

**ALÜMİNYUM SİLİSYUM ALAŞIMI BİR YATAK
MALZEMESİNİN AŞINMA PERFORMANSINA
KOLEMANİT İLAVESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Selahattin BUDAK

**Doktora Tezi
Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mehmet KAPLAN**

OCAK-2016

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

**ALÜMİNYUM SİLİSYUM ALAŞIMI BİR YATAK MALZEMESİNİN
AŞINMA PERFORMANSINA KOLEMANİT İLAVESİNİN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Selahattin BUDAK

(101122201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 Eylül 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Ocak 2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet KAPLAN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin TURHAN (B.E.Ü)

Prof. Dr. Halis ÇELİK (F.Ü)

Doç. Dr. Tanju TEKER (ADY.Ü)

Doç. Dr. Osman BİCAN (K.Ü)

OCAK-2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, yardım ve desteklerinden ötürü danışman hocam Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr Mehmet KAPLAN'a ve deney numunelerinin üretimi aşamasında hiçbir yardımı esirgemeyen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yeşilyurt Demir Çelik Meslek Yüksekokulu Makina ve Metal Teknolojileri bölümü Öğretim Görevlisi Yusuf YAKUT'a teşekkür ederim.

Basma deneylerinin ve mikro sertlik ölçümünün yapılması için yardımlarını esirgemeyen Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Salih AKPINAR'a da teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Selahattin BUDAK

ELAZIĞ – 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	3
2. YATAKLAR VE YATAK MALZEMELERİ	7
2.1. Kaymalı Yataklar	8
2.1.1. Enine Kaymalı Yataklar	8
2.1.2. Boyuna Kaymalı Yataklar	9
2.2. Kaymalı Yatakların Yapısı	10
2.3. Yatak Malzemesinden Beklenen Özellikler	11
2.4. Kaymalı Yatak Malzemeleri	12
2.4.1. Kompozit Malzemeler	14
2.4.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	17
2.4.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	19
2.4.3.1. Dövme Alüminyum Alaşımları	20
2.4.3.2. Döküm Alüminyum Alaşımları	21
3. AŞINMA VE TEST MODELLERİ	23
3.1. Aşınma Zaman İlişkisi	25
3.2. Aşınma Türleri	25
3.2.1. Adhesiv Aşınma	26
3.2.2. Abrasiv Aşınma	27
3.2.3. Yorulma Aşınması.....	27
3.2.4. Koroziyel Aşınma	28

3.2.5.	Erozyon Aşınması	28
3.2.6.	Tabaka Aşınması	29
3.3.	Aşınmaya Etki Eden Faktörler	30
3.4.	Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri	31
3.4.1.	Kütle Farkı Yöntemi	32
3.4.2.	Kalınlık Ölçme Yöntemi	32
3.4.3.	İz Değişiminin İzlenmesi Yöntemi	32
3.4.4.	Radyo İzotoplarla Ölçme Yöntemi	33
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
4.1.	DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler ve Üretimi	34
4.2.	Sertlik Ölçümleri	36
4.2.1.	Brinell (Makro) Sertlik Ölçümü	36
4.2.2.	Vickers (Mikro) Sertlik Ölçümü	38
4.3.	Yoğunluk Ölçümleri	40
4.4.	Aşınma Deneyleri	40
4.5.	Basma Deneyleri	45
4.6.	Korozyon Deneyleri	46
4.7.	Mikroyapı İncelemeleri	48
4.8.	X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri	49
4.9.	Termal Analiz (TA) İncelemeleri	54
4.9.1.	Termogravimetrik Analiz (TG/TGA) İncelemeleri	54
4.9.2.	Diferansiyel Termal Analiz (DTA) İncelemeleri	55
5.	SONUÇLAR	57
5.1.	Sertlik Ölçüm Sonuçları	57
5.1.1.	Brinell (Makro) Sertlik Ölçüm Sonuçları	57
5.1.2.	Vickers (Mikro) Sertlik Ölçüm Sonuçları	58
5.2.	Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	59
5.3.	Aşınma Deneyi Sonuçları	59
5.4.	Basma Deneyi Sonuçları	70
5.5.	Korozyon Deneyi Sonuçları	75
5.6.	Mikroyapı İnceleme Sonuçları	81

Sayfa No

5.6.1.	Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları	81
5.6.2.	Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX İnceleme Sonuçları	86
5.7.	X-Işını Kırınımı (XRD) Sonuçları	121
5.8.	Termal Analiz (TA) İnceleme Sonuçları	125
6.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	131
	KAYNAKLAR	134
	ÖZGEÇMİŞ	144

ÖZET

Kaymalı yataklar, hareketli parçaların desteklenmesinde kullanılan makine elemanlarıdır ve bunların üretilmesinde malzeme seçimi çok önemlidir. İlk zamanlarda tahta, demir ve deri gibi malzemeler kaymalı yatak malzemesi olarak kullanım imkanı bulmuş ancak bu malzemelerin istenilen özellikleri karşılayamaması gibi nedenlerden dolayı bronz, pirinç ve beyaz metaller bunların yerini almıştır. Kaymalı yatak malzemesi olarak kullanılan söz konusu malzemelerin pahalı olması ve tribolojik özelliklerinin çoğu uygulamalar için yetersiz kalması nedeniyle son yıllarda bunların yerine alüminyum esaslı alaşımlar geliştirilmiştir.

Saf alüminyum diğer saf elementler gibi döküm kabiliyetinin kötü ve mekanik özelliklerinin yetersiz olması gibi nedenlerden dolayı; silisyum, bakır, manganez, çinko ve magnezyum başta olmak üzere çeşitli alaşım elemanları ilave edilerek matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları, dökülebilmeye uygun, düşük yoğunluklu, düşük ergime sıcaklığına sahip ve mekanik özellikleri oldukça iyidir. Silisyum karbür ve alümina gibi metalik bileşiklerle çok iyi uyum sağlarlar. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları MMK (metal matrisli kompozit) üretimi için çoğunlukla tercih edilen bir malzemedir.

Bu çalışmada öncelikle, **AlSi6ZnCuFe** alaşımını bir referans malzemesi üretilmiştir. Bir sonraki aşamada referans malzemesine ppm düzeyinde kolemanit ilave edilerek 6 değişik içerikte deney malzemesi döküm yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonra bu numuneler, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, gerekli temizleme işlemi yapılarak kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Kolemanit katkılarının deney numunelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla OM, EDX 'li SEM, DTA, DTG, TG/TGA termal analiz testleri, sertlik ölçümleri, aşınma, korozyon ve basma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, ppm düzeyindeki kolemanit ilavesinin bu yatak malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini dikkate değer oranda artırdığı tespit edilmiştir. Buna karşılık malzemenin faz dönüşüm sıcaklığı dahil diğer termal özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmediği ancak belirli kolemanit katkı oranlarında bazı numunelerde ani oksitlenmeye neden olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kaymalı yatak, Kolemanit, Aşınma, SEM, EDX

SUMMARY

Investigation of Effect of Colemanite Addition on the Wear Performance of an Aluminum Silicon Alloy Journal Bearing Material

Journal bearings are machine elements that are used in support of moving parts and selection of materials for their manufacture is very important. In the beginning, some materials such as wood, iron and leather had opportunities being used as plain bearings materials. However, because of reasons such as not to satisfy desired properties; bronze, brass and white metal has taken place of them. Aluminum based alloys have been developed in recent years to replace the mentioned materials used as journal bearings materials due to some disadvantages such as being expensive and insufficient tribological properties for most applications.

Pure aluminum like other pure elements is used as the matrix material by adding various alloying elements especially silicon, copper, manganese, zinc and magnesium for reasons such as poor castability and inadequate mechanical properties. Aluminum and its alloys are suitable for casting and they have a low density, a low melting point and their mechanical properties are quite good. They adapt well with metallic compounds such as silicon carbide and alumina. Therefore, aluminum and its alloys are often preferred material for manufacturing MMC (metal matrix composite).

In this study, firstly, a reference material of AlSi6ZnCuFe alloy has been produced. In the next step, 6 different content experimental materials have been designed with the casting method by adding ppm level colemanite to the reference material. Then, these specimens have been provided with ready to use by making the necessary cleanup for use in experimental studies.

In order to determine the effects of colemanite ingredients on the microstructure and mechanical properties of test specimens; OM, SEM with EDX, DTA, DTG, TG/TGA thermal analysis tests, hardness measurements, wearing out, corrosion and compression experiments have been carried out.

As a result of the experimental studies, it was determined that the insertion of ppm level colemanite made a considerable percentage of increase in the microstructure and mechanical properties of bearing material. In contrast, it was not observed any significant changes in other thermal properties including material phase transition temperature. However, it was determined that the insertion of colemanite caused sudden oxidation in some specimens at certain colemanite adding ratio.

