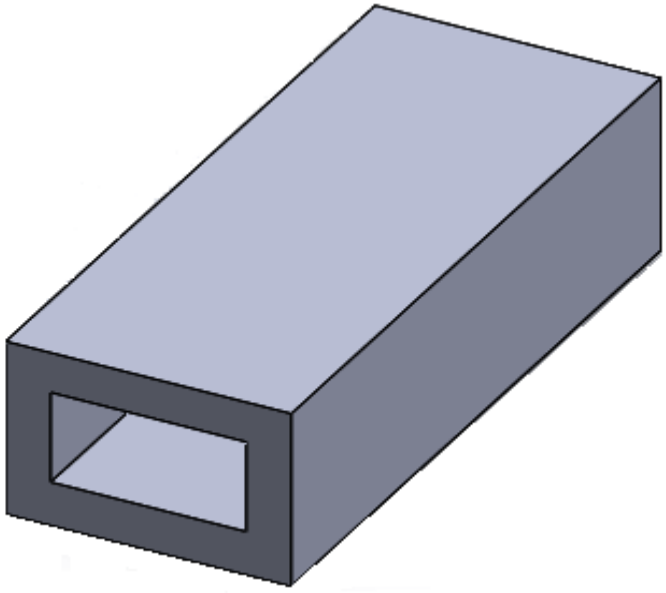
Şekil 6.2. Döküm işleminin gerçekleştirildiği laboratuvar görünümü

Master alaşımların katılaşması ve soğumasının ardından daha sonraki ergitmelerde kullanılması amacıyla 4 eşit parçaya bölünmüştür. Eşit parçalara bölünmesi işlemi sırasında oluşan talaşlar ve kayıplar neticesinde yaklaşık olarak 480 gram' lık 4 eşit parçaya meydana gelmiştir.

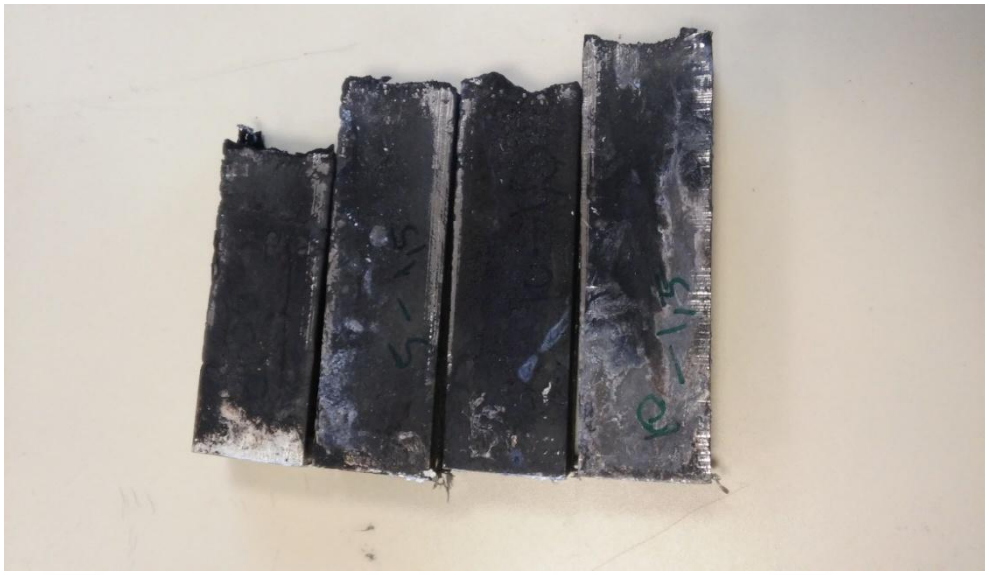


Şekil 6.3. İndüksiyon ocağı ve koruyucu gaz uygulaması

Her iki master alaşımında 4 eşit parçaya bölünmesinin ardından birer döküm parçasına başka alaşım elementi ilave edilmez iken diğer kalan üçer döküm parçasına sırasıyla ağırlıkça % 0,5-1,0-1,5 oranlarında silisyum ilavesi için hassas bir şekilde silisyum miktarları hesaplanmıştır. Silisyum ilave edilecek 6 bileşim indüksiyon ocağında ayrı ayrı ergitilip, silisyum ilaveleri ergiyiğin içine atılıp çözünmesi beklenmiştir. Yine master alaşımların dökümünde olduğu gibi koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılıp, hem ergitme hem de döküm esnasında uygulanmıştır. Döküm işlemi için bu işlemde de aynı çelik kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Döküm işleminin gerçekleştirildiği metal kalıp görüntüsü



Şekil 6.5. Döküm işlemi neticesinde ortaya çıkan magnezyum numuneler

6.2. Mikroyapısal İncelemeler

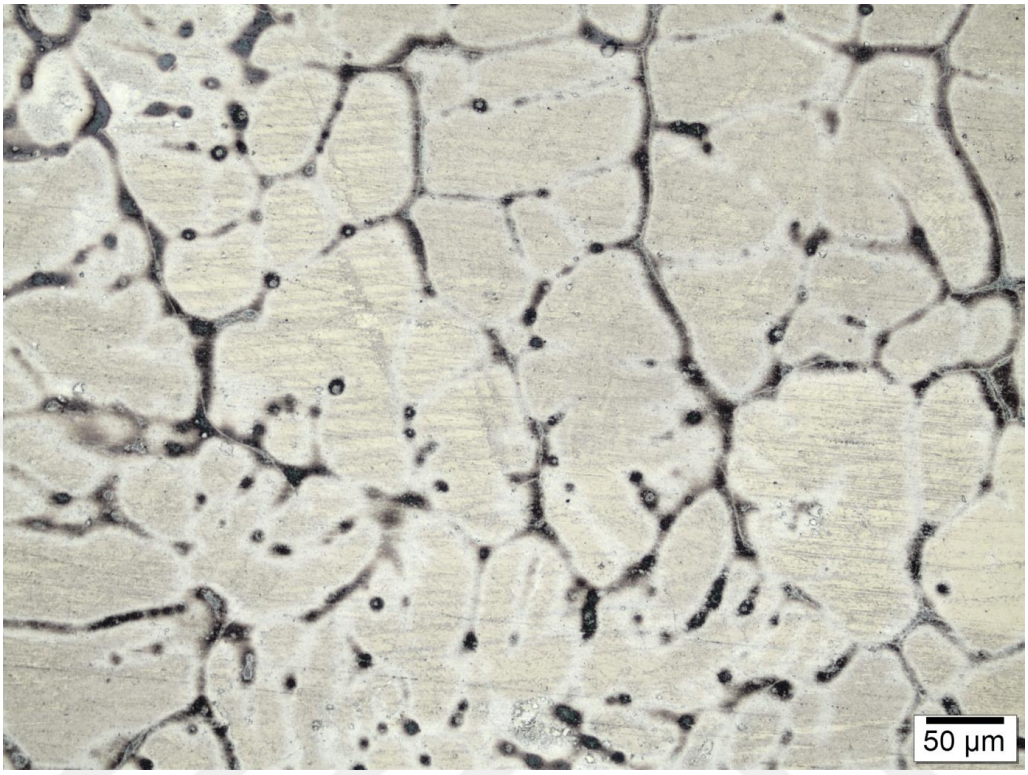
Döküm sonrası elde edilen külçelerden mikroyapısal karakterizasyon yapılabilmesi için eşit boyutlarda numuneler kesilmiştir. Kesilen numuneler metalografik işlemlere tabi tutulup optik mikroskopta incelenebilecek hale getirilmiştir. Bu bağlamda tüm numuneler sırasıyla 120, 320, 600, 1000 ve 2000 mesh'lik SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama kademesinin ardından tüm numuneler parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminde 3µm'lik elmas solüsyon ve parlatma sıvısı (%70 etil alkol + %30 etilen glikol) kullanılmıştır. Yeterli parlaklığın elde edildiği düşünüldüğünde metalografinin son aşaması olan dağlamaya geçilmiştir. Dağlama işlemi magnezyum alaşımları için de kullanılan dağlayıcı ile yapılmıştır. Dağlayıcı bileşimi aşağıda verilmiştir. Dağlama işlemi numunenin behere daldırılıp yaklaşık olarak 10 saniye bekletilmesi ardından alkol ile yıkanıp hava ile kurutulması ile tamamlanmıştır.

Dağlayıcı : 5 ml Asetik asit + 6 g Pikrik asit + 10 ml Su + %95' lik 100 ml Etil alkol.

Dağlama işleminden sonra numunelerin Olympus marka optik mikroskop ve Jeol JSM 6060 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri sırasında optik mikroskop için her numunede sırasıyla 5x, 10x, 20x, 50x ve 100x büyütmelerde görüntüler alınmıştır.

6.2.1. Optik mikroskop incelemeleri

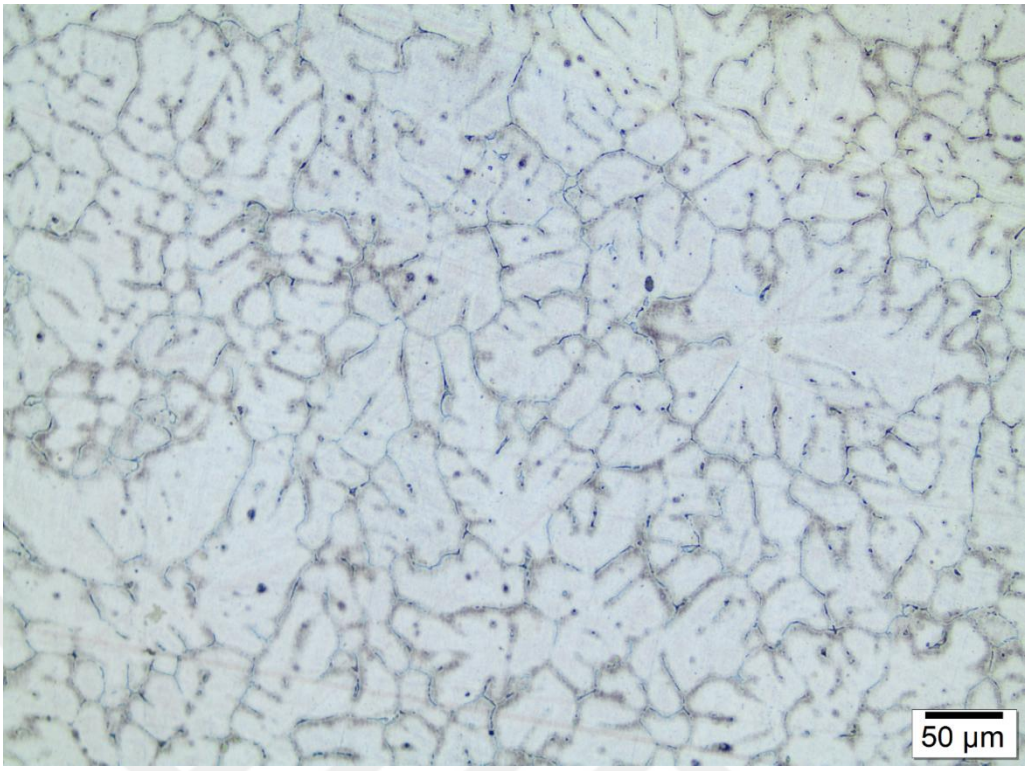
Şekil 6.6'da Mg-5Sn alaşımına ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.6. 20x büyütmede Mg-5Sn numunesi mikroyapı görüntüsü

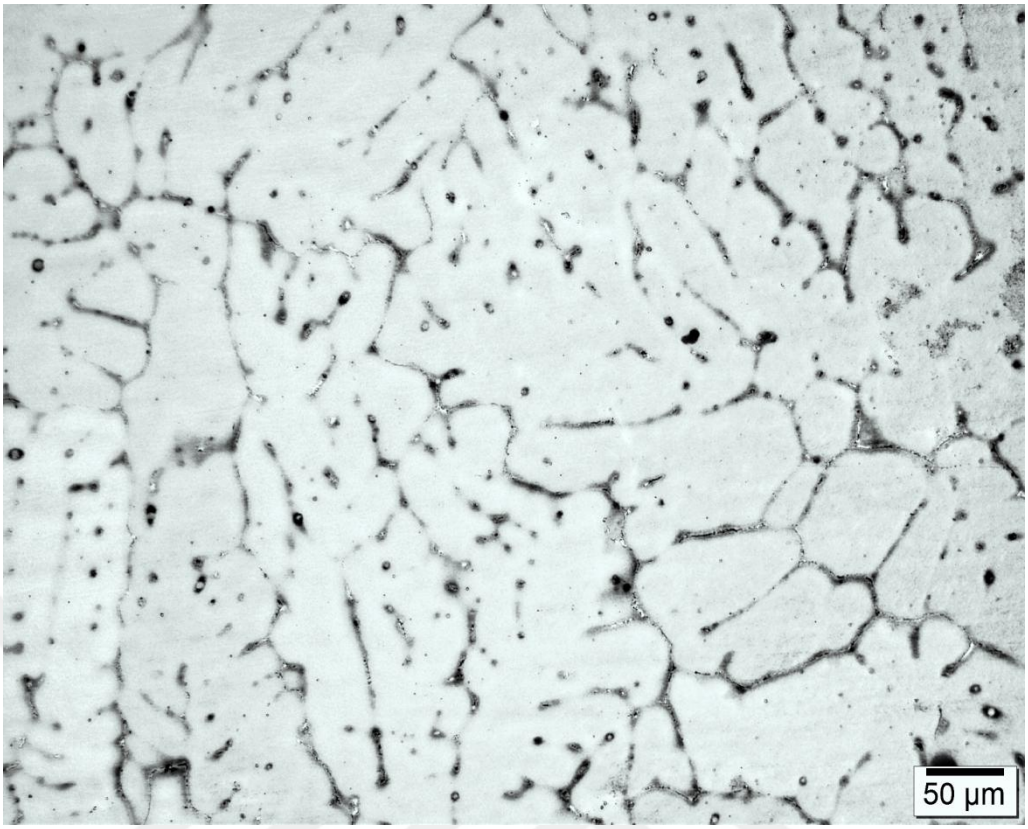
Tipik bir döküm yapısı olarak gözlenen Mg-5Sn alaşımında tane sınırlarında koyu kontrastlı bir faz oluşumu gözlenmektedir. Bu koyu kontrastlı fazların Mg_2Sn olduğu literatürde ortaya koyulmaktadır. Ayrıca tane sınırlarında oluşan bu intermetaliğin dışında kalayca zengin bölgelerin varlığından da bahsedilebilmektedir. Yapılan incelemelerin daha doğru ve nitelikli sonuçlar vermesi amacıyla numunelerde SEM, EDS ve XRD incelemeleri gerçekleştirilecektir.

Şekil 6.7'de Mg-5Sn-0,5Si alaşımının mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Mg-5Sn alaşımına ilaveten yapıda bulunan silisyum, yapıda bulunan magnezyum ile Mg_2Si intermetaliğini oluşturmakta ve bu intermetalik tane sınırlarında Mg_2Sn intermetaliğine göre daha açık kontrastlı olarak gözlenmektedir.



Şekil 6.7. 20x büyütmede Mg-5Sn-0,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü

Şekil 6.8'de Mg-5Sn-1,0Si alaşımının mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Mg-5Sn-0,5Si alaşımının mikroyapı özelliklerini genel itibariyle taşıyan bu alaşımda silisyum miktarının artmasıyla Mg_2Si miktarının arttığı gözlenmektedir.