Keywords: Sliding bearing, Colemanite, Wear, SEM, EDX

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Radyal kaymalı yatak ve basınç dağılımı	9
Şekil 2.2. Boyuna kaymalı yataklar	9
Şekil 2.3. Alüminyum alaşımlarında alt sınıflandırma	20
Şekil 3.1. Aşınma test modellerinin şematik görünümü	24
Şekil 3.2. Aşınmanın zamana bağlı değişimi	25
Şekil 4.1. Brinell sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi	37
Şekil 4.2. Vickers sertlik ölçme yöntemi	39
Şekil 4.3. Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihazın resimleri	40
Şekil 4.4. Aşınma deney düzeneği	41
Şekil 4.5. Aşınma deney düzeneğinde şematik kuvvet uygulaması	42
Şekil 4.6. Aşınma deneyi fotoğrafları	43
Şekil 4.7. Hassas terazi	44
Şekil 4.8. Basma deneylerinin yapıldığı universal deney cihazı	46
Şekil 4.9. Zımparalama ve parlatma cihazı	48
Şekil 4.10. Optik mikroskop cihazı	48
Şekil 4.11. Taramalı elektron mikroskop cihazı	49
Şekil 4.12. Bragg yasasının şematik gösterimi	51
Şekil 4.13. X-Işını difraktometre cihazları	52
Şekil 4.14. X-Işını difraktometre cihazının deneye hazırlanması	52
Şekil 4.15. Termal analiz cihazı	56
Şekil 5.1. Kolemanit oranına bağlı makro sertlik ölçüm sonuçları	57
Şekil 5.2. Kolemanit oranına bağlı mikro sertlik ölçüm sonuçları	58
Şekil 5.3. Kolemanit oranına bağlı yoğunluk ölçüm sonuçları	59
Şekil 5.4. Deney numunelerinin kolemanit miktarına bağlı aşınma deneyi sonuçları	60
Şekil 5.5. Deney numunelerinin kolemanit miktarına bağlı özgül aşınma oranları	60
Şekil 5.6. Numunelerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yola göre değişimi ...	61
Şekil 5.7. Numunelerde aşınma ile meydana gelen % kütle değişimi	62

Şekil 5.8. SR numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	63
Şekil 5.9. SR numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	63
Şekil 5.10. S1 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	64
Şekil 5.11. S1 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	64
Şekil 5.12. S2 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	65
Şekil 5.13. S2 numunesinin aşınma yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	65
Şekil 5.14. S3 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	66
Şekil 5.15. S3 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	66
Şekil 5.16. S4 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	67
Şekil 5.17. S4 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	67
Şekil 5.18. S5 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	68
Şekil 5.19. S5 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüsü	68
Şekil 5.20. S6 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi	69
Şekil 5.21. S6 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri	69
Şekil 5.22. Basma kuvveti uygulanan sünek malzemelerdeki fıçı oluşumu	71
Şekil 5.23. Gevrek malzemelerde basma kuvveti sonucunda meydana gelen kırılma şekilleri	71

Şekil 5.24. Basma deneyi ile gevrek kırılma şeklinde plastik şekil değişimine uğramış numuneler	72
Şekil 5.25. Deney numunelerinin basma deneyi sonuçları	73
Şekil 5.26. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı	74
Şekil 5.27. Belirgin akma göstermeyen bir malzemenin akma mukavemetinin belirlenmesine ait diyagram	74
Şekil 5.28. Deney numunelerinin kolemanit oranına bağlı akma mukavemeti değeri sonuçları	74
Şekil 5.29. Deney numunelerinin kolemanit oranına bağlı olarak korozyon etkisiyle kütle kaybı değişimi sonuçları	76
Şekil 5.30. Numunelerde korozyon deneyleri ile meydana gelen kütle kaybının zamana göre değişimi	76
Şekil 5.31. SR numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	77
Şekil 5.32. S1 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	77
Şekil 5.33. S2 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	78
Şekil 5.34. S3 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	78
Şekil 5.35. S4 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	79
Şekil 5.36. S5 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	79
Şekil 5.37. S6 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi	79
Şekil 5.38. S6 numunesinin asidik korozyon deneyleri sonucu aşınmış yüzeyinin EDX 'li SEM görüntüsü	80
Şekil 5.39. Korozyon deneyleri sonucu asidik olarak aşınan S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	80
Şekil 5.40. SR numunesinin optik mikroskop resmi	82
Şekil 5.41. S1 numunesinin optik mikroskop resmi	82
Şekil 5.42. S2 numunesinin optik mikroskop resmi	83
Şekil 5.43. S3 numunesinin optik mikroskop resmi	83
Şekil 5.44. S4 numunesinin optik mikroskop resmi	84
Şekil 5.45. S5 numunesinin optik mikroskop resmi	84
Şekil 5.46. S6 numunesinin optik mikroskop resmi	85
Şekil 5.47. SR numunesinin SEM görüntüleri	87

Şekil 5.48. SR numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	88
Şekil 5.49. S1 numunesinin SEM görüntüleri	89
Şekil 5.50. S1 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	90
Şekil 5.51. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	91
Şekil 5.52. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	92
Şekil 5.53. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	93
Şekil 5.54. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	94
Şekil 5.55. S2 numunesinin SEM görüntüleri	95
Şekil 5.56. S2 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	96
Şekil 5.57. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	97
Şekil 5.58. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	98
Şekil 5.59. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	99
Şekil 5.60. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	100
Şekil 5.61. S3 numunesinin SEM görüntüleri	101
Şekil 5.62. S3 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	102
Şekil 3.63. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	103
Şekil 3.64. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	104
Şekil 3.65. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	105
Şekil 5.66. S4 numunesinin SEM görüntüleri	106
Şekil 5.67. S4 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	107
Şekil 5.68. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	108
Şekil 5.69. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	109
Şekil 5.70. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	110
Şekil 5.71. S5 numunesinin SEM görüntüleri	111
Şekil 5.72. S5 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	112
Şekil 5.73. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	113
Şekil 5.74. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	114
Şekil 5.75. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	115
Şekil 5.76. S6 numunesinin SEM görüntüleri	116

Şekil 5.77. S6 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları	117
Şekil 5.78. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	118
Şekil 5.79. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	119
Şekil 5.80. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları	120
Şekil 5.81. SR numunesinin XRD analizi	121
Şekil 5.82. S1 numunesinin XRD analizi	121
Şekil 5.83. S2 numunesinin XRD analizi	122
Şekil 5.84. S3 numunesinin XRD analizi	122
Şekil 5.85. S4 numunesinin XRD analizi	123
Şekil 5.86. S5 numunesinin XRD analizi	123
Şekil 5.87. S6 numunesinin XRD analizi	124
Şekil 5.88. Deney numunelerinin XRD analizleri	124
Şekil 5.89. SR numunesinin TG/DTA analizi	125
Şekil 5.90. S1 numunesinin TG/DTA analizi	126
Şekil 5.91. S2 numunesinin TG/DTA analizi	126
Şekil 5.92. S3 numunesinin TG/DTA analizi	127
Şekil 5.93. S4 numunesinin TG/DTA analizi	127
Şekil 5.94. S5 numunesinin TG/DTA analizi	128
Şekil 5.95. S6 numunesinin TG/DTA analizi	128

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Alüminyum dövme alaşımları	21
Tablo 2.2. Alüminyum döküm alaşımları	22
Tablo 4.1. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi	35
Tablo 4.2. Kolemanitin kimyasal bileşimi	35
Tablo 5.1. Basma deneyi sonuçları	75
Tablo 5.2. TG/TGA analiz sonuçları	130

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Motorlarda silindir içerisinde meydana gelen değişimi, hareket mekanizmaları ile yardımcı makinelere aktaran, pistonların hareketlerini devire dönüştürülmesini sağlayan krank mili ve kam mili gibi hareketli elemanları taşıyan hareketsiz kısımlara yatak denilmektedir. Motorun çalışma sırasında yatağın herhangi bir yeri hareket almıyor ve mil, yatak içerisinde sürtünerek dönme hareketi yapıyorsa, bu tür yataklara da kaymalı yatak denir. Yatak üretiminde kullanım yerlerine göre yatak malzemesinin belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak kaymalı yataklar, aşınmaya ve korozyona dayanıklı, ısı iletkenlik katsayısı ve yağ tutuculuk özelliği iyi, sert parçacıkları bünyesine kabul edecek kadar yumuşak olmalıdır, bunlara ilaveten üretimi ve işlenmesi kolay olmalıdır.

Kaymalı yatak malzemesi olarak, önceleri tahta, demir, deri vb. malzemeler kullanılmıştır. Zamanla bunların yerini pirinç, bronz, beyaz metal almıştır. Son zamanlarda da yatak üretiminde alüminyum ve çinko esaslı malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Kaymalı yatakların üretiminde kullanım yerlerine göre beklenen özellikleri sağlayan malzemelerin seçilmesi önemlidir. Bu amaçla teknolojik ilerlemeler ile birlikte devamlı yağlama imkanı olmayan yerlerde kendinden yağlamalı sinter yataklar ve belirli kullanım alanları için polimer malzemelere geçilmiştir. (Ünlü vd., 2005).

Kaymalı yatak malzemesi seçiminde, yatak malzemesi mil malzemesinden sert olmayacak şekilde seçilerek, metal-metal aşınmasının azaltılması amaçlanmaktadır. Mil ise çelikten yapılmakta ve sertleştirme işlemi uygulanmaktadır. Böylece aşınma deneylerinde mil malzemesinde önemli bir aşınmanın meydana gelmediği varsayılmaktadır. Kaymalı yatakların aşınma test düzenekleri, sadece kaymalı yatak malzemesinin aşınmasını incelemek üzere tasarlanmaktadır (Tevrüz, 1997).

Kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılan bronz, pirinç ve dökme demir gibi malzemelerin pahalı olması ve tribolojik özelliklerinin çoğu uygulamalar için yetersiz kalması nedeniyle bunların yerine çinko esaslı alaşımlar geliştirilmiştir. Ancak, bakır içerikli çinko esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlarda biri boyutsal kararsızlık, diğeri de düşük süneklik olmak üzere iki önemli sorunla karşılaşmıştır. Bu nedenle, çinko esaslı alaşımlar yerine alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalar; çinkonun alüminyum ile değiştirilmesinin, boyutsal kararsızlık problemini büyük ölçüde giderebileceğini ve sünekliği önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermiştir (Bican, 2010; Pürçek vd., 2002; Savaşkan ve Bican, 2005; Savaşkan ve Bican, 2010).

Alüminyum, demir dışı metallerin en önemlilerinden birisidir. Hafifliği, dayanıklılığı, kolay işlenebilmesi, ısı ve elektriği iletmesi, oksitlenmeye karşı direnci, manyetik ve zehirli olmaması, ışığı yansıtması ve göze hoş gelen görünümü alüminyum malzemelerin en önemli özellikleridir. Özellikle ağırlık/dayanım oranının düşüklüğü, oksitlenme direnci, ışık yansıtma ve anodik olarak kaplanabilme özelliği alüminyum malzemeleri otomotiv sanayiinde çok kullanılan bir metal konumuna getirmiştir (URL-1, 2014).