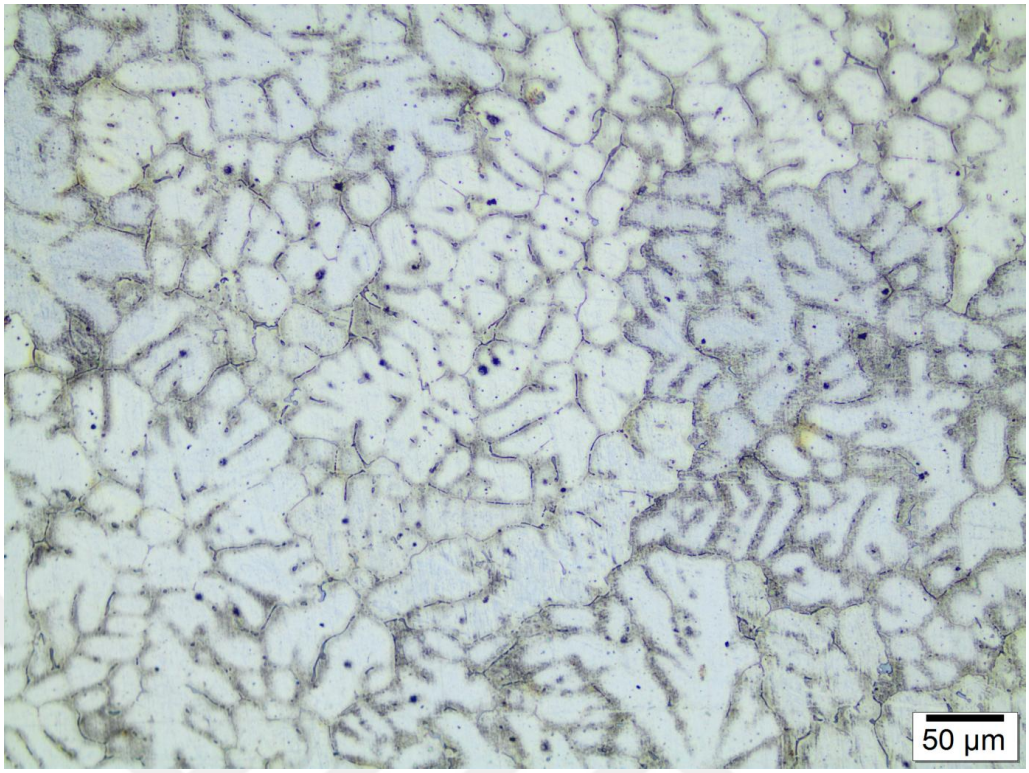


Şekil 6.8. 20x büyütmede Mg-5Sn-1,0Si numunesi mikroyapı görüntüsü

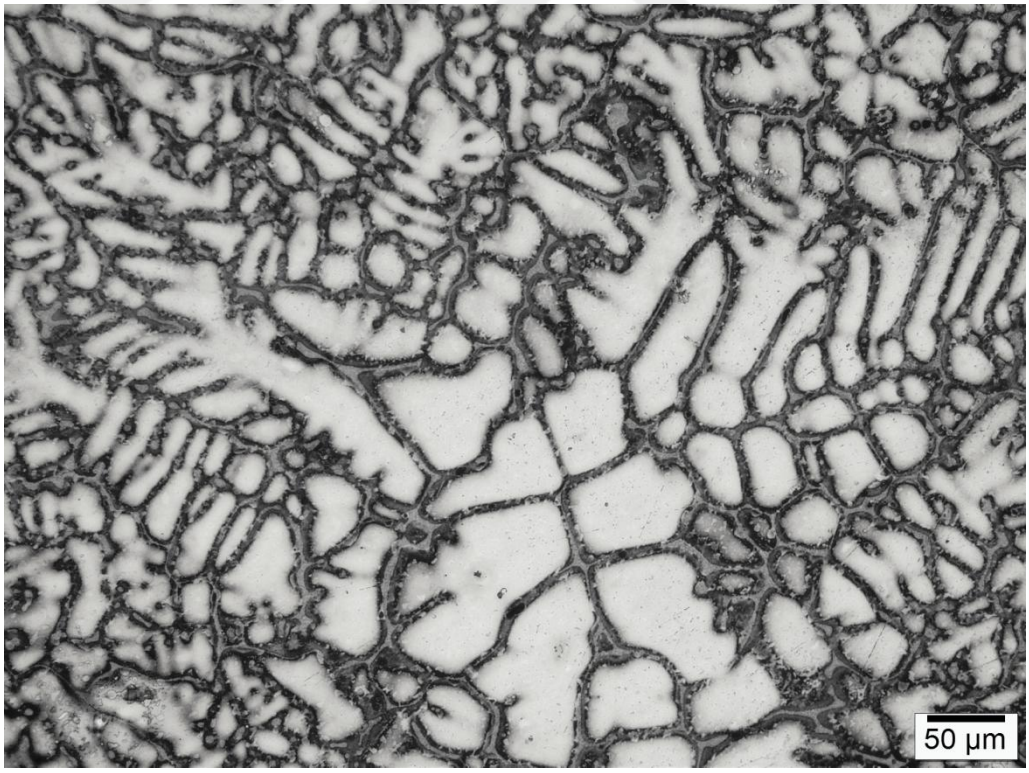
Şekil 6.9'da Mg-5Sn-1,5Si alaşımının mikroyapısı görülmektedir. Silisyum içeren diğer Mg-5Sn alaşımları ile temel anlamda benzerlik gösteren bu alaşımda Mg_2Si miktarının arttığı gözlenmektedir.

Mg-5Sn-xSi alaşımları kendi içerisinde değerlendirildiğinde yapıların tamamında aynı intermetalikler gözlemlenirken, silisyum içeren intermetaliklerin ilave edilen silisyum miktarının artmasıyla beraber daha belirgin olarak gözlendiği görülmüştür.

Şekil 6.10'da Mg-10Sn alaşımın mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Yapı Mg-5Sn'de olduğu gibi tipik bir döküm yapısı ihtiva etmekte ve tane sınırlarında Mg_2Sn intermetaliklerinin oluşumu gözlenmektedir.

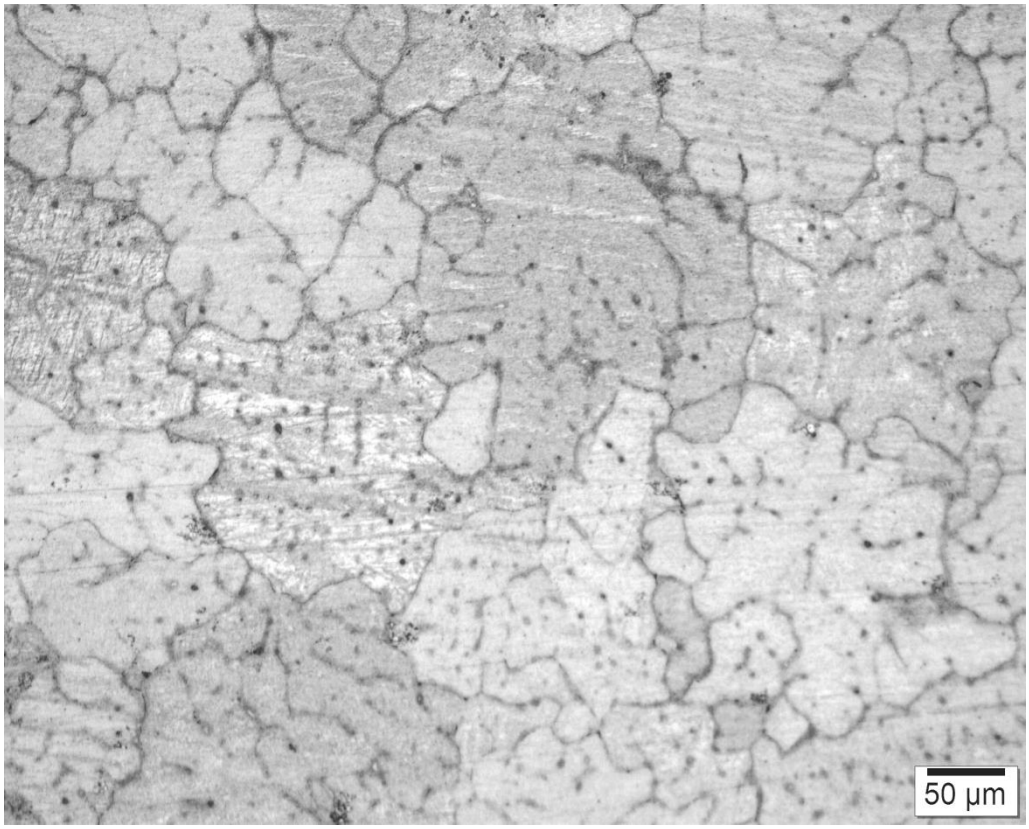


Şekil 6.9. 20x büyütmede Mg-5Sn-1,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü



Şekil 6.10. 20x büyütmede Mg-10Sn numunesi mikroyapı görüntüsü

Şekil 6.11'de Mg-10Sn-0,5Si alaşımının mikroyapısı gözlenmektedir. Mikroyapı silisyum içeren diğer alaşımlara benzerlik göstermekle beraber %5 kalay içeren alaşımlara göre bir miktar daha fazla tane sınırlarında Mg_2Sn içermektedir.



Şekil 6.11. 20x büyütmede Mg-10Sn-0,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü

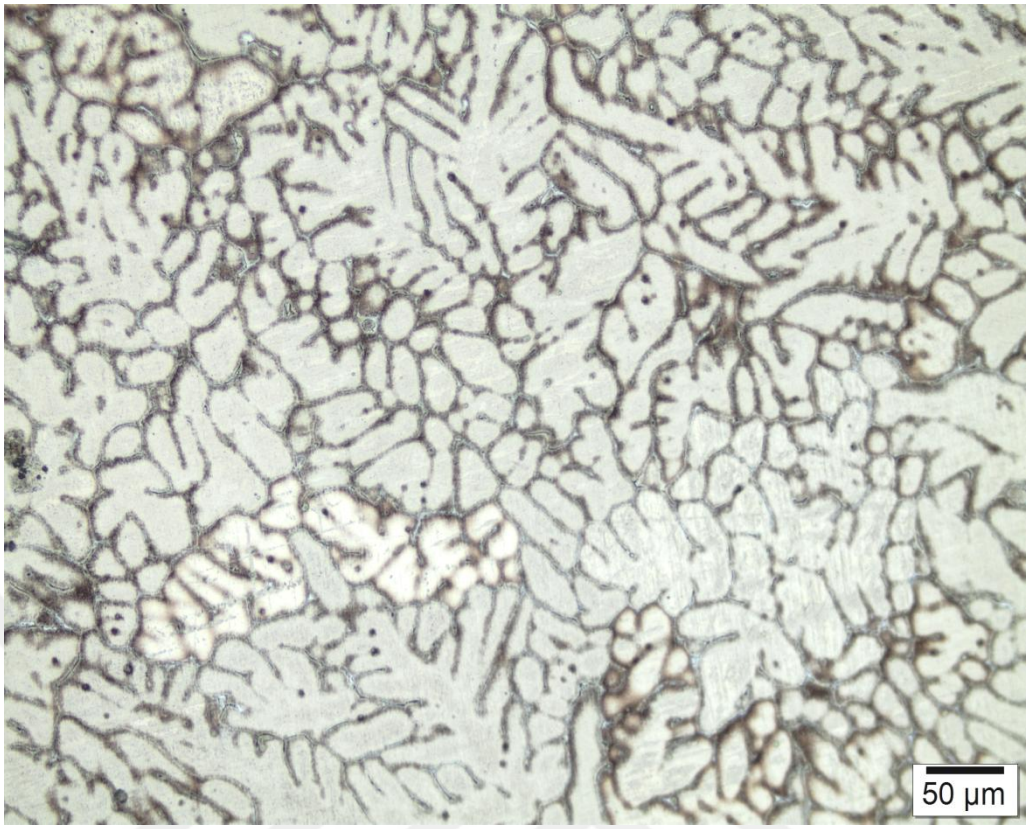
Şekil 6.12'de Mg-10Sn-1,0Si alaşımının mikroyapısı verilmiştir. Buna göre Mg-10Sn-0,5Si alaşımına benzerlik gösteren bu alaşımda yine aynı intermetaliklerden bahsedilmesi söz konusudur.



Şekil 6.12. 20x büyütmede Mg-10Sn-1,0Si numunesi mikroyapı görüntüsü

Şekil 6.13'te Mg-10Sn-1,5Si alaşımının mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Çalışmadaki tüm alaşımlar arasında alaşım elementlerini en fazla bünyesinde bulunan bu numunede diğer alaşımlarda gözlenen özellikler bir miktar daha fazla gözlenmektedir.

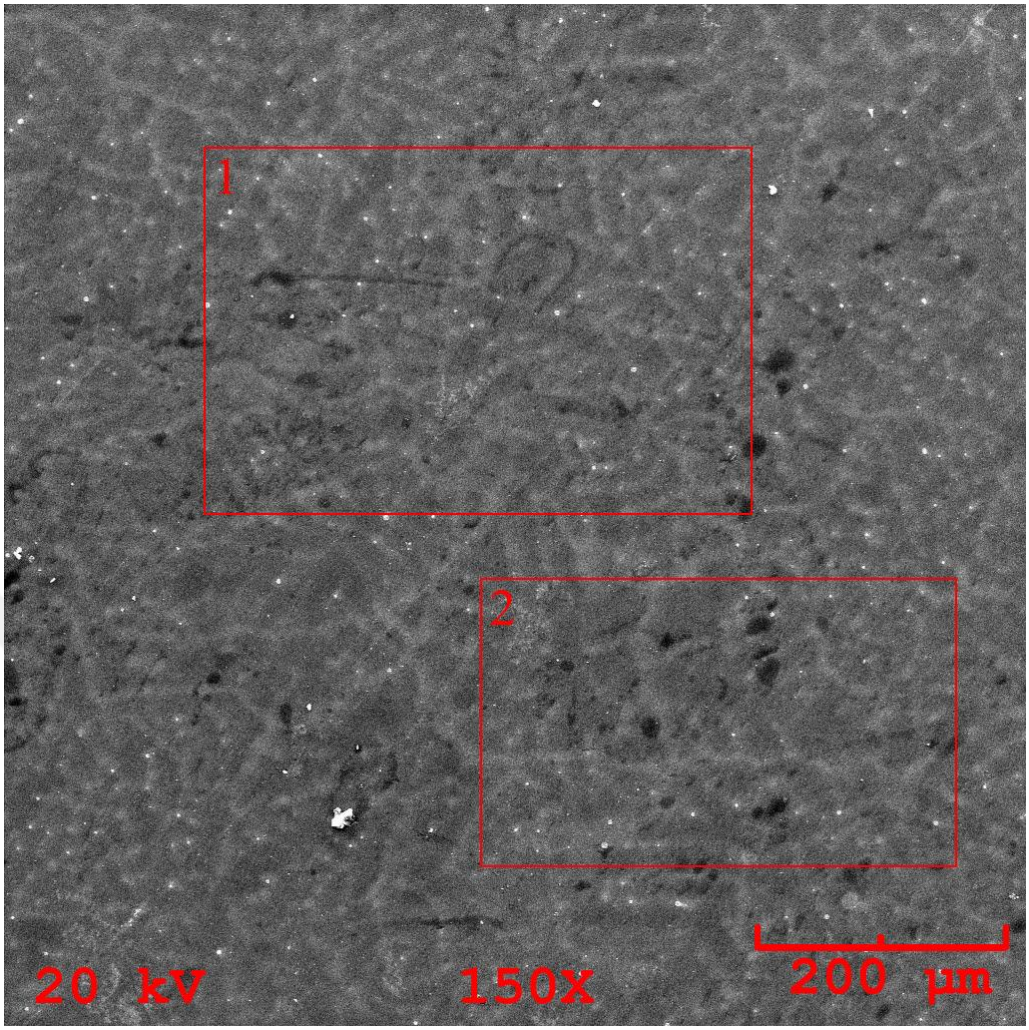
Çalışmadaki tüm alaşımların optik mikroskopta incelenmesi ile benzer yorumlar yapılmıştır. Ortalama tane boyutunda meydana gelen bir miktar azalma dikkati çekmekte ve intermetaliklerin artmasıyla beraber mekanik özelliklerin değişiminin yorumlanması için açık kapı bırakılmıştır.



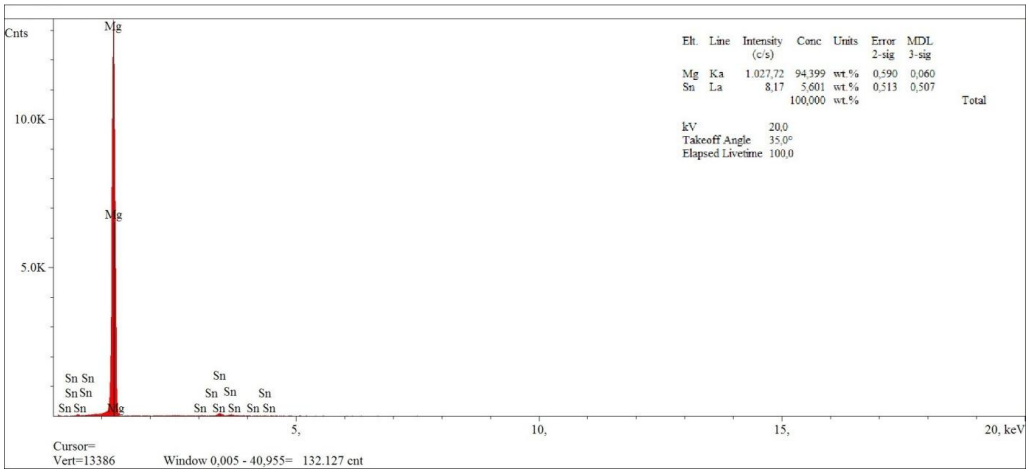
Şekil 6.13. 20x büyütmede Mg-10Sn-1,5Si numunesi mikroyapı görüntüsü

6.2.2. SEM incelemeleri

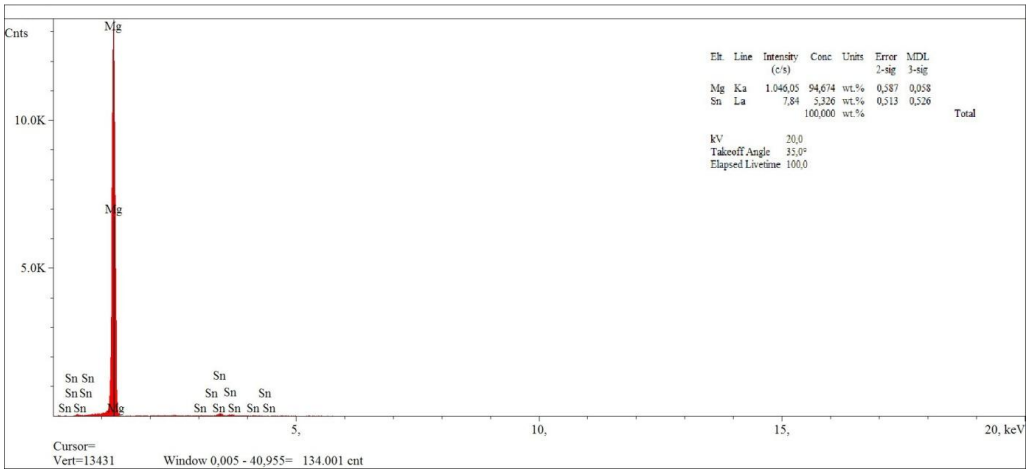
Tüm numuneler optik mikroskop incelemelerinin ardından oluşan yapı/fazlar hakkında daha detaylı bilgi sahibi olunabilmesi için taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Ayrıca bazı numuneler için EDS analizleri gerçekleştirilip ilgili yorumlar yapılmıştır. Şekil 6.14'te Mg-5Sn alaşımı için çekilen SEM görüntüsü, Şekil 6.15 ve 6.16'da ise ilgili SEM görüntüsünde verilen 1 ve 2 numaralı bölgeler için gerçekleştirilen EDS analizleri verilmiştir. Bu çerçevede yapıda ortalama olarak % 5 oranında kalay bulunduğu gözlenmiştir. Ayrıca tane sınırlarında literatürde olduğu gibi parlak bir kontrastla görülen Mg_2Sn intermetaliklerinin varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.14. Mg-5Sn alaşımının SEM görüntüsü

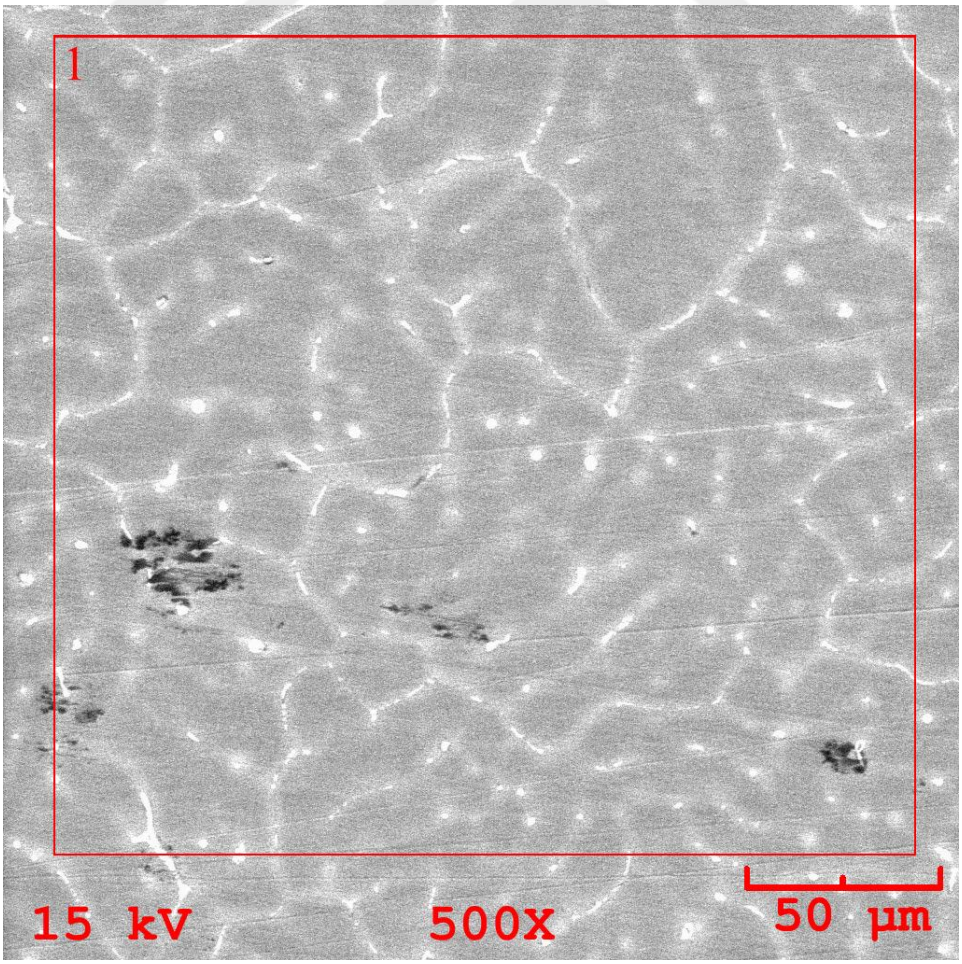


Şekil 6.15. Mg-5Sn SEM görüntüsü 1 nolu bölge analizi

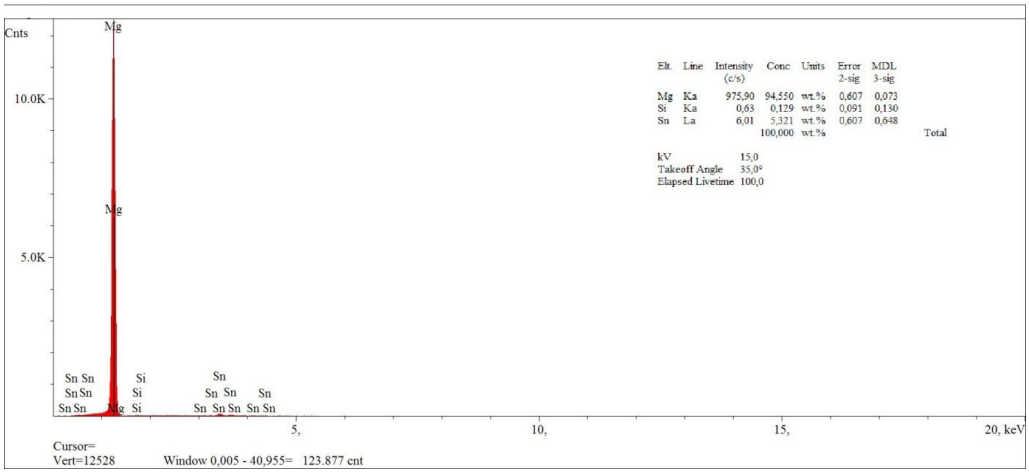


Şekil 6.16. Mg-5Sn SEM görüntüsü 2 nolu bölge analizi

Şekil 6.17'de Mg-5Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü Şekil 6.18'de ise bu görüntüdeki 1 numaralı bölgenin EDS analizi sonucu verilmiştir. Bu çerçevede yapıda ortalama olarak %5 oranında kalay, %0,1 oranında silisyumun mevcut olduğu gözlenmiştir.

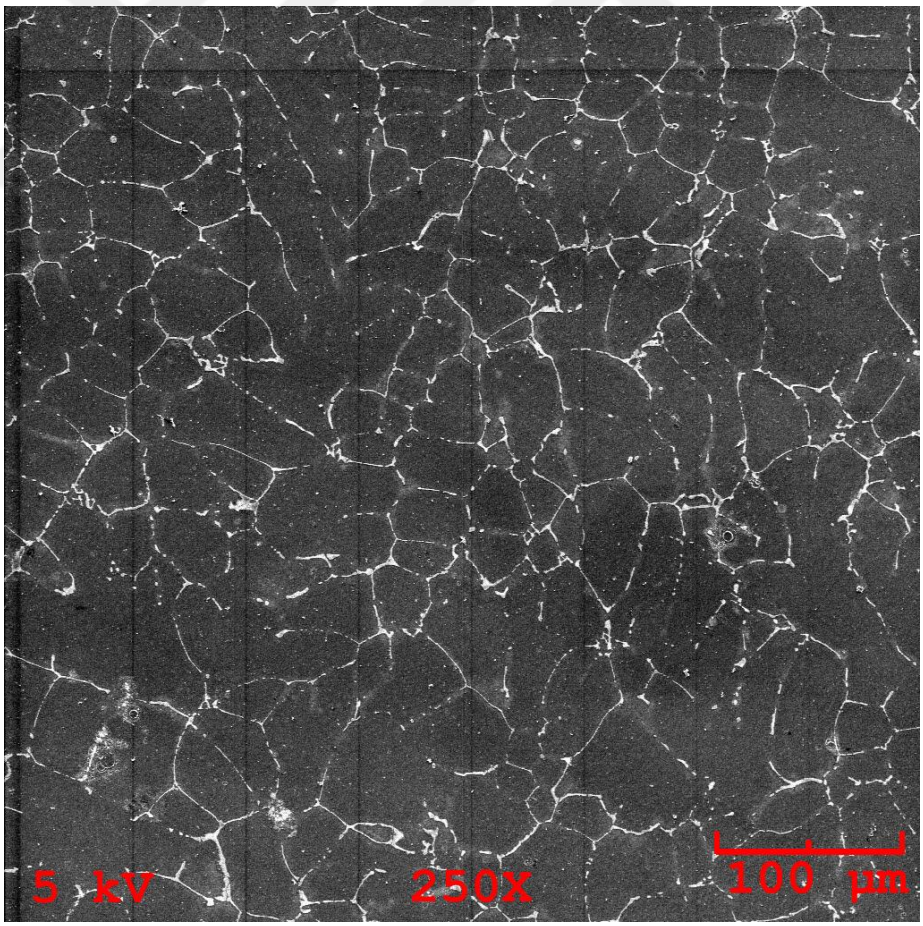


Şekil 6.17. Mg-5Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü



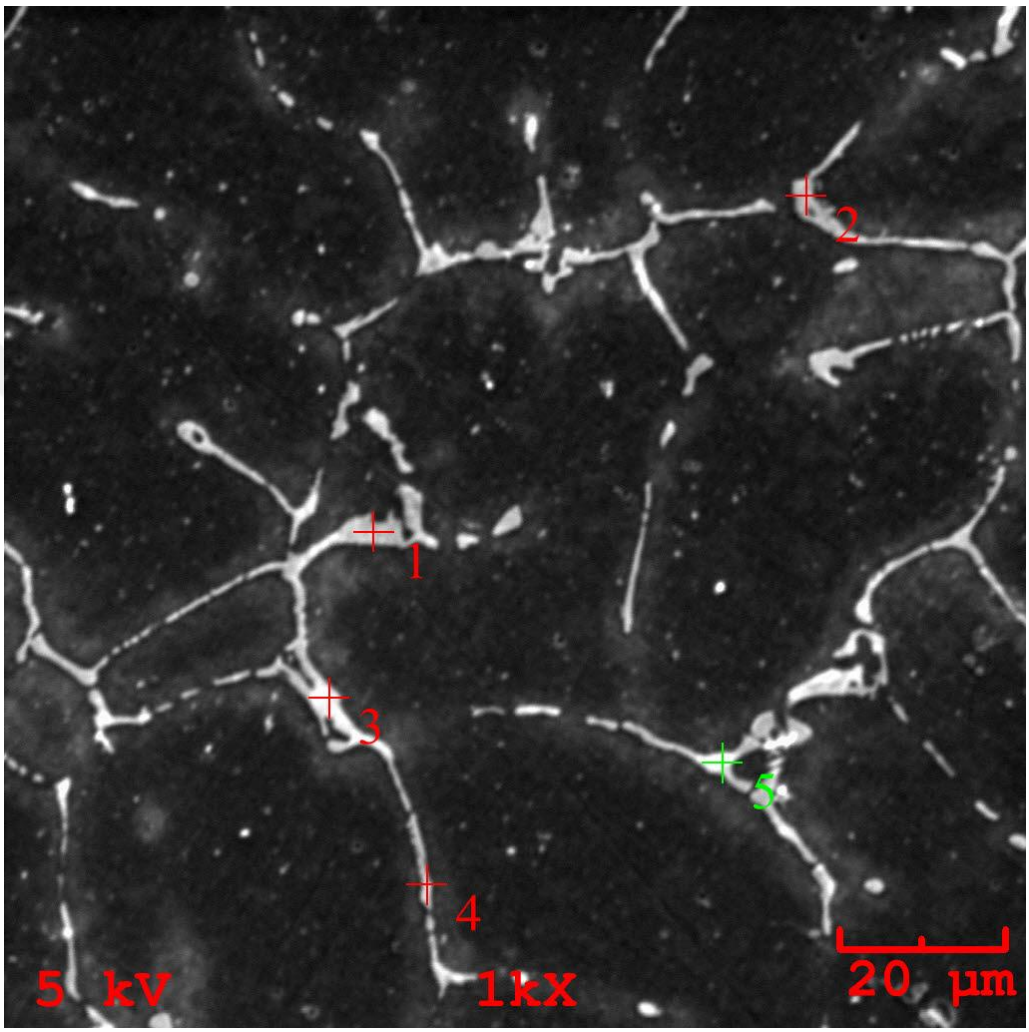
Şekil 6.18. Mg-5Sn-0,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi

Şekil 6.19'da Mg-5Sn-1,0Si numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. 0,5 silisyum içeren numune ile başlayan Mg_2Si intermetaliği bu numunede de tane sınırlarında, parlak Mg_2Sn intermetaliğine göre daha sönük bir kontrastta görülmektedir.