Alüminyum ve alaşımları dökülebilmeye uygun, düşük yoğunluklu, düşük ergime sıcaklığına sahiptirler. Mekanik özellikleri oldukça iyidir ve silisyum karbür ve alümina gibi seramiklerle çok iyi uyum sağlarlar. Bu yüzden metal matrisli kompozit (MMK) üretimi için oldukça popüler bir malzemedir. Birçok metal gibi alüminyumda saf halde döküm kabiliyetinin kötü oluşu ve mekanik özelliklerinin çok iyi olmaması gibi nedenlerden dolayı genellikle bunların yerine alaşımlı alüminyumlar kaymalı yatak matris malzemesi olarak tercih edilmektedir (Güler, 2012).

Alüminyum alaşımları, çoğu zaman içerisine katılan silisyum vb. parçacıkların malzemenin sertliğini artırmasından dolayı, metal matrisli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadırlar (Alshmrı vd., 2014). Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler (Al MMK), SiC, TiC, Si₃N₄, ve MgO gibi çeşitli partiküllerle güçlendirilmektedirler. Bundan başka Al₂O₃, B₄N ve bor ürünleri de takviye elemanları olarak kullanılmaktadır (Das vd., 2007; Toptan, 2011; Güler, 2012).

1.2. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Çuvalcı (2001), ticari ZA-27 ve birçok hazır kaymalı yatağı laboratuvarında kaymalı yatak test sisteminde farklı çalışma şartlarında sürtünme deneyleri ile yatakların sürtünme davranışlarını araştırmıştır. Yatak elemanında, oluşan basıncın sürtünme faktörü üzerinde etkisi olduğunu ve artan basınçla bu değerlerin kayda değer bir şekilde düştüğünü ve ayrıca yatak mil arası boşluk miktarının artmasıyla da yataklarda oluşan sürtünme faktörü ve sürtünme katsayı değerlerinin düştüğünü belirtmiştir.

Ranganath vd. (2001), 30 – 50 µm arası tane büyüklüğüne sahip garnet ($\text{Fe}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) takviyesinin ZA-27 alaşımı kompozitin kuru sürtünme ortamındaki aşınma direncini arttırdığını ve dolayısıyla garnet miktarının artmasıyla aşınma oranında da azaldığını tespit etmişlerdir.

Savaşkan vd. (2002), çinko-alüminyum esaslı alaşımların ve bu alaşımlardan üretilen kaymalı yatakların özellikleri hakkında çalışmalar yapmışlardır. Deney numunelerinin aşınma özellikleri pin-on-disk tabanlı bir aşınma test düzeneği ile incelenmiştir. Yataklar içerisinde en az aşınmanın $\text{ZnAl}_{40}\text{Cu}_2\text{Si}$ alaşımlı yatak elemanında olduğunu ifade etmişlerdir.

Pürçek vd. (2002), çalışmalarında çinko alüminyum alaşımlarından imal edilen kaymalı yatak malzemelerini yatak aşınma deney cihazında kuru sürtünme ortamında, SAE 4140 çelik disk üzerinde test etmişlerdir. Deneyler sonucunda SAE 660 bronz kaymalı yatak malzemesine, göre üretilen alaşımın kuru sürtünme aşınma direncinin daha yüksek olduğunu ve % 1 Si ilavesinin alaşımın çekme mukavemetini, sertliğini ve aşınma direncini arttırdığını ancak sünekliğini azalttığını tespit etmişlerdir.

Zhu vd. (2002), çalışmalarında alüminyum esaslı kaymalı yatak alaşımlarına, silisyum, bakır ve magnezyum ilavelerinin kompozitin sertlik, mukavemet ve aşınma direncini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca alaşım matrisinin mukavemet ve mikroyapı özelliklerinin aşınma davranışına etkilerinin önemli bir etken olduğunu da eklemişlerdir.

Lasa ve Rodriguez-Ibabe (2002), Al-Si alaşımına % 1 – 5 arası ilave edilen Cu miktarının alaşımın kuru sşrtşnme ortamındaki aşınma direncini arttırdığını tespit etmişlerdir.

şnlş vd. (2005), bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda aşınma ve sşrtşnme özelliklerinin karşılaştırılması konulu yaptıkları çalışmada; kaymalı yatak malzemesi olarak CuSn10 bronzu ile CuZn30 pirincinden şretilen yatakların aşınma ve sşrtşnme özelliklerini belirlemek için bir takım deneyler yapmışlardır. alışmalar sonucunda, kuru ortamda yapılan aşınma testlerinde sşrtşnme katsayısı ve ağırlık kaybında yşkselme, yağlı ortamda ise bu değerlerde çok daha dşşme olduğunu belirtmişlerdir.

Kori ve Chandrashekharaiiah (2007), çalışmalarında, alşminyum alaşımına ilave edilen silisyum miktarının artmasıyla aşınma oranının azaldığına dikkati çekmişlerdir.

şnlş vd. (2009), kaymalı yatakların değişik parametrelere gşe tiribolojik özelliklerini belirlemek ve bu unsurların kaymalı yatak şzerindeki etkilerini incelemek için radyal kaymalı yatak aşınma cihazı tasarımı yapmışlardır. Bu cihaz şzerinde belirli parametrelere gşe, T/M ve dőkřm yşntemiyle şretilmiş CuSn10 ve Fe-C yatakların mikroyapı ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, deneyler gerçekleştirilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, dőkřm malzemelerin mekanik özelliklerinin T/M yataklara gşe daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Savaşkan ve Bican (2010), Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının sşrtşnme ve aşınma özelliklerini, geniş bir basınç ve kayma hızı aralığında pin-on-disk test cihazı kullanarak incelemişlerdir. Basınç ve kayma hızının artmasıyla orantılı olarak sıcaklık ve aşınma hacminin de arttığı sonucuna varmışlardır.

Kori ve Prabhudev (2011), dşşşk oranlarda bakır ilavesinin Al - 7Si - 0,3Mg alaşımının aşınma davranışına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmalarda, kayma mesafesinin, kayma hızının ve basıncın artmasıyla A356 alaşımının da aşınma oranının arttığı, ancak bu alaşıma % 0,5 Cu ilavesiyle aynı test koşullarında daha az aşınma meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Feyzullahoğlu ve şakiroğlu (2011), deneysel çalışmalar için şretmiş oldukları alşminyum esaslı kaymalı yatak malzemelerinden, en yşksek sertliğe sahip malzemenin (Al8.5Si3.5Cu) kuru sşrtşnme ortamında en yşksek aşınma direncini gşsterdiğini tespit etmişlerdir.

Rana vd. (2012), Al-Si alaşımlarının aşınma dirençlerinin ve kütle kayıplarının artan Si oranı ile iyileştirilebileceğini tespit etmişlerdir.

Feyzullahoğlu vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada aşınma miktarının alüminyum esaslı kaymalı yatak malzemelerinin sertliğine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sert olan alüminyum esaslı alaşımların daha iyi aşınma direnci gösterdiklerini öne sürmüşlerdir.

Bican (2014), yapmış olduğu çalışmada vakum infiltrasyon yöntemiyle üretilen MgO ile güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve kuru kayma aşınma özelliklerini incelemiştir. Çalışmada MgO ilavesinin artmasıyla kompozitlerin sertlik ve çekme mukavemetlerinin yükseldiğini, ayrıca yükleme ve kayma hızının artmasıyla aşınma hacminin arttığını belirlemiştir.

Baradeswaran ve Perumal (2014), Al 7075 alaşımına grafit ilavesinin tribolojik ve mekanik davranışlarına kuru sürtünme şartlarında etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları aşınma testleriyle minimum aşınma oranı için gerekli olan grafit miktarını belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada % 5 grafit ilaveli kompozitin referans alaşıma göre en iyi özellikleri sergilediğini tespit etmişlerdir.

Sivakumar vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada, LM24 (Al-Si8Cu3.5) alaşımı referans malzemeye garnet ($\text{Fe}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) ilave edildiğinde, kuru sürtünme ortamında daha düşük aşınma oranına sahip oldukları sonucuna varmışlardır.

Yukarıda belirtilen çalışmalarda da görüldüğü gibi çeşitli bileşimlere sahip kaymalı yatak malzemelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalarda, kaymalı yatak malzemesine Cu, grafit ve garnet vb. takviyeler yapılmış ve referans malzemeye göre özelliklerinin geliştiği belirtilmiştir. Ancak yapılan literatür araştırmalarında $\text{Al}_6\text{SiZnCuFe}$ alaşımı bir kaymalı yatak malzemesine bor veya özellikle kolemanit katkılı çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla çalışmamızda alüminyum silisyum alaşımı bir yatak malzemesine bir bor minareli olan kolemanit ilavesinin mikroyapı, mekanik, termal ve asidik korozyon özelliklere etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Bor elementi esas itibarıyla metal üretimi endüstrisinde metalurjik reaksiyonlarda bir oksijen ve gaz giderici olarak kullanılır. Zira yüksek sıcaklıklarda oksijen ve azot ile kuvvetli reaksiyon verir. Örneğin, bakır metalurjisinde döküm sırasında erimiş bakır içine bor karıştırılarak erimiş kütledeki oksijen giderilir. Diğer önemli uygulanma alanları olarak; bazı özel alaşımların yapımında, yarı iletken üretiminde, katalizör olarak, aşındırıcılarda, metal

ve seramiklerde mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde, nükleer reaktörlerin inşasında yüksek yoğunluklu betona bir katkı maddesi olarak, uranyum-grafit pillerinde bir kontrol aracı olarak nötronları soğurmak (tutmak) gibi (bor çeliği veya B₄C şeklinde) sayılabilir (Güzel, 2006).

Türkiye’deki tüm bor yataklarının neredeyse tamamından çıkartılabilen kolemanit, metal sanayiinde kullanıma elverişli bir mineraldir (Helvacı, 2003). Birçok metal üretimi alanında yararlanılmaya başlanılan bor ve bor ürünleri, ülke ekonomisini dışarıya bağımlı olmaktan bir miktar kurtaracaktır. Bir bor ürünü olan kolemanit üretimi yerli kaynaklarla gerçekleştirildiği için katkı elemanı olarak kullanımı ekonomik ve temini oldukça kolay olacaktır.