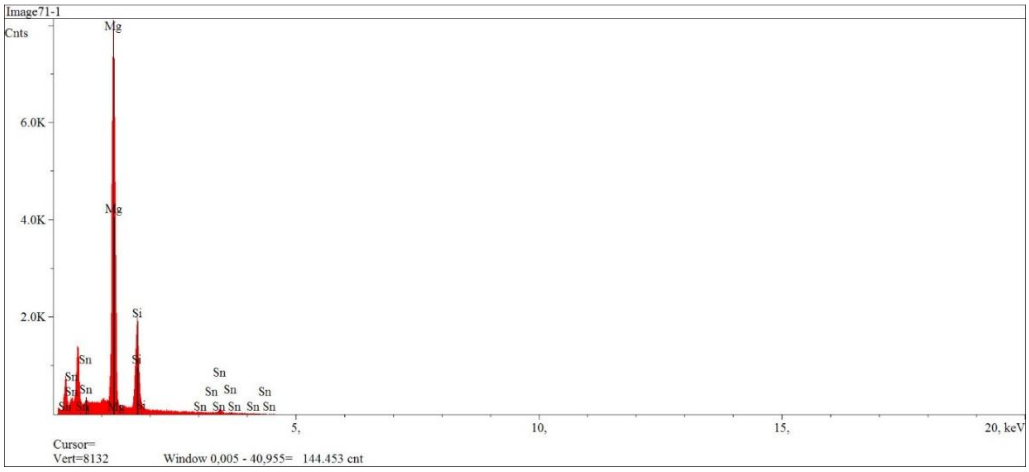
Şekil 6.19. Mg-5Sn-1,0Si alaşımının SEM görüntüsü

Şekil 6.20'de Mg-5Sn-1,5Si numunesinin SEM görüntüsü veriliş ve bu görüntü üzerinden tane sınırlarındaki yapı oluşumlarının daha iyi aydınlatılması amacıyla 5 farklı noktadan EDS analizi yapılmıştır. Bu EDS analizleri SEM görüntüsündeki rakam sıralamasıyla Şekil 6.21'den başlayıp Şekil 6.25'te son bulmaktadır.

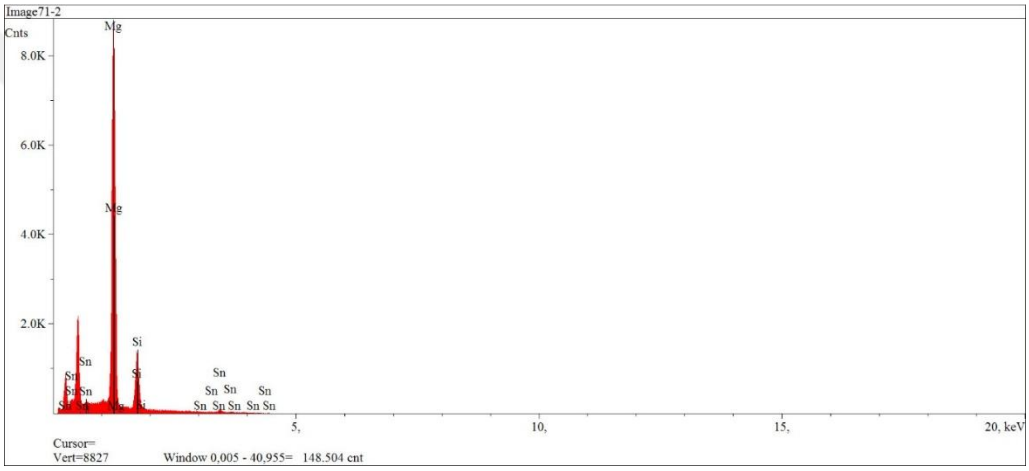


Şekil 6.20. Mg-5Sn-1,5Si alaşımının SEM görüntüsü

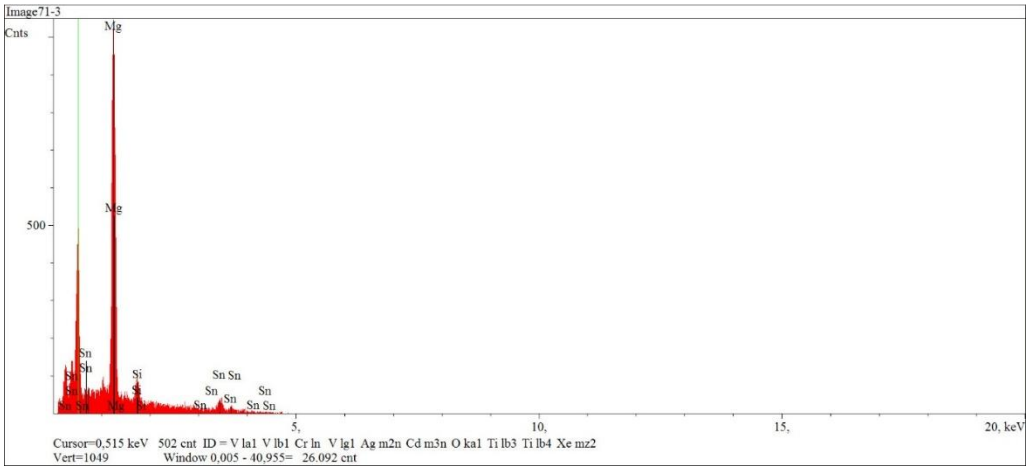
Yapılan incelemeler ve EDS analizleri sonucunda diğer numunelerde olduğu gibi tane sınırlarında Mg_2Sn ve Mg_2Si intermetalikleri gözlenmiştir. Ayrıca literatür taramasında karşımıza çıkan silisyum ilave edilen magnezyum alaşımlarında oluşan Çin yazısı morfolojisi artan silisyum miktarı ile benzerlik göstermeye başlamıştır.



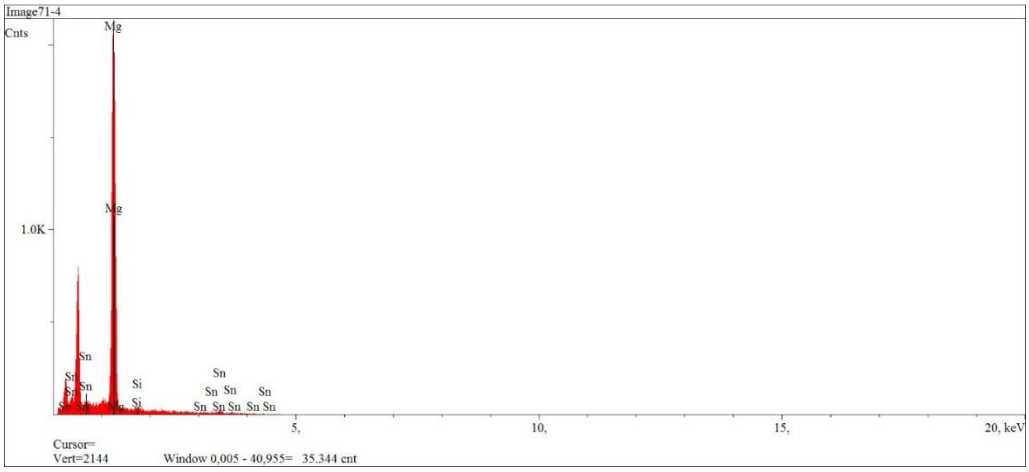
Şekil 6.21. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi



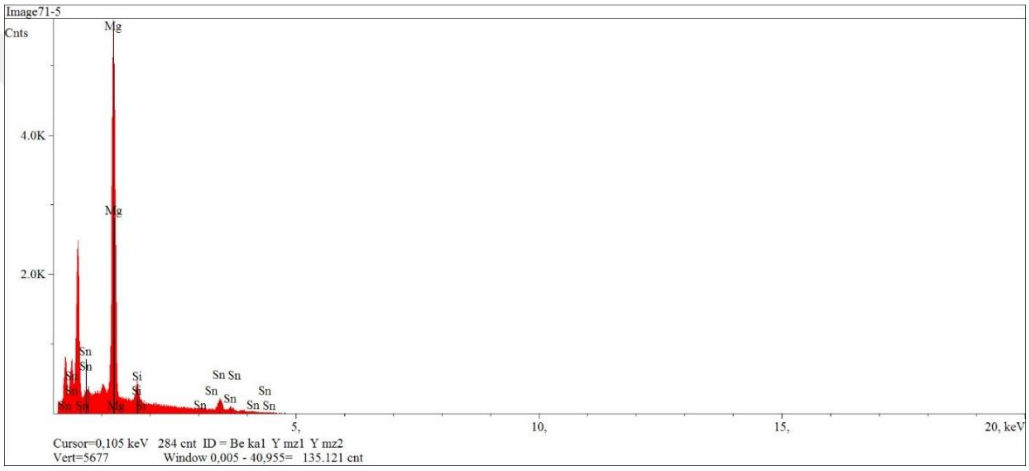
Şekil 6.22. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 2 nolu bölge EDS analizi



Şekil 6.23. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 3 nolu bölge EDS analizi

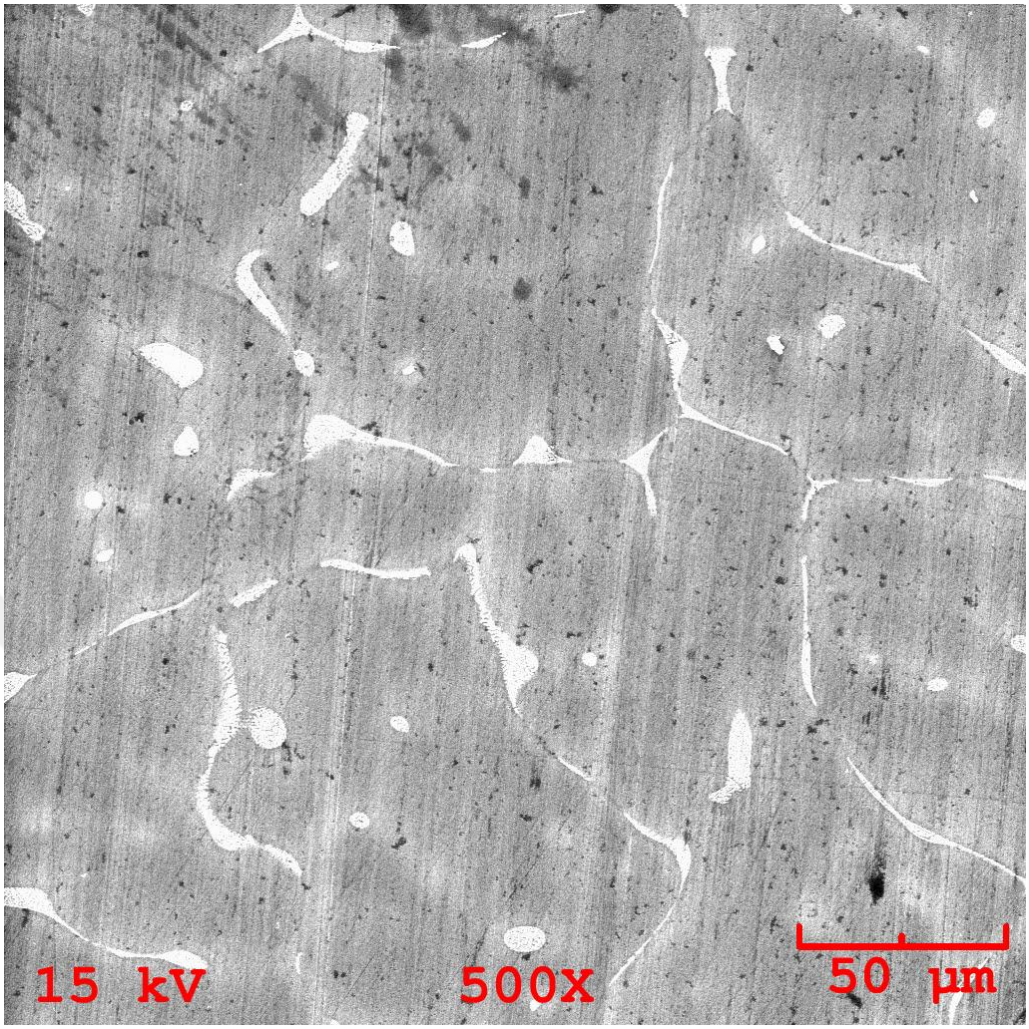


Şekil 6.24. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 4 nolu bölge EDS analizi



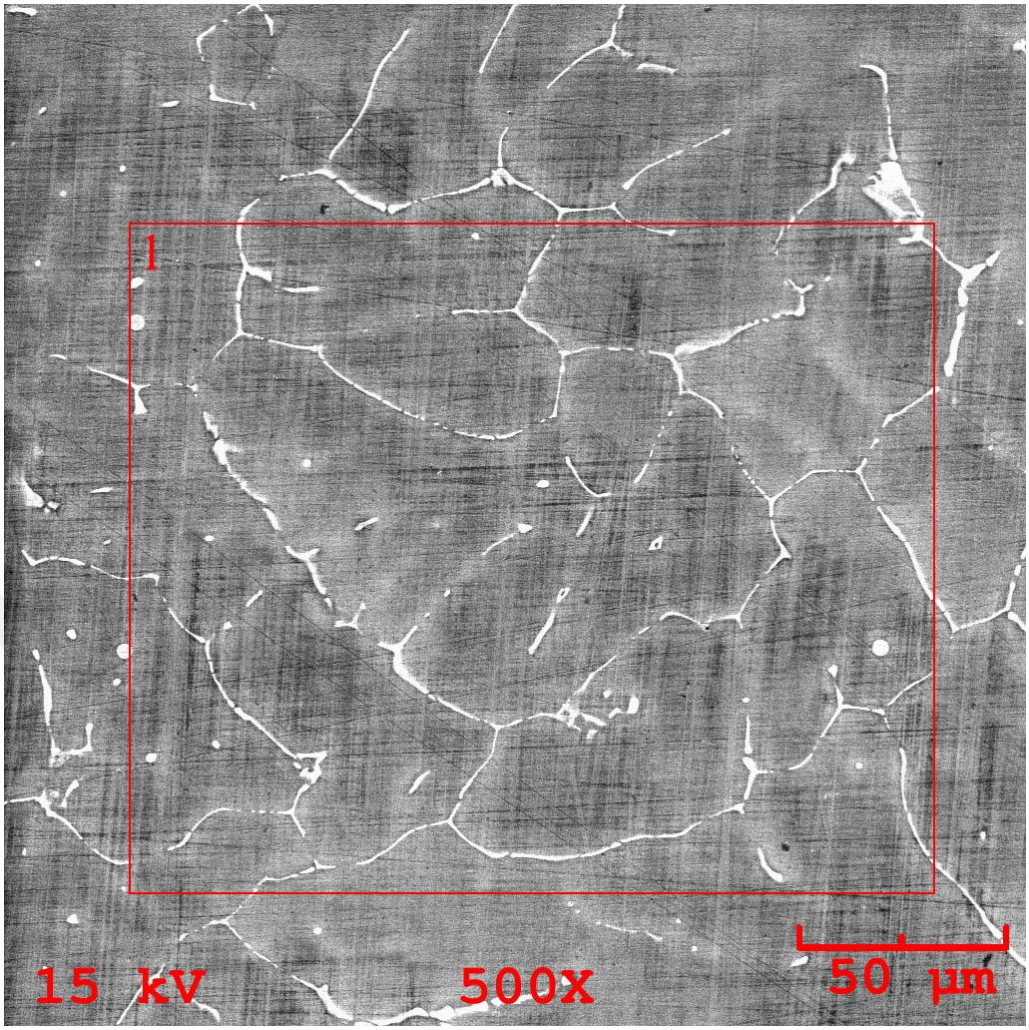
Şekil 6.25. Mg-5Sn-1,5Si SEM görüntüsü 5 nolu bölge EDS analizi

Şekil 6.26'da Mg-10Sn numunesi için SEM görüntüsü verilmiştir. Mg-5Sn numunesinde olduğu gibi Mg_2Sn intermetaliği ile bu numunede de karşılaşılmaktadır. Mg-5Sn numunesi ile karşılaştırıldığında tane sınırlarındaki Mg_2Sn intermetalik faz miktarının arttığı gözlenmektedir.

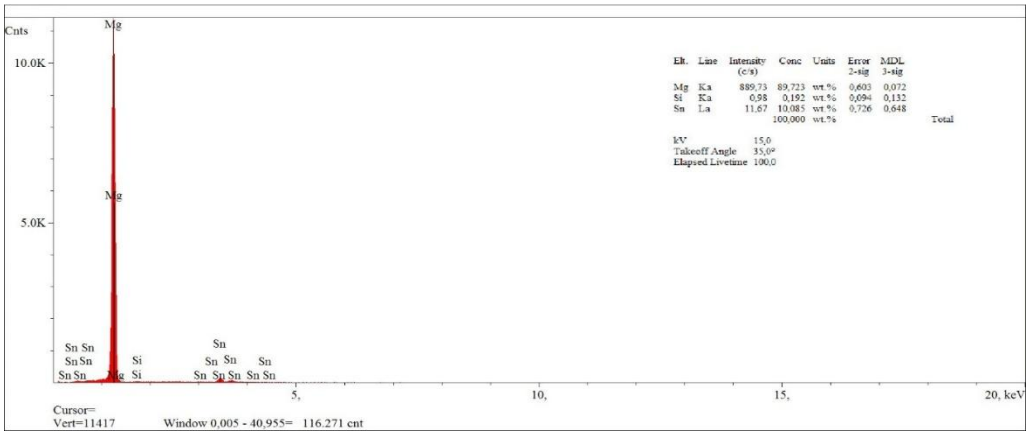


Şekil 6.26. Mg-10Sn alaşımının SEM görüntüsü

Şekil 6.27'de Mg-10Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsüne ilave olarak 1 numaralı bölge için EDS analizli yapılmıştır. Şekil 6.28'de İlgili numunenin EDS analiz sonucu verilmiştir. İlave edilen silisyum ile beraber EDS analizi yapılan bölgede düşük miktarda silisyum piki gözlenmiştir. Ayrıca yapıda tane sınırlarında Mg_2Si intermetaliği oluşmaya başlamıştır.

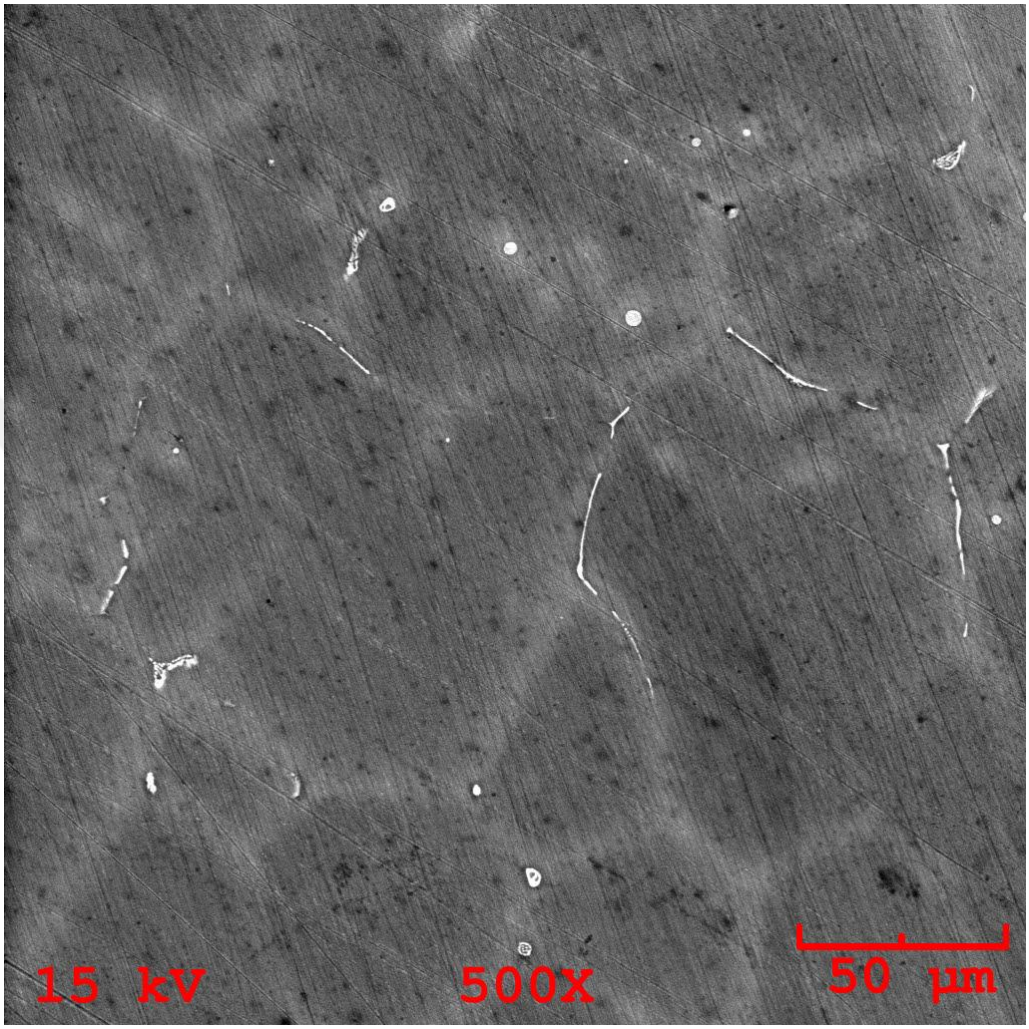


Şekil 6.27. Mg-10Sn-0,5Si alaşımının SEM görüntüsü



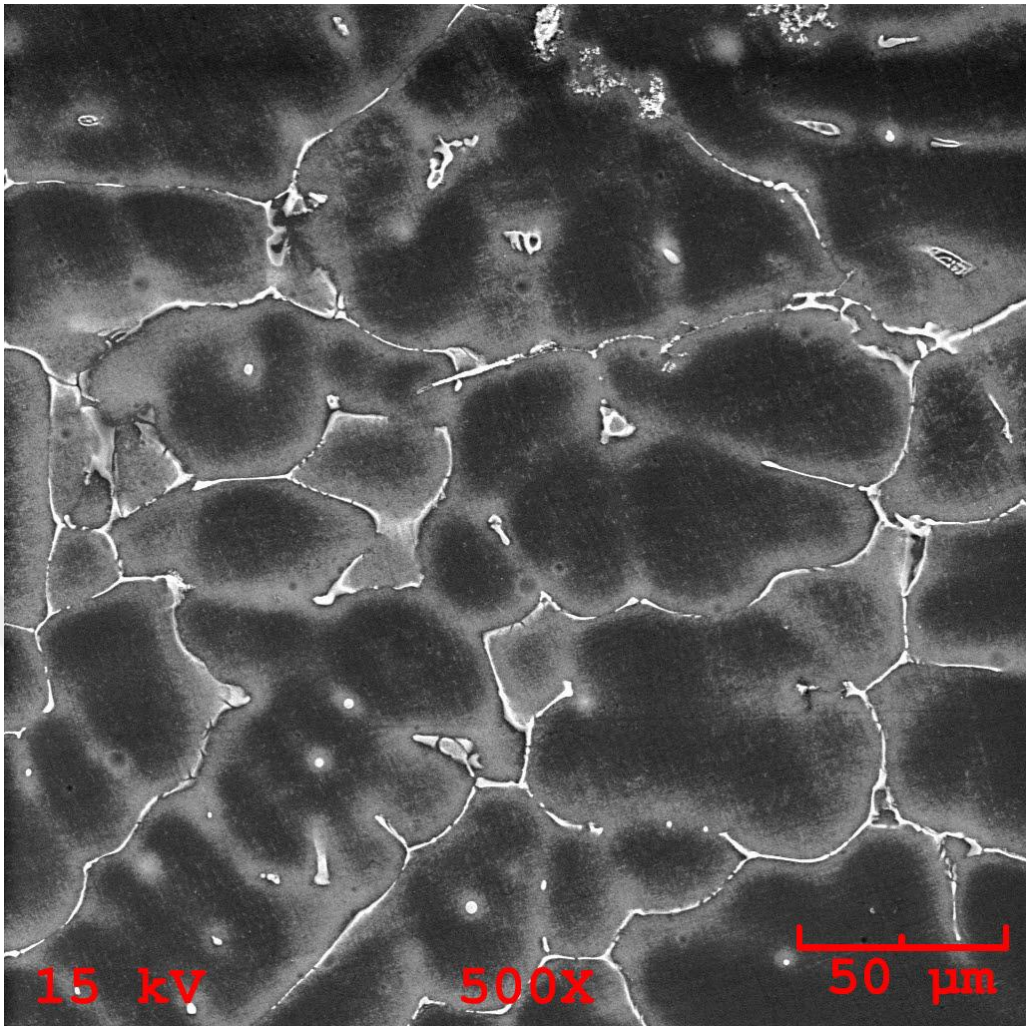
Şekil 6.28. Mg-10Sn-0,5Si SEM görüntüsü 1 nolu bölge EDS analizi

Şekil 6.29'da Mg-10Sn-1,0Si numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Yapıda diğer kalay ve silisyumu birlikte içeren numunelerde olduğu gibi Mg_2Sn ve Mg_2Si intermetalikleri tane sınırlarında gözlenmektedir.



Şekil 6.29. Mg-10Sn-1,0Si alaşımının SEM görüntüsü

Şekil 6.30'da Mg-10Sn-1,5Si alaşımının SEM görüntüsü verilmiştir. Çalışmadaki tüm alaşım grupları arasında en yüksek kalay ve silisyum oranına sahip olan bu numunede diğer alaşımlarda gözlenen intermetalikler daha fazla miktarda gözlenmektedir. Ayrıca yapıdaki silisyumun artmasıyla beraber yer yer Çin yazısı morfolojisi de gözlenmektedir.

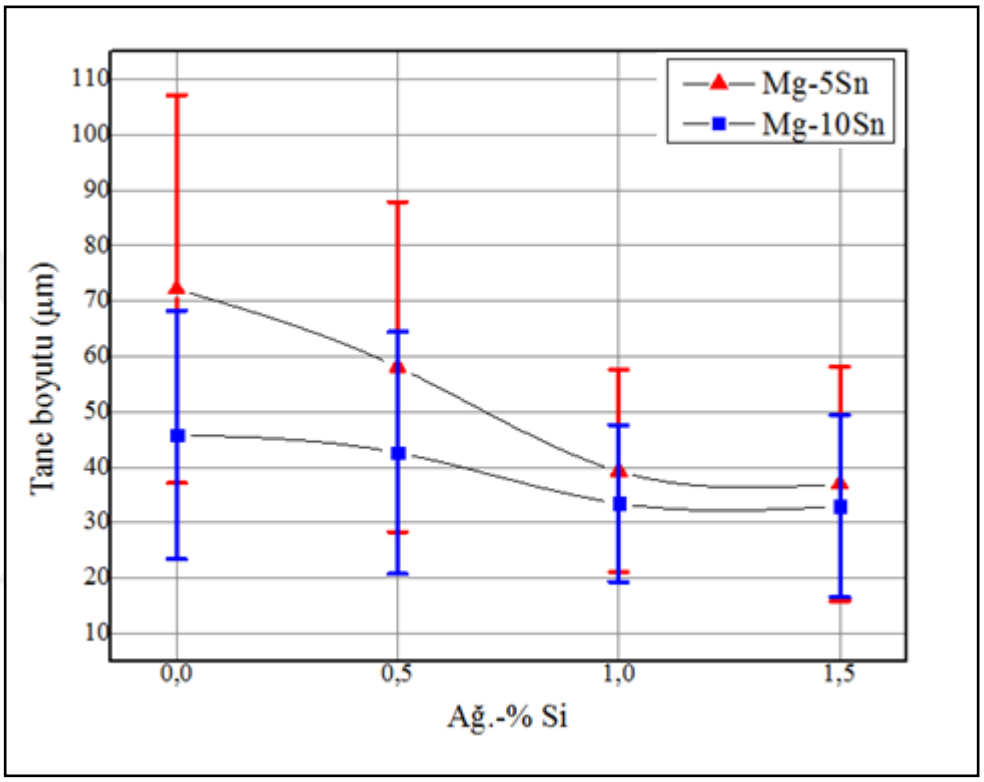


Şekil 6.30. Mg-10Sn-1,5Si alaşımının SEM görüntüsü

6.3. Tane Boyutu Ölçümleri

Tane boyutu ölçümleri için tüm numunelerin 20x büyütmedeki mikroyapıları kullanılmıştır. Her alaşım grubu için 3'er mikroyapı üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yöntemi olarak mikroyapıya 100µm aralıklı horizonal çizgiler yerleştirilmiş ve bu çizgilerin kesin noktaları arası mesafeler tek tek ölçülerek ortalama tane boyutuna ulaşılmıştır. Şekil 6.31'de tüm alaşım grupları için tane boyutu ölçümlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. Buna göre ilave edilen silisyumun tane boyutu değerini küçülttüğü, silisyum içermeyen alaşımlarda ise artan kalay miktarı ile tane boyutunun küçüldüğü gözlenmektedir. Ayrıca artan silisyum miktarı ile tane boyutundaki standart sapma değerinin düştüğü dikkati çekmektedir. Bu durumun altında yatan temel mekanizmanın büyüme kısıtlama faktörü olduğu düşünülmektedir. Büyüme kısıtlama faktörü, Bölüm 3.5'te

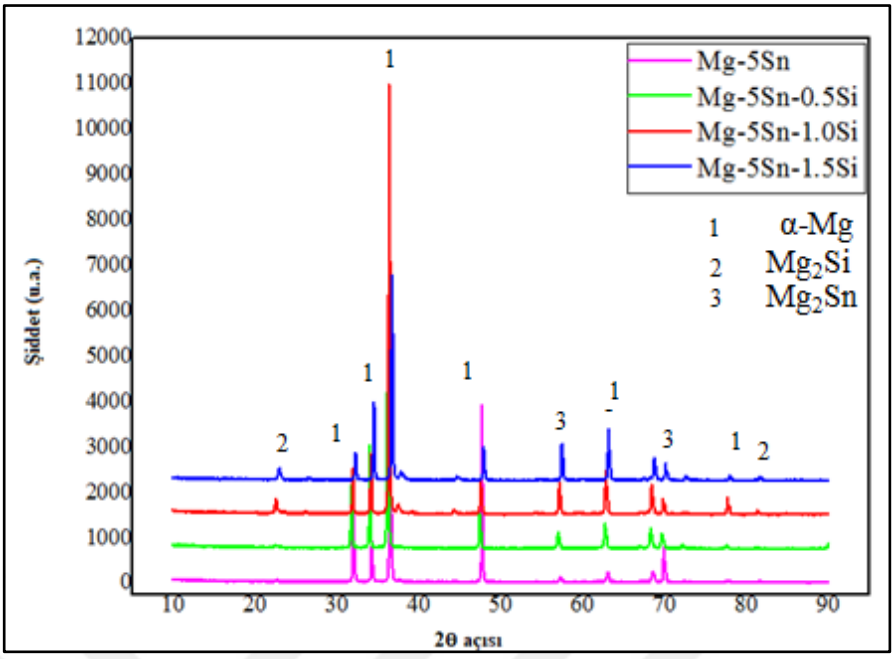
de ifade edildiği gibi tane boyutuna çözünen elamanın etkisidir. İlave edilen alaşım elementi katı/sıvı ara yüzeyinde dentritik benzeri yapı oluşturarak ana metalin tane boyutunun artmasını sınırlandırmaktadır. Bu çerçevede silisyumun sahip olduğu 9.25'lik GRF (büyüme kısıtlama faktörü) değeri ile alaşımlardaki artan miktarı ile ortalama tane boyutu değerinde düşüş gözlenmektedir. Kalay ise sahip olduğu 1.47'lik GRF değeri ile silisyum kadar efektif olmadığı dikkati çekmektedir.