Çalışmamıza konu olan alüminyum silisyum alaşımı kaymalı yatak malzemesi halihazırda krank mili yatağı, halat sarıcı, plastik hacim kalıpcılığında şişirme kalıp malzemesi, motor takozunda, atık su pompa fanı, çim biçme makinesi motorunun kasnak kısmında, asansör redüktör gövdesinde hafif ve sağlam olduğu için aktif olarak kullanılmaktadır. Bu yatak malzemesinin mikroyapı, mekanik, asidik korozyon direnci ve termal özelliklerini kolemanit minareli katkılarının nasıl etkileyeceği merak konusudur. Aynı zamanda ülkemiz için önemli bir yere sahip olan bor elementinin hammaddesi olan kolemanit ürününe de yeni bir kullanım alanı açılmış olacağı düşünülmektedir.

Yapılan literatür incelemelerinde bu tez çalışmasında öngörülen “kolemanit katkılı alüminyum silisyum alaşımı bir yatak malzemesinin aşınma özelliklerinin incelenmesi” konusunda herhangi bir çalışmaya rastlanılmamış olması da bu konuya yönelmemize neden olmuştur. Dolayısıyla yapılacak olan bu çalışmanın gerek yatak malzemesi üretimi ve gerekse bu alandaki literatür konusunda malzeme bilimi ve üretimine önemli katkılar sağlayacağı ümit edilmektedir. Bu nedenle, kolemanit katkı oranının Al matrisli kaymalı yatak malzemesinin mikroyapı, mekanik, termal ve oksitlenme özelliklerine ve özellikle de aşınma performansına nasıl bir etki yapacağının araştırılması amacıyla bu tez konusunun; *“Alüminyum Silisyum Alaşımı Bir Yatak Malzemesinin Aşınma Performansına Kolemanit İlavesinin Etkisinin İncelenmesi”* olması kararlaştırılmıştır.

2. YATAKLAR VE YATAK MALZEMELERİ

Yataklar, makinelerde ortaya çıkan kuvvetlerin karşılanmasında kullanılan destekleme elemanlarıdır. Genel olarak kuvvetlerin taşınmasında, bir yüzeyden diğer bir yüzeye yük iletimi yağ filmi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu şekilde sürtünme açısından en az kayıp ile darbe ve titreşimleri de sönümleyebilen bir akışkan tabakası üzerinden taşıma gerçekleştirilmektedir (Duman, 2002).

Muyluları çevreleyerek destekleyen ve dönebilmelerini sağlayan makine elemanlarına, yatak denir (Çerik, 1986).

Dönel ve doğrusal hareket altında kuvvet ve hareket ileten mil, aks ve tabla gibi elemanların eksenel ve radyal yöndeki kuvvetleri taşıyan ve destekleyen elemanlara yatak denir (MEGEP, 2011).

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde oluşturulan yük veya gücü, makinenin hareket mekanizmaları ile yardımcı makinelere aktaran, piston eksenel hareketlerini devir hareketine dönüştürülmesini sağlayan krank mili, kam mili vb. hareketli parçaları taşıyan hareketsiz kısımlara “yatak” ve bunların yüzeylerine de “yatak yüzeyi” adları verilir (Çerik, 1986; Can, 2005).

Yataklar krank muylularından daha çok aşınan yumuşak metal kaplı değiştirilebilir zarflardır (Can, 2005).

Motorların gelişmesi, yatakların yapım mükemmelliğiyle yakından ilgilidir. Çünkü motor gücünün, veriminin artması ve çalışma düzeni üzerinde, yatakların payı büyüktür.

Yataklar yapısal özelliklerine göre, iki gruba ayrılabilir (MEGEP, 2011):

- A. Kaymalı yataklar,
- B. Yuvarlanmalı yataklar.

2.1. Kaymalı Yataklar

Motorun çalışma sırasında yatağın herhangi bir yeri hareket almıyor ve muylu, yatak içerisinde sürtünerek dönme hareketi yapıyorsa, bu tür yataklara kaymalı yatak denir (Çerik, 1986).

Kaymalı yataklar, sarsıntı ve titreşimli yerlerde uygun ve sürekli yağlama yapıldığı takdirde uzun ömürlü olup çok kullanılır. Bu yataklar ucuzdur ve oldukça sessiz çalışır. Büyük güç veya kuvvetlerin iletilmesinde tercih edilir. İçten yanmalı motorlarda, krank millerinde, haddehane makinelerinde, takım tezgâhlarında, taşıma iletme, kaldırma makinelerinde, bantlı konveyörlerde, konkasörlerde, helezonlu taşıyıcılarda, kara ve demir yolu taşıtlarında, değirmen makinelerinde ve endüstrinin birçok alanında kullanılırlar (MEGEP, 2011).

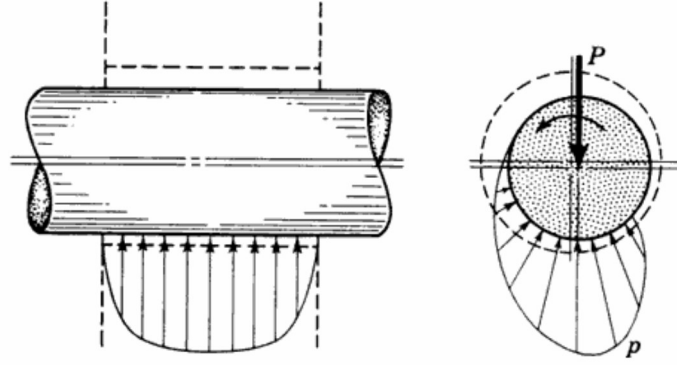
Kaymalı yataklar çeşitli durumlar dikkate alınarak sınıflandırılır. Kuvvet doğrultularına göre eksenel ve radyal yataklar, yağlama bakımından ise sıvı ve kuru sürtünmeli yataklar olarak sınıflandırılabilir.

Yatağa gelen yükün yönüne göre kaymalı yataklar:

- Enine (radyal) kaymalı yataklar
- Boyuna (eksenel) kaymalı yataklar olarak sınıflandırılabilir (MEGEP, 2011; Gökler, 2012).

2.1.1. Enine Kaymalı Yataklar

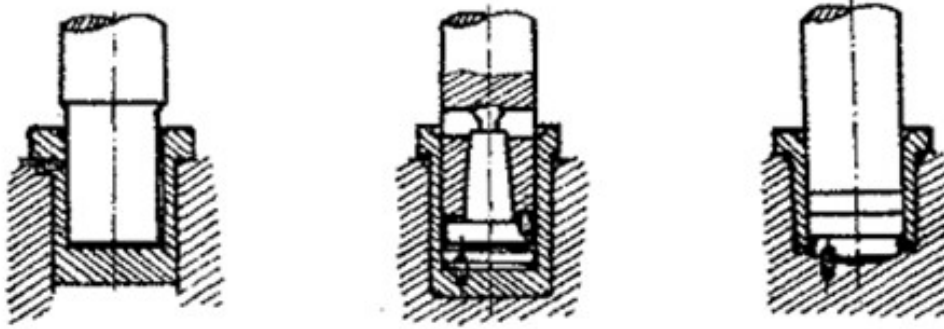
Enine kaymalı yataklara, radyal kaymalı yataklar da denilmektedir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi bu tür yataklarda yük, yatak eksenine dikey konumda etkimektedir. P kuvveti mil dönerken milin yatağa yaslanma yüzeyine şekildeki gibi basar ve kuvvet merkez kaç etkisi ile yumurta grafiği dağılımına benzer şekilde yaslanma yüzeylerinden kenarlara gittikçe azalır (Çerik, 1986; Can, 2005).



Şekil 2.1. Radyal kaymalı yatak ve basınç dağılımı (Gökler, 2012).

2.1.2. Boyuna Kaymalı Yataklar

Boyuna kaymalı yataklara, aksiyal kaymalı yataklar da denilmektedir. Bu tür yataklarda yatağa gelen yük, yatak eksenine paralel olarak etmektedir. Boyuna kaymalı yataklar düşey konumda çalışan millerin yataklarıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Boyuna kaymalı yataklar (Gökler, 2012).

Yağlama bakımından kaymalı yataklar sıvı ve sınır sürtünmeli olabilirler. Bu son durumdaki yataklara kuru sürtünmeli yataklarda denir. Sıvı sürtünmeli yataklar hidrodinamik, gazodinamik, hidrostatik ve gazostatik olmak üzere dört guruba ayrılmaktadır (Akkurt, 1997).

2.2. Kaymalı Yatakların Yapısı

Sıvı sürtünme şartlarında, yani kayma yüzeyleri birbirinden tam olarak ayrılmış durumda çalışan yataklarda bile, makine durgunluktan harekete veya hareketten durgunluğa geçerken mil ve yatak arasında metalik temas ve bununla birlikte kuru veya sınır sürtünme meydana gelmektedir. Sürtünme ise aşınma ve sıcaklık yükselmelerine sebep olmaktadır. Sürtünme nedeniyle oluşan aşınmaları önlemek için uygulanması gereken tedbirlerden birisi temasta bulunan malzemelerin farklı yapıda ve farklı sertliklerde seçilmesidir. Yani biri diğerinden daha yumuşak olmalıdır. Yatak sisteminde mil çelikten, yatak ise çeliğe nazaran daha yumuşak malzemeden yapılır (Akkurt 1997).

Genel olarak yatak malzemelerinden, iyi bir basma ve yorulma mukavemeti, aşınmaya ve korozyona dayanıklılık, gömme kabiliyeti yani yağ içinde bulunabilecek veya dışarıdan yatağa girebilecek sert partikülleri aşınmayı önlemek için bünyesi içine gömebilecek, sürtünme katsayısı küçük, iyi bir yapılma kabiliyetine sahip, kolay işlenebilme gibi özellikler beklenir (Gökler, 2012; Ertürk 2010).