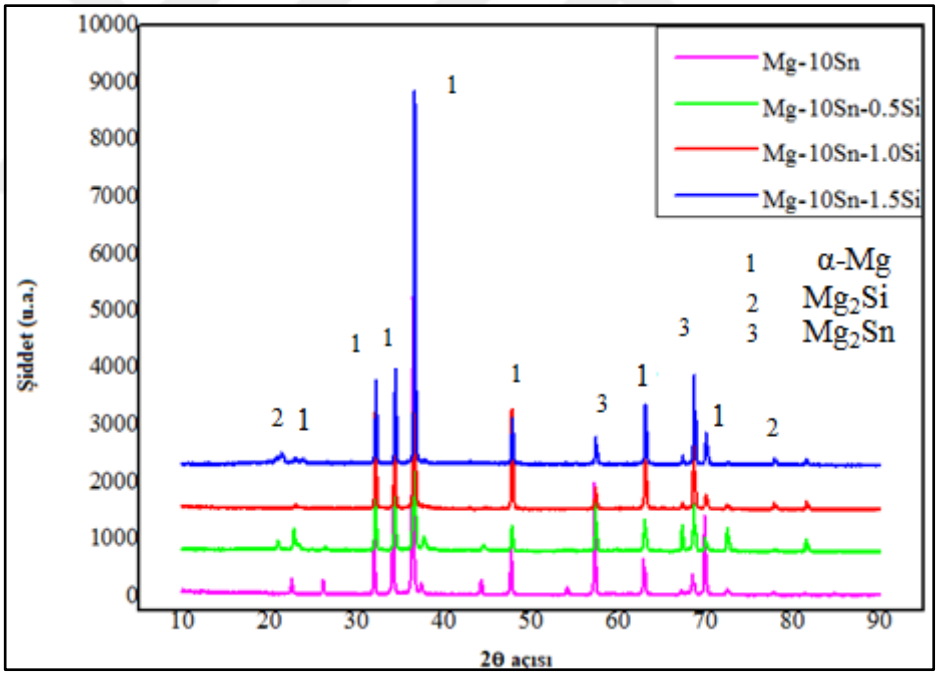
Şekil 6.31. Mg-5Sn-xSi ve Mg-10Sn-xSi tane boyutu değerleri karşılaştırması

6.4.XRD İncelemeleri

SEM, EDS, optik mikroskop ve diğer mekanik testler ışığında gerçekleştirilen yorumların doğrulanması amacıyla tüm numuneler XRD incelemelerine tabi tutulmuştur. Pembe renkle gösterilen master alaşımlarda silisyum ile ilgili piklerin gözlenmediği, silisyum ilavesi ile birlikte piklerin olduğu ve artan miktar ile pik şiddetinin arttığı gözlenmiştir. Şekil 6.32'de Mg-5Sn-xSi için Şekil 6.33'te ise Mg-10Sn-xSi için XRD diyagramları verilmiştir.



Şekil 6.32. Mg-5Sn-xSi için XRD grafikleri



Şekil 6.33. Mg-10Sn-xSi için XRD grafikleri

6.5. Sertlik Testi

Mikroyapı incelemesi için metalografik olarak hazırlanan numunelerin dağlanmamış bölgelerinden tüm numuneler için sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümü Future Tech marka Vickers sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Tüm numuneler için 10

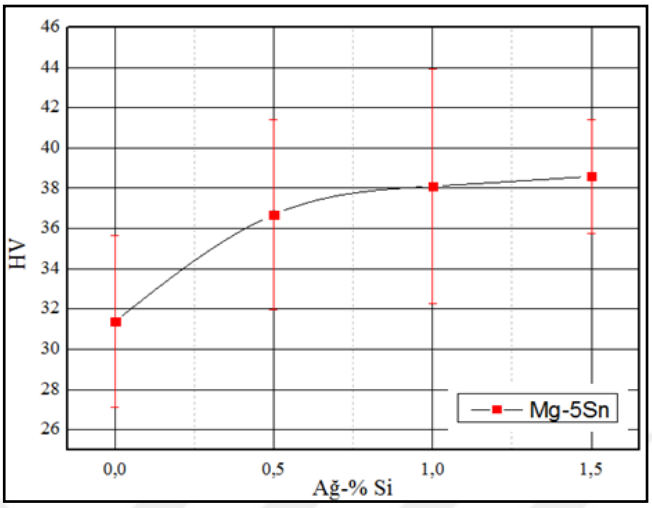
ölçüm yapılırken testte 1kgf'lik yük kullanılmıştır. Şekil 6.34'te kullanılan vickers sertlik cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.34. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Vickers Sertlik Cihazı

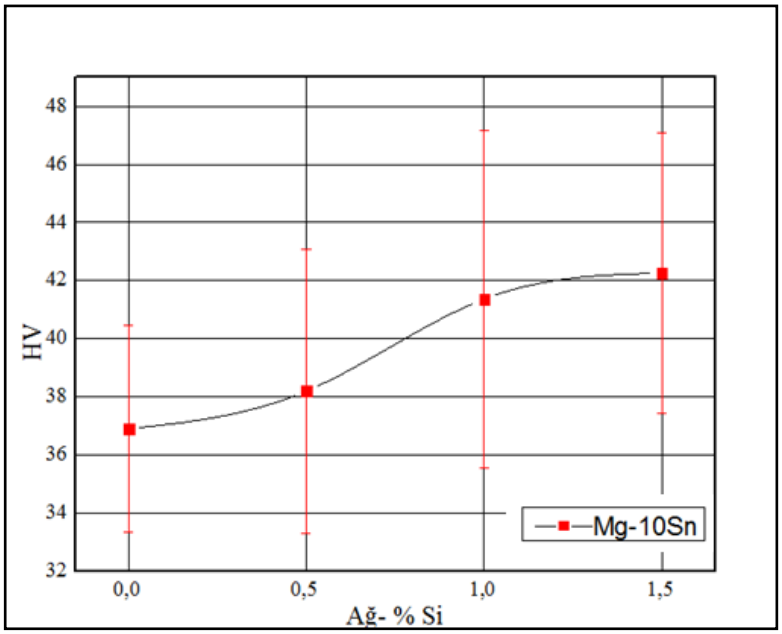
Şekil 6.35'te Mg-5Sn alaşımına farklı oranlarda ilave edilen silisyum ile sertlik değerlerinin değişim tablosu verilmiştir. İlgili grafikte artan silisyum değeri ile birlikte sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ancak artan silisyum miktarı ile sertliğin artış bandında bir azalma görülmektedir. Bu durumun altında yatan temel

neden ortalama tane boyutunun azalmasıdır. Artış bandındaki azalmanın gerekçesi ise artan silisyum ilavesi ile tane boyutunda değişimin meydana gelmemesidir.



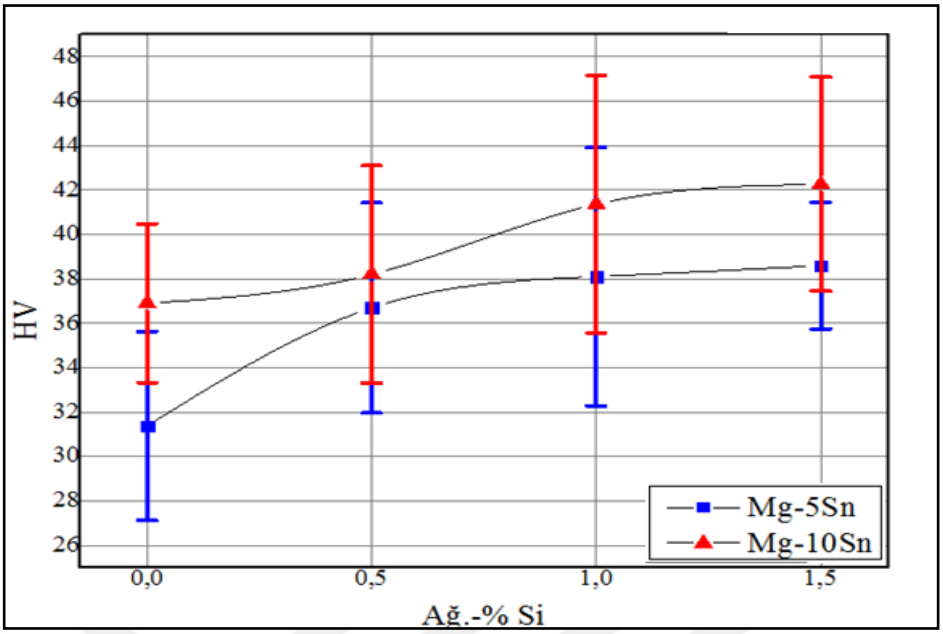
Şekil 6.35. Mg-5Sn-xSi Sertlik ölçümleri grafiği

Şekil 6.36' te Mg-10Sn alaşımına farklı oranlarda ilave edilen silisyum ile sertlik değerlerinin değişim tablosu verilmiştir. İlgili grafikte artan silisyum değeri ile birlikte sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Mg-5Sn alaşımındaki sertlik ölçümlerinde gözlenen durumlar Mg-10Sn için de geçerlidir.



Şekil 6.36. Mg-10Sn-xSi sertlik ölçümleri grafiği

Şekil 6.37'de tüm numunelerin sertlik değerleri aynı grafikte verilmiştir. Bu çerçevede en yüksek sertliğin Mg-10Sn-1,5Si numunesinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.37. Mg-5Sn-xSi ve Mg-10Sn-xSi sertlik değerleri karşılaştırması

6.6. Aşınma Testi

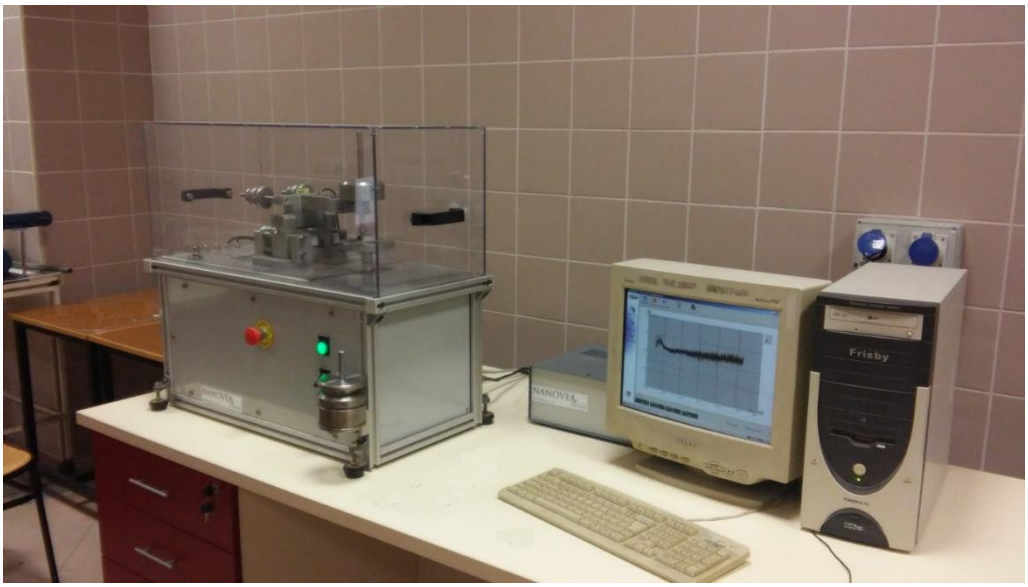
Döküm sonrası elde edilmiş külçelerden her bileşim için birer numune de aşınma testi için eşit büyüklükte kesilmiştir. Bu numuneler sadece 2000 mesh'e kadar zımparalanmış, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmamıştır.

Aşınma testi Nanovea marka cihazda ball-on-disc şeklinde yapılmış olup test cihazı görselleri Şekil 6.38 ve Şekil 6.39'da verilmiştir. Aşınma testinde tutamaçlar ile diske sabitlenen numune, diskin belirli bir hız ile dönmesiyle kendiside aynı hızla dönmektedir. Numunenin üstüne temas ettirilen bilya ve bu bilya ile uygulanan kuvvet ile aşınma işlemi gerçekleştirilmiştir. Disk hareketi ve yük sayesinde numune yüzeyinde aşınma meydana gelmektedir. Cihazın yazılımı sürtünme katsayısı ve mesafe ile ilgili grafikler vermektedir. Bunun yanı sıra numunenin teste başlamadan önceki ağırlığı ve testten sonraki ağırlığı arasındaki fark ile ağırlık kaybı hakkında yorumlar yapılmaktadır. Testten çıkarılan numuneler ultrasonik temizleyici ile temizlenip iyice kurutularak tartımı yapılmıştır.



Şekil 6.38. Aşınma cihazı görüntüsü

Magnezyum yapısına farklı alaşım elementlerinin ilave edilmesi nedeniyle aşınma testlerinin sonucunun tartışılması için sadece ağırlık kaybı yanıltıcı olacaktır. Bu nedenle ağırlık kaybının, yoğunluk ve test mesafesinin çarpımına oranı olarak tanımlanan aşınma oranı formülünden hesaplamak testin daha doğru bir sonuç vermesini sağlayacaktır.



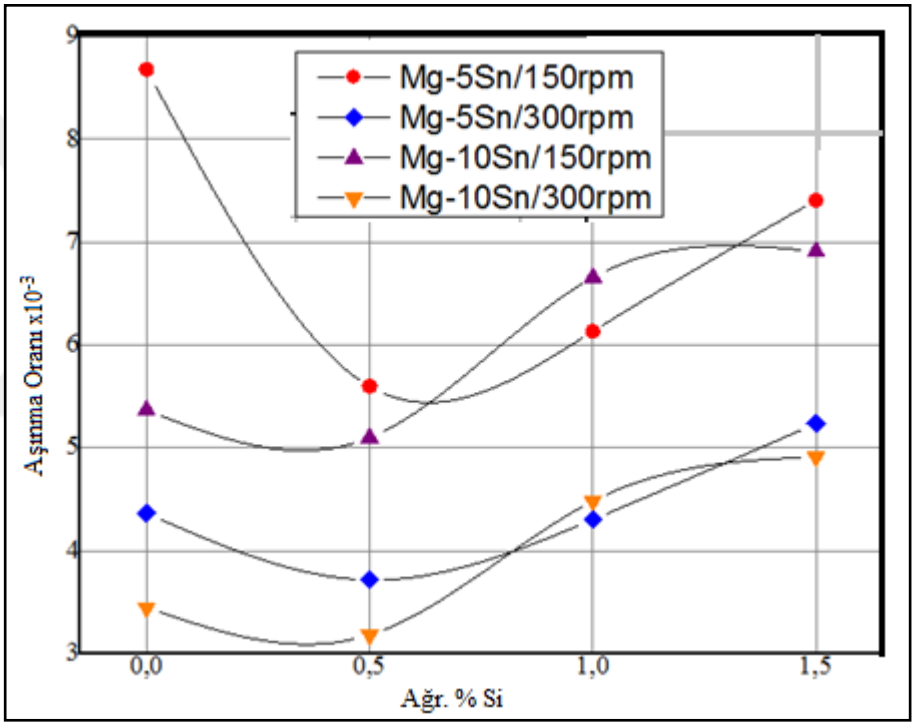
Şekil 6.39. Aşınma cihazı ve yazılım görüntüsü

Aşınma testi 2 farklı set üzerinden tüm numunelere uygulanmıştır. Tüm parametreler Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Aşınma testi için kullanılan parametreler

	1 Nolu Parametre	2 Nolu Parametre
Yük	20N	20N
Mesafe	1000m	1000m
Hız	150rpm	300rpm
İz Çapı	25mm	25mm

Tüm numuneler aşınma testinden sonra aşınma oranı hesaplamasına tabi tutulmuştur. Şekil 6.40'ta tüm alaşımlar için uygulanan aşınma testi sonuçlarının aşınma oranı ile değişimi, Tablo 6.2'de ise tüm alaşımlar için ortaya çıkan aşınma oranı değerleri verilmiştir.