Maksimum basınç, ortalama basınçtan birkaç kat büyük olabileceğinden yatağın basma mukavemeti kalıcı deformasyona uğramayacak kadar yüksek olmalıdır. Tekrarlı yüklere dayanabilmesi için yorulma mukavemeti yüksek olmalıdır. Özellikle uçak ve otomotiv sanayi için bu önemlidir. Mildeki sehimler ya da birtakım hatalar yatağın plastik deformasyonu ile karşılanabilmektedir. Yatak içine giren partiküller aşındırıcı etki yaparak kısa zamanda yatak ve mili bozar. Yatak malzemesi bu tür partiküllerin içine gömüleceği kadar yumuşak olmalıdır (Akkurt, 1997).

Otomobil motorlarından son zamanlarında daha yüksek performans ve daha düşük yakıt tüketimi talep edilmektedir. Bu talepler yatakların zorlu koşullar altında çalışmasını gerektirmektedir. Bunun sonucu olarak, motor yatakları daha yüksek yükler altında ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır. Yüksek performanslı yeni teknolojiye sahip motorlarda motor yağının viskozitesinin düşük olması, mil ve taşıyıcı arasındaki yağ filminin kalınlığının azaltılması istenmektedir. Bu şartlar altında kullanılan geleneksel yatak malzemelerinin en önemli problemi, düşük aşınma direncidir.

Motor yatakları, yanmanın oluşturduğu kuvvetlerin değişik etkilerine dayanabilmeli, uzun ömürlü olmalı sık sık arıza yapmamalı, muyluları çabuk aşınma ve bozulmalardan korumalı, milin serbest bir şekilde sessizce dönmesini sağlamalıdır.

Yatak malzemeleri, yataklardan beklenen tüm özellikleri karşılayacak tek bir metal bulunmadığından, çeşitli elementlerin bileşiminden oluşan alaşımlardır. Alaşım içerisinde bulunacak elementlerin cins ve miktarları, bunların kullanılacağı motorların özelliklerine ve çalışma koşullarına göre değişir. Bu nedenle yatak malzemesinin mukavemeti gerek soğuk gerekse sıcakken yeterli bir değerde olmalıdır. Ayrıca kuru sürtünme katsayısı düşük, korozyona dayanıklı, ısı iletkenlik katsayısı iyi, yağ tutuculuk özelliği iyi olmalı, sert parçacıkları bünyesine kabul edecek kadar yumuşak olmalıdır, bunlara ilaveten üretimi ve işlenmesi kolay olmalıdır.

Yataklardan istenilen bu birbirine zıt olarak kabul edilebilecek özelliklerinin tamamını ideal olarak sağlamak pratik olarak mümkün değildir. Bu özelliklerin bir optimum değeri, alaşımlarla sağlanabilmektedir. Bu nedenle uygulamada çok farklı içerikli ve bileşimlere sahip kaymalı yatak malzemesi üretilmektedir. Birçok firma tarafından değişik yatak malzemeleri geliştirilmektedir.

2.3. Yatak Malzemesinden Beklenen Özellikler

a. Yağlamanın iyi yapıldığı ve yükün bütünüyle sıvı sürtünme ile karşılandığı durumlarda yatak malzemesinin gerekli mukavemet ve rijitlikte olması yeterlidir. Fakat uygulamada böyle ideal koşulları yakalamak mümkün olmadığından yatak malzemesinden belli özellikleri karşılaması beklenir.

b. Maksimum basınç ortalama basınçtan bir kaç kat büyük olabileceğinden yatağın basma mukavemeti kalıcı deformasyona uğramayacak kadar yüksek olmalıdır.

c. Tekrarlı yüklere dayanabilmesi için yorulma mukavemeti yüksek olmalıdır. Özellikle uçak ve otomotiv sanayi için bu önemlidir.

d. Mildeki sehimler yada birtakım hatalar yatağın plastik deformasyonu ile karşılanabilmelidir.

e. Yatak içine giren partiküller aşındırıcı etki yaparak kısa zamanda yatak ve mili bozar. Yatak malzemesi bu tür partiküllerin içine gömüleceği kadar yumuşak olmalıdır.

f. Yatağın sınır sürtünme koşullarında ya da yağsız ortamlarda aşınmadan, çizilmeden ve sarmadan çalışması, yük altında harekete başlayan ya da yetersiz yağlamanın beklendiği durumlarda önemlidir. Bu nitelik mil, yatak ve yağlayıcının uyumuna bağlıdır. Yakın özellikteki malzemeler birbirlerini kolayca aşındırırlar. Bu sebeple, genel prensip olarak farklı cins ya da farklı ısıl işlem görmüş metaller kullanılır. Birçok uygulama için mil çelikten yapıldığından sert bir mil ve daha yumuşak yatak malzemesi seçilir. Böylece hem aşınmalar azaltılmış, hem de sadece yatağın aşınması sağlanmış olur. Mil ve yatağın pürüzlülüğü de önemlidir. Mikro sivrilikler yağ filminin yırtılması, dolayısıyla aşınmalara sebep olur.

g. Isıyı kolayca iletebilmeleri için ısıl iletkenlik katsayıları yüksek olmalıdır.

h. Geniş sıcaklık aralığında çalışan yerlerde ısıl genişleme katsayıları düşük olmalı.

i. Düşük sürtünme katsayısı olmalıdır.

Tüm bu beklentileri karşılayabilecek yatak malzemesi bulmak zordur. Hatta bazı beklentiler birbirinin zıddı özellikler gerektirir. Örnek verilecek olursa yatağın basma mukavemetinin yüksek olması ve mildeki deformasyonları karşılayabilmesi gerekir. Sadece bir nedenden değil de birden çok nedenlerden dolayı tek bir yatak malzemesi yerine farklı özellikleri üstün olan birçok yatak malzemesi kullanılmaktadır (Çerik, 1986).

2.4. Kaymalı Yatak Malzemeleri

Kaymalı yatak gövdeleri genellikle dökme demirden yapılır. Çelik dökümden yapılanları güç ve hız gereken yerlerde kullanılır. Yatak gövdesi kaymalı yatak olarak kullanıldığında, mil uçları doğrudan gövde gereci olan dökme demir üzerinde çalışır. Burada yağlamanın önemli olduğu gözden uzak tutulmamalıdır.

Kaymalı yatak malzemesi olarak yumuşak malzemelerden yapılan alaşımlar kullanılır. Aşağıda kaymalı yatak malzemeleri açıklanmıştır.

a- Dökme demir: Dönme hareketin düşük hızda olduğu yerlerde DDL 28, DDL 20, DDL 25, DDL 35 gereçleri kullanılır. GG - 15 ve GG - 20 düşük yüklemeler, GG - 25 ve GG - 30 ise yüksek yüklemeler için uygundur. Kullanım yerleri, düşük yüklü transmisyon yatakları, ev cihazları ve basit yataklardır.

b- Çelik döküm: Bir çeşit döküm yoluyla biçimlendirmedir. Büyük hız ve güç ileten yataklar çelik dökümden (DÇ 50, DÇ 60) üretilir.

c- Bronzlar: Yüksek hızlarda, büyük güçlerin iletilmesinde D – Cu Pb 5 Sn 10, D – Pb Bz 25, D – Sn Bz 10 ve D - Sn Pb Bz 5 gereçleri kullanılır.

d- Beyaz metaller (kalay alaşımı): Beyaz madenin yapısı yumuşak bir kalay kütlesi içinde dağılmış sert kristaller şeklindedir. Bunlar yumuşak metaller olup mil ucuna zarar vermeden kolayca alıştırılabilir. Bu yüzden mil malzemesiyle iyi bir eş çalışma özelliği ve gömme yeteneği gösterir. Korozyon ve aşınmaya dayanıklıdır. Oldukça düşük sürtünme katsayısı vardır. Buna karşılık sertliği, basınç ve yorulma mukavemetleri nispeten düşüktür. Dayanımları düşük olduğundan bazı durumlarda bakır ve antimon katılarak güçlendirilir. Bu özellikler sıcaklığın artmasıyla ani bir düşüş gösterir.

e- Bakır alaşımları: En çok kullanılanlardan biri bronzdur. Bronz kolaylıkla işlenebilen, korozyona karşı iyi bir dayanıklılık gösteren, nispeten küçük bir sürtünme katsayısı yaratan ve oldukça sert bir malzemedir. Bakır esasına dayanan yatak malzemelerinin ana kütlelerini sert bakır oluşturur. Diğer alaşım elementlerinin (Sn ve Pb) yumuşak kristalleri ise bu sert kütle içinde yayılmış durumdadır. Kaldırma makinalarında, türbinlerde, pompalarda ve takım tezgahlarında kullanılırlar.

f- Kadmiyum alaşımları: Sürtünme katsayısı küçük, yük taşıma yeteneği ve yorulma mukavemeti yüksektir.

g- Alüminyum alaşımları: Bu tip yatak gereçleri sert, yük taşıma kapasiteleri ve korozyon direnci yüksek, ekonomik gereçlerdir. İçten yanmalı motorlarda krank mili yataklarında kullanılır. Korozyona dayanıklılığı, iyi ısı iletkenliği ve aşınma özellikleri beyaz madene yakın olan bu alaşımların başlıca mahsuru; ısıl genleşme katsayısının büyük olmasıdır. Nispeten sert olması sebebiyle gömme kabiliyeti düşüktür.

Normal montaj ve çalışma şartlarında, döküm veya sertleştirilmiş krank millerinde alüminyum yataklar iyi sonuç vermektedir (URL-2, 2014).

h- Gümüş alaşımları: Pahalı olan bu yatak malzemesi, büyük zorlanmalar gören yataklarda, başka yatakların yetersiz olduğu yerlerde ve uçak sanayinde kullanılmaktadır.

i- Gözenekli metal (sinterlenmiş malzemeler): Metal tozlarının preslemeyle sıkıştırılıp pişirilmek suretiyle (sinterleme) elde edilen geçirgen metal gereçlerdir. Yağlama gözeneklere emdirilerek depolanır. Çalışma sırasında yağ, birbirine bağlı boşluklarda hareket etkisiyle dolaşır. Mil ucuyla yatak zarfı bu şekilde yağlanır. Bu tip yataklara kendinden yağlamalı yataklar da denilmektedir.

j- Plastik malzemeler: En çok kullanılan plastik malzeme naylon ve teflondur. Sürtünme katsayıları küçüktür, suya, özellikle teflon kimyasal çözücülere dayanıklıdır. Ancak ısı iletkenlikleri kötüdür, ısı genleşme katsayıları büyüktür. Kuru yatak olarak çalışır. Uzun süre yağa ihtiyaç yoktur. Çelik veya bronzdan bir yatak çerçevesi gerektirebilirler (MEGEP, 2011; URL-3, 2014).

2.4.1. Kompozit Malzemeler

Zayıf yönlerini düzelterek daha iyi özellikler kazandırmak için bir araya getirilmiş değişik türde malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme bütününe kompozit malzeme adı verilmektedir. Örnek olarak, cam elyafı polyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, araç lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermentler örnek olarak verilebilir (Baysal, 2010; Çetin, 2007).

Kompozitler, birden daha fazla sayıdaki aynı ve/veya aynı olmayan malzeme gruplarının en üstün yönlerini, eskisinden farklı ve tek bir malzemede bir araya getirmek amacıyla, gözle görünecek şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Bu malzemeler, esas malzemelerde olmayan bir özellik birleşimini elde etmek için bir araya getirilir ve kompozitler üretilmiş olur (Kurt, 2010).

Kompozit malzemelerin tercih edilmesindeki en büyük nedenler mukavemet, bükülmezlik, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve iletkenlik özelliklerinin alışılmışın dışında olmasıdır. Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerin her birinin en üstün yönleri bir arada görülmelidir. Kompozit malzemenin,

kimyasal bileşimi birbirinden farklı en az iki malzemenin bir arada bulunmasıyla oluşması ve genel olarak belirli bir ara yüzeyle ayrılması gerekmektedir (Kurt, 2010).

Kompozitler hakkında uygun bir ortak tanım yoktur. Fakat herhangi bir tanım genellikle şu noktaları içermelidir.

1. Kompozit, iki ya da daha fazla fiziksel olarak ayrı ve mekaniksel olarak ayrılabilir malzemelerden meydana gelir.

2. Kompozit, iki farklı malzemenin birisinin (takviye malzemesi) diğeri (matris malzemesi) içerisinde dağılımıyla meydana gelir.

3. Kompozitlerin özellikleri kompoziti meydana getiren malzemelerin özelliklerinden çok farklıdır. Bazı durumlarda özellikleri çok üstündür (Çalın, 2006).

Endüstride kullanım alanları giderek artan kompozit malzemelerin kullanılma amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek mukavemet
- Yüksek elastikiyet modülü
- Düşük yoğunluk
- İyi kırılma tokluğu
- İyi aşınma dayanımı
- İyi yorulma dayanımı
- Isıl iletkenlik
- Elektriksel iletkenlik
- Estetik görünüm (Palta, 2009).

Kompozitler genellikle kullanılan matris malzemesi ve takviye elemanının şekline ve cinsine göre sınıflandırılmaktadırlar.

Matris malzemesine göre kompozitler:

- a. Polimer matrisli kompozitler
- b. Seramik matrisli kompozitler
- c. Metal matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılırlar.

Polimer matrisli kompozitler, düşük yoğunluk, ekonomiklik, kolay üretilebilirlik, mekanik özelliklerinin iyi olmaları ve yalıtkanlık gibi özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımını büyük oranda matris malzemesi belirler. Plastik esaslı kompozitlerin ısı dayanımlarının düşük olması onların bir dezavantajıdır. Plastik esaslı kompozitler; yayma yöntemi, basma kalıplama ve transfer kalıplama, soğuk pres kalıplama, helisel sarma, torba kalıp ve profil çekme yöntemleri kullanılarak üretilirler (Çalın, 2006).

Seramikler ergime sıcaklıkları yüksek, yoğunlukları ve ısı genleşme katsayıları düşük, yalıtkan ve sert malzemelerdir. Ancak aşırı derecede gevrek malzemelerdir. Kimyasal ve ısı etkilere karşı dirençleri yüksektir.

Metaller saf halde yumuşak ve dayanımları düşük ancak alaşım yapılmak suretiyle sınırsız özellikler elde edilebilir. Metaller çoğunlukla seramik, nadiren refrakter takviye elemanları ile güçlendirilerek metal matrisli kompozit malzemeler üretilmektedir (Çalın, 2006).

Teknolojik gelişmelere paralel olarak ve güncel kullanıma uygun olacak şekilde, ekonomik ve teknik yönden üstünlükleri olan malzemelerin üretilmesi gerekli olmuştur. Bu sebeplerden dolayı metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. MMK malzemelerinin üretilmesi ve bunların geliştirilmesi, son yıllarda ve özellikle son 30 yıl içerisindeki metalürji alanındaki yeniliklerin en büyüklerinden biri olarak düşünülmektedir (Kurt, 2010).

Takviye elemanının şekline göre kompozitler;

- a. Tekfilament
- b. Uzun ve kısa elyaf (fiber)
- c. Parçacık
- d. Laminant (Katmerli) olarak sınıflandırılırlar.

Kompozit malzemeleri detaylı olarak belirtmek için kullanılan matris ve takviye elemanını (Al matris, Ti matris, SiC fiber, Al_2O_3 parçacıklı veya Al / SiC kompozitler gibi) belirterek ifade edilmesi daha yaygın bir uygulamadır (Çalın, 2006).

Al, Mg, Ti ve bazı süper alaşımlar metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Al ve alaşımları; hafiflikleri, yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özellikleri iyi olduğu için matris metali olarak daha sık kullanılmaktadırlar. Genel

olarak hafif metal alaşımlarının dayanım ve özgül ağırlık oranlarının üstün olması nedeniyle hafif yapı tasarımlarında tercih edilmektedirler. Atmosfere karşı korozyon dirençlerinin de çok iyi olması önemli bir yapısal özelliklerindendir. Bu malzemelerin takviye edilmesinde en çok kullanılanlar ise SiC, Al₂O₃, TiB₂, Si₃N₄, TiC, bor ve grafitir (Kurt, 2010).

MMK elemanlarının imalatında kullanılan matris malzemelerinin seçiminde kesin olarak bir ayırım yapmaya gerek yoktur. Çünkü konvansiyonel olarak kullanım imkanı olan tüm metal ve alaşımlarının MMK malzeme üretiminde matris malzemesi olarak kullanımı uygundur. Takviye elemanının belirlenmesiyle her çeşit metal ve alaşımları matris malzemesi olarak seçilebilir. Matris malzemesi ve takviye elemanı arasındaki fiziksel ve kimyasal bütünlük sağlandığında, kullanılacak yere ve kullanım amacına göre metal matrisli kompozit malzeme üretimi mümkün olabilmektedir. Kompozitlerde en fazla kullanılan matris malzemesi için düşük yoğunluğa sahip, tok ve üstün mekanik özellikleri olan hafif metaller ve alaşımlarının seçilmesi uygun olacaktır (Kurt, 2010).

2.4.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum demirden sonra en fazla kullanılan metal olmasına rağmen tarihçesi çok yenidir. Alüminyum oksijene karşı aşırı ilgisi nedeni ile çelik üretiminde deoksidan element olarak kullanılır (Oğuz, 1990). Alüminyum iyi bir iletken olduğundan elektrik iletkenliği gerektiren yerlerde yaygın olarak kullanılır. Fakat saf alüminyum oldukça yumuşak ve düşük dayanımlıdır. Bu nedenle mühendislik malzemesi olarak alaşım yapılarak kullanılırlar. Alüminyum çok iyi soğuk şekillendirilebilir, bu esnada dayanım değeri başlangıç değerine göre iki kata kadar arttırılabilir.

Alüminyum, yeryüzünde en yaygın olarak bulunan elementlerden biridir ve yerkabuğunun % 8'ini oluşturmaktadır. Alüminyumun keşfi ve üretim teknolojisinin geliştirilmesi, diğer pek çok metale göre oldukça yeni olmasına rağmen günümüzde diğer tüm demir dışı metallerden daha fazla miktarlarda üretilmektedir. Uluslararası Alüminyum Enstitüsü'nün (IAI) rakamlarına göre 2010 yılında alüminyum üretimi tüm dünyada toplam 24.290.000 ton olarak gerçekleşmiştir (Toptan, 2011).

Alüminyum malzemelerin özellikleri alaşımla, ısıl işlemle ve soğuk işleme ile geliştirilebilmektedir. Alaşım elementleri, alüminyumun döküm özelliklerini, işlenebilmesini, sertliğini, dayanımını ve oksitlenme direncini iyileştirmek için, % 1-20 oranında katılmaktadırlar. Bakır, manganez, silisyum, magnezyum ve çinkonun saf alüminyuma etkileri çok önemlidir. Alüminyum alaşımlarında birincil alaşım elementi silisyumdur. Silisyum alüminyumun en başta sertliğini artırmaktadır. Korozyon direncini artırmakta ve akıcılığını yükselterek, döküm malzemesinin kalıbın en ince kanallarına dahi ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca dökme alüminyumdaki katılaşmaya bağlı olarak meydana gelen hacimsel küçülme (çekme) problemlerini de en alt seviyeye indirmekte ve sıcak yırtılma eğilimini azaltmaktadır. İkincil alaşım elementleri ise bakır, magnezyum, demir, nikel ve zirkonyumdur. Bakır, alüminyum malzemenin sertliğini, dayanımını, işlenebilmesini ve oksitlenme direncini iyileştirmek amacıyla katılır. Ancak bakır, kopma uzamasını azaltır ve fiyatını yükseltir. Manganez, oksitlenme direncini ve dayanımını iyileştirmek için kullanılır. Magnezyum makinede işlenmesini iyileştirmek için kullanılır. Ancak çabuk oksitlenme problemine neden olur. Çinko, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında kullanılır ve makinede işleme ve döküm özelliklerini iyileştirir (Yıldırım, 2012; URL-1 ve URL-4, 2014).