Şekil 6.40. Farklı parametrelerde gerçekleştirilen aşınma testi karşılaştırması grafiği

Tablo 6.2. Tüm numuneler için hesaplanan aşınma oranı hesaplamaları

% Si/Mg-XSn	Mg-5Sn (150 rpm)	Mg-5Sn (300 rpm)	Mg-10Sn (150 rpm)	Mg-10Sn (300 rpm)
0	8,67948	4,36454	5,36532	3,44602
0,5	5,59628	3,71434	5,09704	3,1802
1,0	6,13209	4,30235	6,6568	4,48138
1,5	7,40704	5,23431	6,90899	4,91016

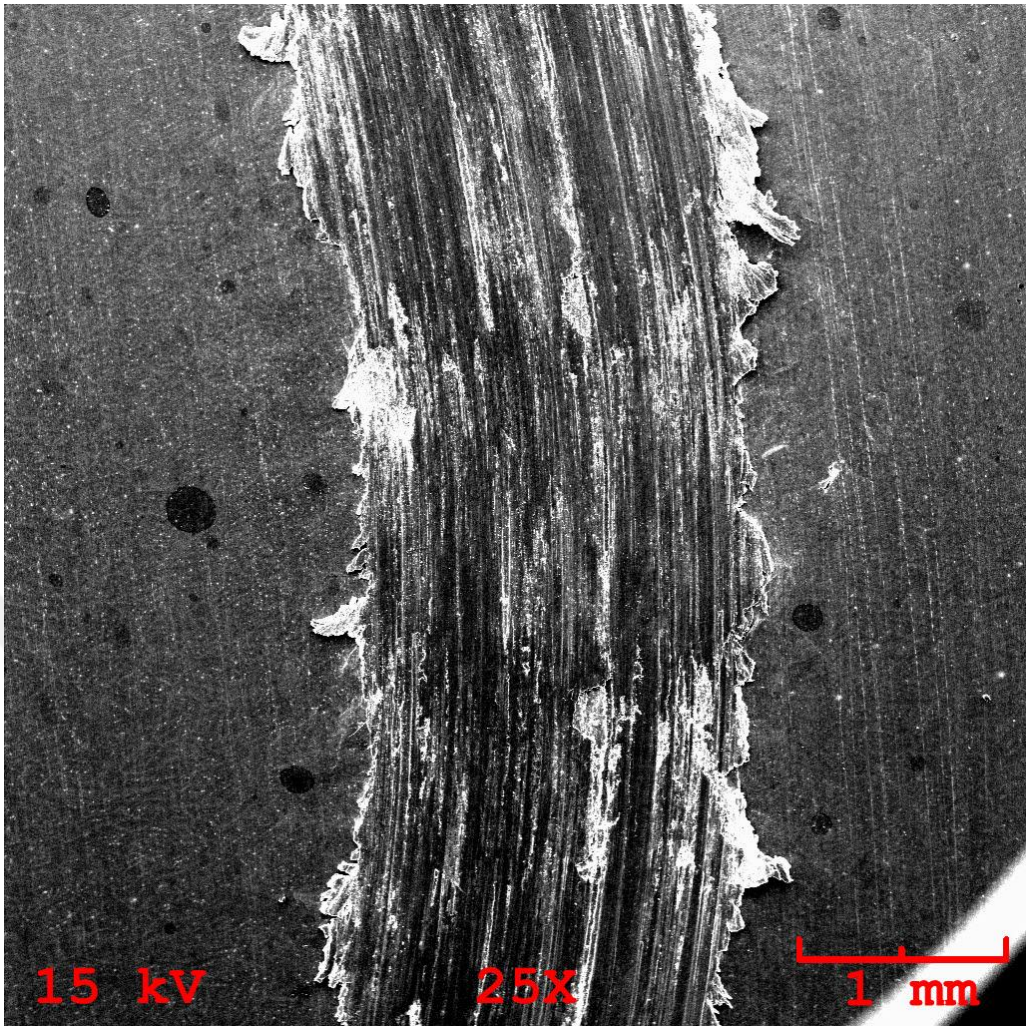
Şekil 6.33. ve Tablo 6.2. incelendiğinde silisyum içermeyen alaşımlarda artan kalay miktarıyla birlikte aşınma oranı bariz bir şekilde düşmüştür. Bu çerçevede mekanik özelliklerin geliştiği ve sertliğin arttığı düşünülmüştür.

Artan silisyum ilavesi ile birlikte aşınma oranlarında artış gözlenmiş olunup 0,5Si ilavesi tüm test numuneleri içerisinde en düşük aşınma oranı veren ilave olmuştur. Bunun gerekçesi ise yapıda miktarı artan intermetaliklerin aşınma testi sırasında kırılarak yapıdan uzaklaşmasıdır.

Yukarıda verilen iki inceleme birleştirildiğinde artan kalay ve optimum silisyum değeriyle aşınma direnci en yüksek alaşım seçilmiştir. Bu alaşım Mg-10Sn-0,5Si' dir.

6.6.1. Aşınmış yüzey SEM görüntüleri

Numunelere uygulanan aşınma testleri sonrası tüm alaşımlar için aşınma yüzeyleri SEM' de incelenmiştir. Aşınma yüzeylerinin incelenmesinden önce numunelerin yüzeylerinde kopmuş intermetalik partiküller olabileceği düşünülmüştür. Bunun gerekçesi matrise göre daha yüksek sertliğe sahip olan intermetalik partiküllerin kırılmaya uğrayacağı düşüncesidir. Artan silisyum miktarı ile aşınmada meydana gelen aşınma oranı artışı bu düşünceyi doğrulamaktadır.

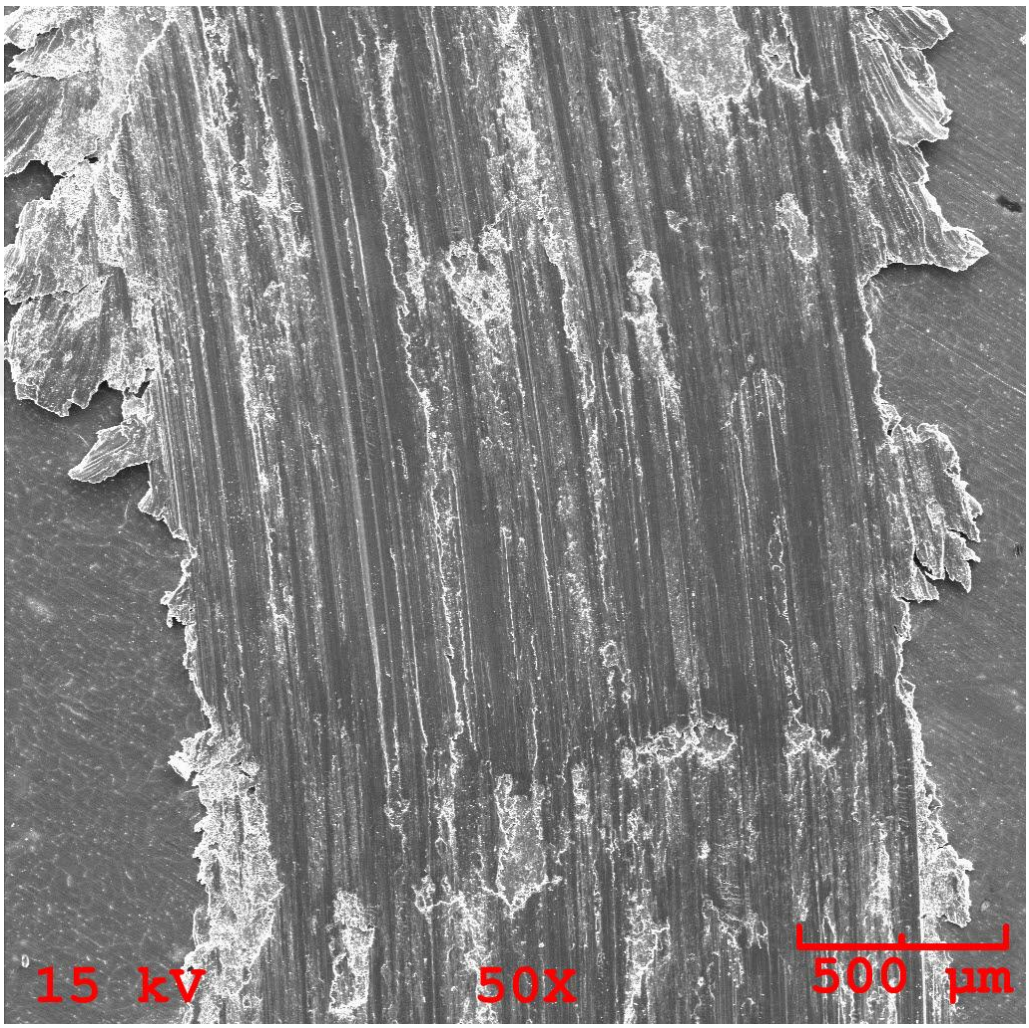


Şekil 6.41. Mg-5Sn alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü

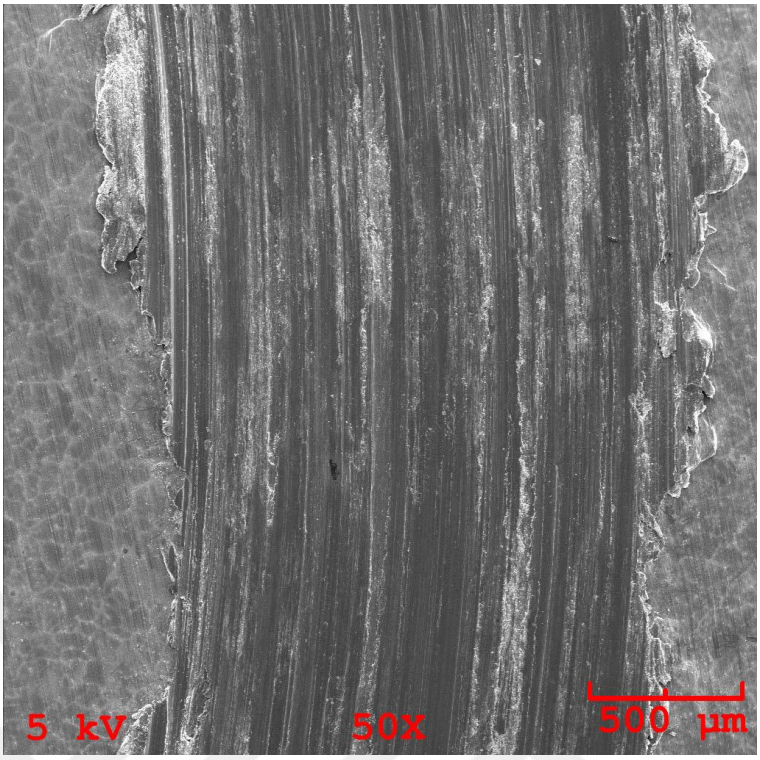
Tüm görüntülerde birbirine paralel olarak uzanmış halde gözlenen çizgiler abrazif aşınma sonucu oluşmuştur. Yapıda görünen diğer aşınma türleri ise yumuşak fazların aşınma testinde bilyeye yapışarak uzaklaşması ve intermetaliklerin sertliğinin yüksek olması nedeniyle kırılarak yapıdan uzaklaşmasıdır. Şekil 6.41'den itibaren Mg-5Sn alaşımları için aşınmış yüzey görüntüleri artan silisyum miktarı ile sırasıyla; Şekil 6.45'ten itibaren ise Mg-10Sn alaşımları için aşınmış yüzey görüntüleri artan silisyum miktarı ile sırasıyla verilmiştir.

Şekil 6.41'de abrasif aşınma izleri gözlemlenirken yapıdan koparak uzaklaşan faz gözlenmemiştir. Dolayısıyla baskın mekanizma abrasif olarak görülmüştür.

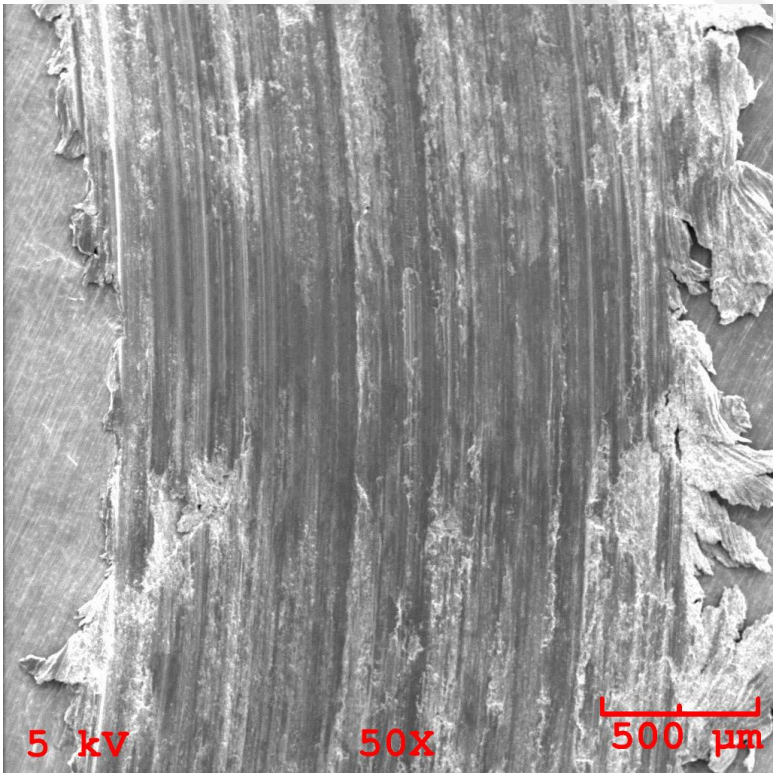
Şekil 6.42'de Mg-5Sn'de olduğu gibi baskın mekanizma abrasif aşınmadır. Yapıda intermetalik oluşumlarının artışı ile düşük miktarlarda yapıdan koparak uzaklaşmaların başladığı gözlenmiştir. Artan silisyum içeriğiyle bu mekanizmanın devam ettiği ve baskın mekanizmanın değişmediği görülmüştür.



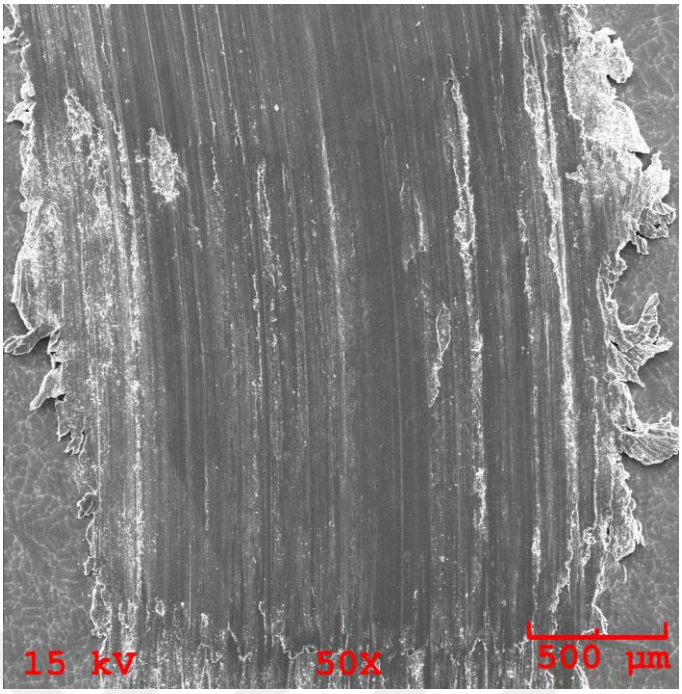
Şekil 6.42. Mg-5Sn-0,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



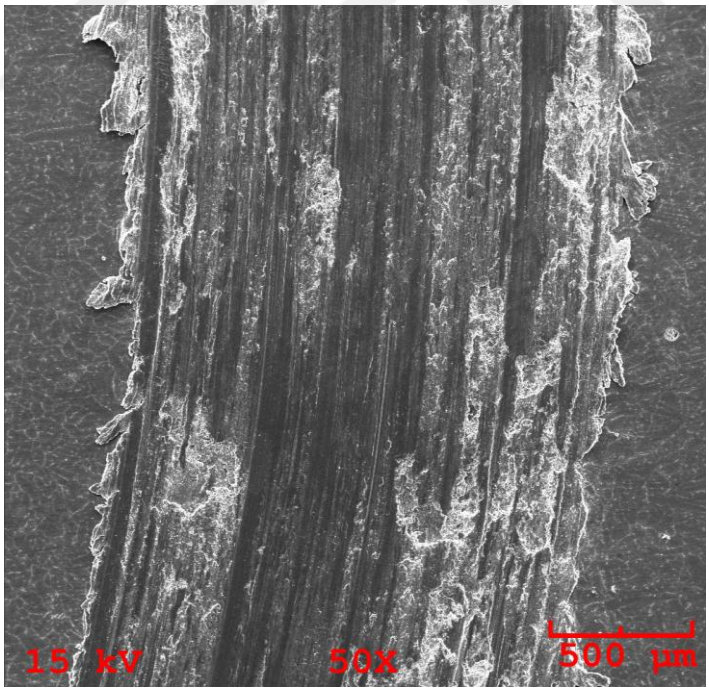
Şekil 6.43. Mg-5Sn-1,0Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



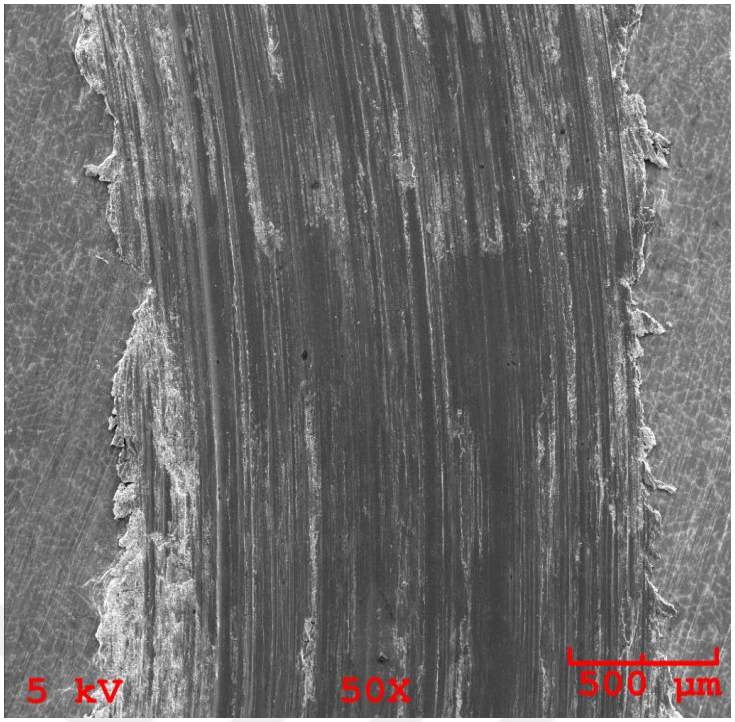
Şekil 6.44. Mg-5Sn-1,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



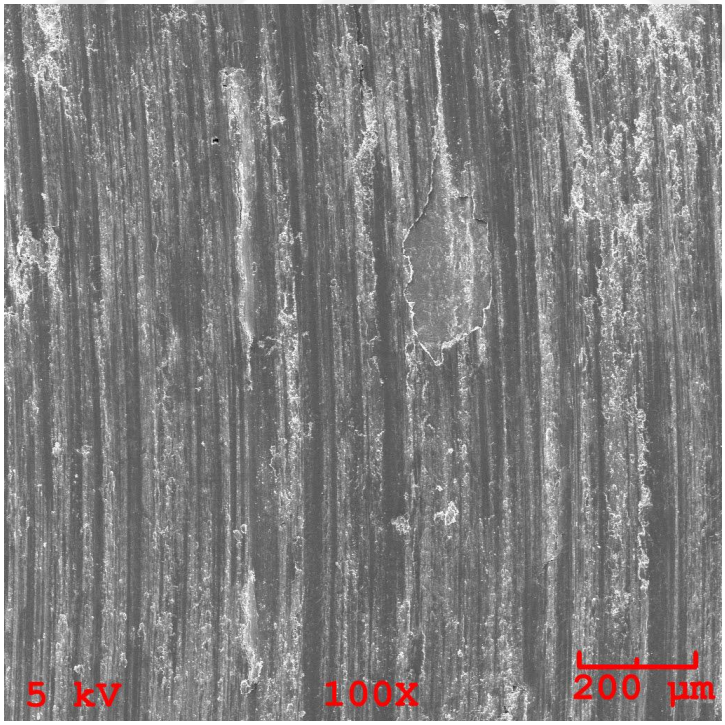
Şekil 6.45. Mg-10Sn alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



Şekil 6.46. Mg-10Sn-0,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



Şekil 6.47. Mg-10Sn-1,0Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü



Şekil 6.48. Mg-10Sn-1,5Si alaşımı için 1 nolu aşınma parametreleri ile gerçekleştirilen test sonucu SEM görüntüsü

Şekil 6.48. incelendiğinde yapışma sonucu yapıdan uzaklaşan bir fazın varlığı dikkat çekmektedir. Bu mekanizma adhezif aşınmanın görüldüğü anlamına gelmektedir. Yapıda oksitlenmeler ve çatlak oluşumları görülmekle beraber aşınma oranı daha düşük miktardaki Si ilavelerine göre yükselmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda dünya üzerinde kullanımı gelişen ve gelişime açık olan magnezyum alaşımlarının gelişmesine katkı vermek amacıyla yapılan bu çalışmada Mg-Sn-Si alaşımı indüksiyon ocağında metal kalıba döküm çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma çerçevesinde mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla magnezyuma farklı miktarlarda kalay ve silisyum ilave edilmiştir.

Döküm işleminden sonra malzemelerden numuneler alınarak optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler sonucu kalay ilavesi ile tane sınırlarında Mg_2Sn fazı ve kalayca zengin bölgeler gözlenmiştir. Si ilavesi ile yine tane sınırlarında Mg_2Si intermetaliği gözlenmiştir. Artan kalay ve silisyum miktarları ile görülen intermetalik miktarlarının arttığı gözlenmiştir.

XRD çalışmaları sonucunda meydana gelen pikler SEM, optik mikroskop, EDS analizleri ile örtüşmekte ve tane sınırlarında Mg-Sn, Mg-Si etkileşimleri gözlenmektedir.

Alaşımlara ilave edilen silisyum miktarı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Mg-5Sn alaşım grubuna nazaran Mg-10Sn alaşımının daha sert olduğu gözlenmiştir. Yapıda oluşan sertlik artımının gerekçesi olarak ortalama tane boyutundaki düşüş ön görülmüştür. Tüm numuneler arasında en yüksek sertlik değeri 42,26±4 HV ile Mg-10Sn-1,5Si alaşımına aittir.

İki farklı parametrede yapılan aşınma işlemleri sonucu hem Mg-5Sn alaşım grubu hem de Mg-10Sn alaşım grubu için 0,5Si ilavesinde en yüksek aşınma direnci elde edilmiştir. İki alaşım grubunda da bu değerden sonra aşınma oranının arttığı gözlenmiştir. Bu değerler ışığında aşınma yüzeylerinde SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. SEM incelemeleri neticesinde artan silisyum miktarı ile yapıda adhezif aşınmanın arttığı gözlenip gerekçenin, oluşan intermetalikler ve artan sertlik ile yapıda meydana gelen gevreklik olduğu gözlenmiştir. Mg-5Sn alaşımında

ortalama tane boyutu 72,139µm olarak ölçülmüşken Mg-5Sn-1,5Si alaşımında tane boyutu 36,992µm olarak ölçülmüştür. Mg-10Sn alaşımında tane boyutu 45,835µm olarak ölçülmüşken Mg-10Sn-1,5Si alaşımında tane boyutu 32,941µm olarak ölçülmüştür. Buna göre artan silisyum miktarı ile tane boyutunda küçülme görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda hem yüksek sertlik hem de iyi bir aşınma direnci değeri ortaya koyan Mg-10Sn-0,5Si alaşımı çalışmada beklenen özellikleri en iyi karşılayan alaşım olmuştur. Ayrıca yapıda bulunan termal olarak kararlı Mg_2Sn ve Mg_2Si intermetalikleri alaşımın yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı mümkün kılmaktadır. Ülkemizde ve dünyada henüz üzerinde çok az sayıda çalışma gerçekleştirilen bu alaşım grubunun daha da geliştirilmesi ile otomotiv ve havacılık sektöründe kullanımının artacağı kanısındayız.

KAYNAKLAR

[1] Gupta M., Sharon N. M. L., *Magnesium, Magnesium Alloys and Magnesium Composites*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2011.

[2] Mordike B. L., Ebert T., Magnesium Properties — Applications — Potential, *Materials Science and Engineering A*, 2001, **302**, 37-45.

[3] Leil T. A., Development of New Magnesium Alloys for High Temperature Applications, Doctora Thesis, Clausthal University of Technology, Faculty of Natural and Materials Sciences, Germany, 2009.

[4] Pekguleryuz M. O. , Kainer K. U., Kaya A. A., *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013.

[5] Kramer A.D., Magnesium, its Alloys and Compounds, U.S. *Geological Survey*, 01-341, 3-14, 2001.

[6] Karakulak E., Küçüker Y. B., Magnezyum Alaşımlarında Tane İnceltme: I-Alüminyum İçeren Alaşımlar, *Metal Dünyası*, 2015, **270**(23), 62-65.

[7] Karakulak E., Küçüker Y. B., Mg-5Sn-xSi Alaşımlarının Mikroyapısal Karakterizasyonu, *Metal Dünyası*, 2017, **287**(25), 75-80.

[8] Kainer K. U., *Magnesium – Alloys and Technology*, 1st ed., WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA, Germany, 2003.

[9] Gerald S. C., Summary of Magnesıum Vısıon 2020: A North Amerıcan Automotıve Strategıc Vısıon For Magnesıum, Editors: Beals R. S., Luo A. A., Neelameggham N. R., Pekguleryuz M. O., *Essential Reading in Magnesium Technology*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 35-40, 2014.

[10] Easton M., Beer A., Barnett M., Davies C., Dunlop G., Durandet Y., Blacket S., Hilditch T., Beggs P., Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures, *Journal of Material*, 2008, **60**(11), 57-62.

[11] Mathes J. C., Magnesium Alloys in the Aircraft Industry, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1941, **13**(11), 323 – 326.

[12] Aghion E., Levy G., The Effect of Ca On The in Vitro Corrosion Performance of Biodegradable Mg–Nd–Y–Zr Alloy, *Journal of Material Science*, DOI : 10.1007/s10853-010-4317-7

[13] Luo A. A., Magnesium Casting Technology For Structural Applications, *KeAi Chinese Roots Global Inpact*, DOI: 10.1016/j.jma.2013.02.002.

[14] Kumar S. B., Idris M. H., Farah N., Kamal R., Investigation Of Mechanical Properties Of AZ91D Magnesium Alloy By Gravity Die Casting Process, *Jurnal Mekanikal,* 2013, **36,** 01-09.

[15] Czerwinski W., Magnesium Alloy Particulates for Thixomolding Applications Manufactured by Rapid Solidification, *Material Science and Engineering: A,* DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.210.

[16] Hu H., Squuze Casting of Magnesium Alloys and Their Composites, *Journal of Materials Science,* 1998, **33**,1579-1589.

[17] Horbert N., Börn W., Hajo D., Karl U.K., Magnesium Melt Prodection, *Material Science Forum,* DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.828-829.78.

[18] Lyon P., Rogers P.D., King J.F., Cashion S.P., Ricketts N. J., Magnesium Melt Protection at Magnesium Elektron Using HFC-134a, *Magnesium Technology 2003,* San Diego, ABD, January, 2003.

[19] StJohn D. H., Qian M. A., Easton M. A., Frost M. T., Zirconium Alloying and Grain Refinement of Magnesium Alloys, *Scripta Materialia,* 2004, **50**, 1115-1119.

[20] Karakulak E., Küçüker Y. B., Magnezyum Alaşımlarında Tane İnceltme: II-Alüminyum İçermeyen Alaşımlar, *Metal Dünyası*, 2016, **272**(24), 70-73.

[21] Vinotha D., Raghukandan K., Pillai U. T. S., and Pai B. C., Grain Refining Mechanisms in Magnesium Alloys – An overview, *Transactions of The Indian Institute of Metals,* 2009, **62**(6), 521-532.

[22] Changjiang S., Quingyou H., Qijie Z., Review of Grain Refinement Methods for As-Cast Microstructure of Magnesium Alloy, *China Foundry*, 2009, **6**(2), 93-103.

[23] Cao P. StJohn D. H., Qian M. A., Mechanism for Grain Refinement of Magnesium Alloys by Superheating, *Scriptia Materialia,* DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.12.009

[24] Kim Y. M., Yim C. D., You B. S., Grain Refining Mechanism in Mg-Al Alloy With Carbon Additiom, *Scriptia Materialia,* DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.06.044

[25] Song J., Pan F., Jiang B., Atrens A., Zhang M. X., Lu Y., A Review on Hot Tearing of Magnesium Alloys, *Journal of Magnesium and Alloys*, DOI: 10.1016/j.jma.2016.08.003.

[26] Zhang L. N., Hou Z. T., Ye X., Xu Z. B., Bai X. L., Shang P.,The effect of Selected Alloying Element Additions on Properties of Mg-Based Alloy as Bioimplants: A Literature Review, *Material Science,* DOI: 10.1007/s11706-013-0210-z.

[27] URL-1: www.intlmag.org, (Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2018).

[28] Okamoto H., Schlesinger M. E., Mueller E. M., *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams,* 8th ed.,ASM International, ABD, 1992.

[29] Hort N. , Huang Y. D., Abu Leil T., Rao T. P. , Kainer K. U., Properties and Processing of Magnesium-Tin-Calcium Alloys, *Kovove Mater.* DOI: 10.4149/km 2011 3 163.

[30] Hajime K., Koshiro K., Kazuma H., Hiroyuki K., Effect of Tin Addition on Inhibition of Cast Cracking in Mg-Al-Ca Alloys, *Material Transactions,* DOI: 10.2320/matertrans.M2016139.

[31] You J. H., Yang C. L., Qiang Q. K., Yang G. X., Effect of Si and Ca Additions on Microstructure of As-Cast Mg-Sn-Sr Alloy, *The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing*, ABD, 4-9 August 2013.

[32] Zhao C., Pan F., Zhao S., Pan H., Song K., Tang A., Preparation and Characterization of As-Extruded Mg–Sn Alloys for Orthopedic Applications, *Materials & Design***,** DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.041**.**

[33] Chen Y., Wang Y., Gao J., Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Mg-Sn-Zn-Y Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.09.192**.**

[34] Kang D. H., Park S. S., Kim N. J., Development of Creep Resistant Die Cast Mg–Sn–Al–Si Alloy *Materials Science and Engineering A*, DOI:10.1016/j.msea.2005.09.022.

[35] Zhao C., Chen X., Pan F., Gao S., Zhao D., Liu X., Effect of Sn Content on Strain Hardening Behavior of As-Extruded Mg-Sn Alloys, *Materials Science and Engineering: A,* DOI:10.1016/j.msea.2017.12.074**.**

[36] Wang Y., Peng J., Zhong L., On the Microstructure and Mechanical Property of As Extruded Mg–Sn–Zn Alloy With Cu Addition, *Journal of Alloys and Compounds*, DOI:10.1016/j.jallcom.2018.02.013**.**

[37] Liu C.Q., Chen H. W., Liu H., Zhao X. J., Nie J. F., Metastable Precipitate Phases in Mg–9.8 wt%Sn Alloy, *Acta Materialia*, DOI: 10.1016/j.actamat.2017.10.023**.**

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Karakulak E., **Küçüker Y. B.,** Magnezyum Alaşımlarında Tane İnceltme : I-Alüminyum İçeren Alaşımlar, *Metal Dünyası,* 2015, **270**(23), 62-65.

[2] Karakulak E., **Küçüker Y. B.,** Magnezyum Alaşımlarında Tane İnceltme : II-Alüminyum İçermeyen Alaşımlar, *Metal Dünyası,* 2016, **272**(24), 70-73.

[3] Karakulak E., **Küçüker Y. B.,** Mg-5Sn-xSi Alaşımlarının Mikroyapısal Karakterizasyonu, *Metal Dünyası*, 2017, **287**(25), 75-80.

[4] Karakulak E., Hort N., **Küçüker Y. B.,** Effect of SiC Grain Refining on Wear Resistance of Mg-Al Alloys, *18th International Metallurgy and Materials Congress*, Istanbul, 29 September – 01 October 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Bilecik'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bilecik/Bozüyük'te tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun oldu. 2015-2018 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2017 yılından beri özel sektörde Metalurji ve Malzeme Mühendisi unvanı ile çalışmaktadır.