Alüminyum alaşımları; düşük yoğunlukları, çökelme sertleşmesi ile dayanımlarını artırabilme kabiliyetleri, tuzlu su da dahil olmak üzere pek çok ortamdaki üstün korozyon dirençleri, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri ve tedarik kolaylıkları sebebiyle, rekabet halinde olduğu malzemelere kıyasla avantaj sağlayarak gelişmiş uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Bu özellikler içinde ilk göze çarpanı düşük yoğunluğudur ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ki bu değer, çelik ($7,83 \text{ g/cm}^3$), bakır ($8,93 \text{ g/cm}^3$) ve pirinç ($8,53 \text{ g/cm}^3$) gibi malzemelerin yaklaşık üçte birine eşittir.

Alüminyum ve alaşımları; dış atmosfere karşı dayanıklı, yüksek korozyon direnci ve ısıl işlemden sonra yüksek çekme mukavemeti, iyi şok direnci, süneklik ve tokluk gibi özellikler gösteren malzemelerdir. Al malzemelerde en önemli alaşım elementleri magnezyum, silisyum, çinko, mangan ve bakırdır. Bunlar tek başına veya birkaçı birlikte alaşımda belirli özelliklere ulaşmak için kullanılır. Mühendislik malzemesi olarak en çok kullanılan alaşım, Al-% 4 Cu alaşımıdır (Kurt, 2010).

Al ve alaşımları yoğunluklarının düşük, elektrik ve ısı iletkenliklerinin yüksek olması nedeniyle üretim ve imalat sektöründe tercih edilen malzemelerdendir. Ancak Al ve

alaşımlarının aşınma dirençlerinin düşük olması, uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Al esaslı metal matrisli kompozitlerin aşınma davranışı incelendiğinde sert tane takviyeli kompozitlerin matris alaşımına göre yüksek aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir (Kurt, 2010).

Alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesi seçiminde kolay tedarik edilebilirlik, matris malzemesi ile uyumluluk, elastiklik modülü, çekme mukavemeti, yoğunluk, ergime derecesi, ısı kararlılık, ısı genleşme katsayısı, boyut ve şekil, kimyasal bileşim ve kristal yapı gibi özellikler göz önünde bulundurulmaktadır. Takviye malzemeleri genellikle rijitlik, mukavemet ve yoğunluk değerleri açısından üstün bir kombinasyon oluşturan seramik malzemelerden seçilmektedir. Bu doğrultuda, partikül, visker veya fiber formunda, SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂, MgO, TiO₂, AlN, BN, Si₃N₄ gibi pek çok oksit, karbür, nitrür ve borür takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Bunların yanında, tungsten ve çelik fiberler gibi metalik malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilir (Toptan, 2011).

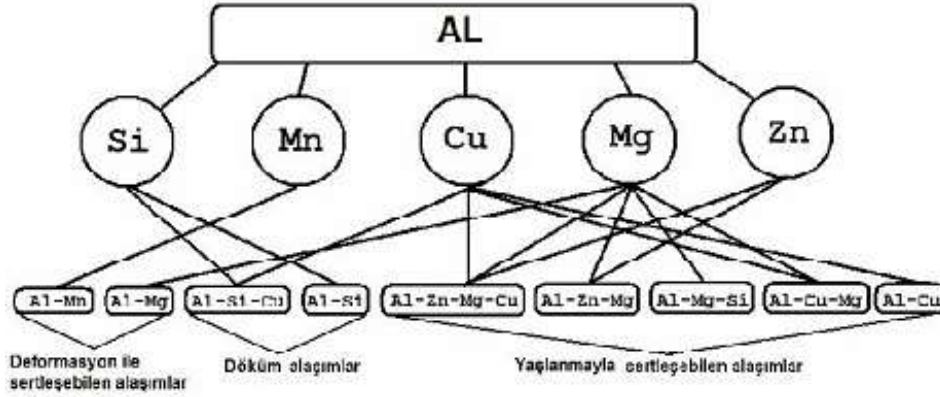
2.4.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Plastik şekil verme ile şekil verilebilen dövme alaşımları ile döküm alaşımları birbirinden farklı mikroyapı ve bileşime sahiptirler (Büyükdoğan, 2011; Güler, 2012; Uludağ, 2011).

Dövme alaşımları dört rakam ile gösterilir. Alüminyuma ilave edilen metale göre; dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma kullanılmaktadır. Örneğin saf alüminyumu ifade eden 1XXX gibi. Bu sınıflandırmada ilk rakam alüminyuma ilave edilen temel alaşım elementini ifade etmektedir. 2XXX serisinden 7XXX ana grubuna kadar her grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılmaktadır. Dövme alaşımlarında, esas üretim yöntemiyle kütük (ingot) olarak dökülen alaşım, plastik şekil verme yöntemleriyle ürün haline getirilir. Döküm alaşımlarında ise, sıvı halde her türlü bileşim ve özellik ayarı yapılmış olan alaşımın, doğrudan ürün kalıbına dökümü yapılır. Alüminyum döküm alaşımları ise dövme alaşımları gibi dört rakamla gösterilir ancak üçüncü rakam ile son rakam arasında nokta konularak

sınıflandırma yapılmaktadır (Büyükdoğan, 2011; Demir, 2008; Güler, 2012; Soy, 2009; Uludağ, 2011).

Dövme ve döküm alaşımları aynı zamanda element bileşimlerine göre de alt sınıflara ayrılabilir (Şekil 2.3) (Öksüz, 1996; Yılmaz, 2002).



Şekil 2.3. Alüminyum alaşımlarında alt sınıflandırma (Öksüz, 1996; Yılmaz, 2002).

2.4.3.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1XXX dizisi saf alüminyum (% 99,00) gösterir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise, özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri (modifikasyon) simgeleri, son iki rakamın özel bir anlamı yoktur. Alaşımı dizideki diğer alaşımlardan ayıran sıra numarası gibi kullanılır (Oğuz, 1990).

Tablo 2.1 'de çeşitli alüminyum serileri, ısıtılma durumları ve oluşturdıkları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması alaşım elementlerinin katatkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıtılma uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır (Uludağ, 2011).

Tablo 2.1. Alüminyum dövme alaşımları (Uludağ, 2011).

Alaşımsız Alüminyum	1XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Bakır Alaşımı	2XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Mangan Alaşımı	3XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Silisyum Alaşımı	4XXX	Yaşlandırılmaz
Alüminyum Magnezyum Alaşımı	5XXX	Yaşlandırılmaz
Alüminyum Silisyum-Magnezyum Alaşımı	6XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Çinko Alaşımı	7XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum ve diğer Elementler (Lityum vb.)	8XXX	Yaşlandırılabilir
Kullanılmayan Seri	9XXX	

2.4.3.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlar; genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri gibi döküm yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Döküm alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıl işlem çok yaygın olarak dövme alüminyum alaşımlarına uygulanmakla birlikte, döküm alaşımların bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanında, mukavemet ve korozyon özellikleri iyidir. Bu nedenle döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövme alaşımlarından oldukça farklı olup silisyum % 5-12 oranı ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik reaksiyon veren bir element olduğundan ilavesiyle alaşımın akıcılığı ve besleme kabiliyeti artarken, aynı zamanda malzeme mukavemeti de artar. Magnezyum elementi % 0,3-1 arasında ısıl işlem uygulanabilir alaşımlara eklenir ve malzeme mukavemetinin artışı sağlanır. Bakır, yüksek sıcaklık direncini arttırmak amacıyla % 1-4 arasında kullanılır. Çinko elementi de aynı şekilde yaşlanma amaçlı olarak malzemeye ilave edilir. Bor (B) ve titanyum (Ti) döküm alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak ilave edilirken, sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri ötektik yapıyı modifiye edici olarak eklenir. Diğer özellikleri de kontrol amacı ile kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler kullanılabilir (Uludağ, 2011; Uludağ vd., 2014).

Bu alaşım grubunun özellikleri her ne kadar hafif bir döküm alaşımı yapısı sergiliyorsa da, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bazı bileşim özellikleri ısıl işlemle veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi vasıtasıyla düzeltilebilir (Uludağ, 2011).

Tablo 2.2 'de döküm alaşımların sınıflandırılmasına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.2. Alüminyum döküm alaşımları (Güler, 2012).

Sınıflandırma	Açıklama
1XX.X	Saf alüminyum
2XX.X	Temel alaşım elementi bakır
3XX.X	Temel alaşım elementi silisyum ve/veya bakır, magnezyum
4XX.X	Temel alaşım elementi silisyum
5XX.X	Temel alaşım elementi magnezyum
6XX.X	Kullanılmıyor
7XX.X	Temel alaşım elementi inko
8XX.X	Temel alaşım elementi kalay
9XX.X	Temel alaşım elementleri diğeri elementler

3. AŞINMA VE AŞINMA TEST MODELLERİ

Aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişmelerin sonucudur (Akkurt, 1992). Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların mevcut olması gerekmektedir.

- 1) Mekanik bir etken olması,
- 2) Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
- 3) Yavaş ve devamlı olması,
- 4) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5) İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

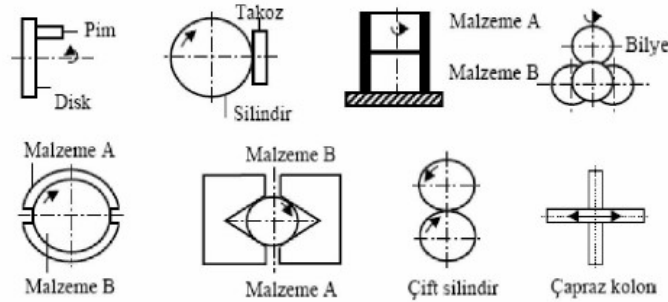
Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenler ile istenilmediği halde kopan malzeme kaybıdır. Bu şekilde, yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez (Akkurt, 1992).

Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide bir çok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanı sıra üçüncü büyük problemdir. Bu nedenden günümüz teknik sistemlerindeki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Sürtünmenin ve aşınmanın azaltılmasıyla malzeme kaybı önlenerek boyut hassasiyeti saklanırken enerji israfı da önlenmiş olur (Büyükdoğan, 2011).

Aşınmanın başlaması ve devam edebilmesi için sürtünme olmalıdır. Sürtünen iki cismin temas alanı, görünen temas alanından küçüktür. En hassas işleme yöntemleriyle bile işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman düz değildir (Cöcen vd., 1997). Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkansızdır. Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itina ile hazırlanırsa hazırlansın, işlem sonucu elde edilen yüzey üzerinde mutlaka belirli büyüklükte pürüzlülük, yani yüzeyde birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler bulunur (Portakal, 1974).

Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki karşılıklı pürüzler etkilenir. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında oluşur. Pürüz tepeleri arasındaki girintiler temas etmezler. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar, yani ezilir ve bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yükleme ile temas etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görülen temas alanına yaklaşır (Odabaş, 1991; Gürleyik, 1986; Cöcen vd., 1997; İpek, 1987). Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır. Temasta olan cisimlere bağlı hareket yaptırabilmek için sisteme bir enerji girer. Bu enerji yük ve hareket şeklindedir. Giriş ile çıkış arasındaki fark, mekanik titreşime, ısı, ses ve sürtünme enerjisine ve aşınmaya dönüşür (Odabaş, 1991).

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, standartlaştırılmış model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribolojik sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması ve sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen en önemli özelliklerdendir. Kayma sürtünmesi ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre Şekil 3.1 'de şematik olarak gösterilmiştir (Yılmaz, 1997).



Şekil 3.1. Aşınma test modellerinin şematik görünümü (Yılmaz, 1997).

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şöyle sıralanabilir:

- Sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak,
- Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek,
- Malzeme kayıplarını araştırmak,
- Yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemleri geliştirmektir.

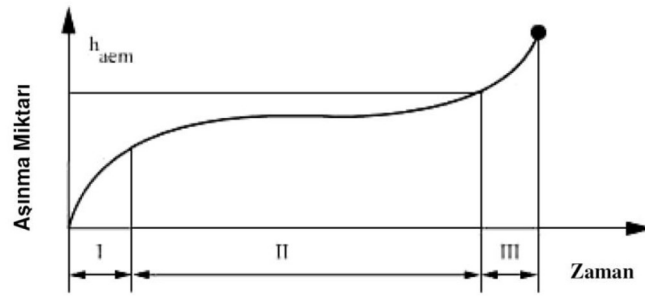
3.1. Aşınma Zaman İlişkisi

Aşınma zaman bağlantısı Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi üç safhadan ibarettir;

I. Safhada makinelerin ilk çalıştırılmaları esnada parçaların birbiri üzerinde hareketiyle şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj adı verilen bu safhada parçalar birbirine alıştırılır. Burada meydana gelen aşınma parçaların sonraki aşınma safhalarını da etkilemesi nedeniyle rodaj işleminin iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleşmesi önemli bir unsurdur.

II. Safhada çalışma devam etmektedir ve temas bölgelerinde aşınma oluşmaktadır. Bu aşınma makine elemanlarının ömürlerinin tespitinde önemli bir etkidir. Rodajdan başlayarak; III. Safhaya kadar aşınma doğal olarak devam eder.

III. Safha ise aşınma hızının oldukça arttığı ve parçaların kullanılmaz hale geldiği safhadır. Bu safhaya şiddetli aşınma bölgesi denilmektedir.



Şekil 3.2. Aşınmanın zamana bağlı değişimi (Ünlü, 2004).

3.2. Aşınma Türleri

Birçok araştırmacı, malzemelerin aşınması üzerine yaptıkları araştırmalar sonucu aşınmayı farklı farklı sınıflandırmışlardır (Odabaş, 1991; İpek, 1992).

En genel olarak bilinenleri;

- 1) Adhesiv aşınma
- 2) Abrasiv aşınma
- 3) Yorulma aşınma

- 4) Korozif aşınma
- 5) Erozyon aşınma
- 6) Tabaka aşınmasıdır.

3.2.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, moleküler kuvvetlerin etkisi altındaki temas yüzeylerinde oluşan bölgesel kaynak bağlarının kırılması suretiyle meydana gelir. Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, yani bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklanmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur (Odabaş, 1991; Gürleyik, 1986; İpek, 1992; Onaran, 1985).

Adhesiv aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, korozif aşınma ile karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkan verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynama). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallerden birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur (Huricks, 1973).

3.2.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasiv aşınmayı kapsar (Karamış, 1986; Habig, 1980). Sürtünen cisimlerin, direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, “İki elemanlı abrasiv aşınma”dır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmaya “Üç elemanlı abrasiv aşınma” denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler (Habig, 1980). Khruschov ve Babichev, aşındırıcı tanelerle temas eden yüzeyde iki prosesin meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Weissbach, 1977).

1) Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucu çiziklerin oluşması (Metal kalkmadan, yüzeyin plastik değişmesi).

2) Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılması (Yüzeyden mikro talaşların ayrılması).

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma, tek veya tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, aşındırıcı sertliğinin aşınana malzeme sertliğinden daha fazla olması gerekir (Weissbach, 1977).

3.2.3. Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Bu olay daima yüzeyden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması dediğimiz pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında içyapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi çözülmeler olur (Gürleyik, 1986).

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir (Karamış, 1986).

3.2.4. Korozi Aşınma

Temas yapısı farklı tabakaların oluşması ve sürtünme hareketi ile bu tabakaların parçalanıp yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanı sıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal veya metalürjik ilişkiden dolayı yüzeylerinde aşınma sonucu meydana gelen hasara korozi aşınma denir. Bu aşınma için gerekli şart, korozyonun ve sürtünme hareketinin olmasıdır. Korozi aşınma, abrasiv ve adhesiv aşınmalar ile birlikte oluşabilir. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa aşınma şiddetlenir (Tekin, 1986).

Korozyonlu aşınmayı önlemek amacıyla;

- a) Malzeme seçimine dikkat etmek,
- b) Yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplama malzemeleriyle yüzeyi kaplamak,
- c) Ortamın hava ile temasını kesmek,
- d) Kromat ve nitratlar gibi önleyici kullanarak, katodik koruma gibi yöntemler uygulanabilir (Koç, 2004).

3.2.5. Erozyon Aşınması

Malzeme yüzeyi ile temas ortamı arasındaki bağıl hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde malzeme yüzeylerinde görülen bozulma şekline erozyon denir. Erozyon, içinde

katı tanecikler ihtiva eden bir sıvının katı cismin yüzeyine çarpması ile meydana gelir. Erozyon, (yıkama veya hidro abrasiv aşınma) akıcı maddelerin oluşturduğu aşınmadır. Sıvılar ve gazlar akış sırasında yüzeyden parçacıklar kopmasına ve girdaplar etkisiyle dalgalı bir yüzeyin meydana gelmesine neden olur. Özellikle doğrusal akımın saptırıldığı ve bozulduğu yerlerde aşınma yüksek olmaktadır. Akışkanın birlikte sürüklediği maddeler, mesela, hava içerisindeki tozlar, su içindeki kumlar ve bunlar içindeki oksitler özellikle aşındırmayı artırıcı yönde etki yaparak malzemenin içyapısını gevşetip, yüzeyden parçacıkların ayrılmasına neden olur (İpek, 1987; İpek, 1992; Lülisdorf, 1978).

3.2.6. Tabaka Aşınması

Temas eden iki cismin izafi hareketi sırasında, hareketin başlatılması ve devamı için gerekli kuvvet farklıdır. Bu iki sürtünme hali arasındaki direnç farkı özellikle küçük kayma hızlarında sürtünme titreşimlerinin doğmasına sebep olur. Bu titreşimler, tribolojik zorlanmaların işaretidir. Tribolojik zorlanmalar sırasında bir takım olaylar meydana gelir. Temas yüzeyleri arasındaki küçük genlikli titreşimlerin sebep olduğu bir oksit filmi oluşur. Bu oluşum sürtünme ile hızlanır. Yüzeyde absorbe edilmiş bazı maddelerin reaksiyonu sonunda meydana gelen oksit tabakası da tribo oksidasyon olarak ifade edilir. Gaz veya sıvı bir atmosferdeki oksijenin kısmi basıncı oksit oluşma hızına, mukavemetine ve oksit şekline etki eder (Tekin, 1986).

Malzeme yüzeyinde mevcut olan ve sürtünme olayı esnasında meydana gelen tabaka, ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli ölçüde değiştirir. Birçok hallerde çok zararlı olabilen adhesiv aşınmaya, reaksiyon tabakası oluşturmak suretiyle engel olma yoluna gidilir. Fakat genel olarak yüzeyde bu şekilde oluşan tribo oksidasyon tabakası, sürtünme ile parçalanarak aşındırıcı etkisi gösterir. Dolayısıyla aşınmayı hızlandırıcı rol oynar. Parçalanarak serbest hale geçen oksit parçacıklarının kalktığı bölgede tekrar oksitleme görülür ve olay süreklilik kazanır (İpek, 1992; Akkurt, 1990).

Malzemenin bölgesel olarak aşırı zorlanan yerlerinde, fiziksel veya kimyasal değişimler sonucunda meydana gelen bir aşınmadır. Genelde uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda ve fren balatalarında görülür (Lülisdorf, 1978; Akkurt, 1990).

3.3. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Yapılan çeşitli çalışmalar ile aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiştir. Ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Aşınmaya etki eden değişkenler ise şunlardır;

A. Esas Sürtünme Elemanına Bağlı Olanlar:

- 1) Malzemenin Cinsi
- 2) Kimyasal Bileşimi
- 3) Mikro Yapısı
- 4) Hacimsel ve Yüzeysel Sertliği
- 5) Elastiklik Modülü
- 6) Akma ve Kırılma Özellikleri
- 7) Yüzeyin Pürüzlülük Durumu
- 8) Şekli ve Boyutları
- 9) Soğuk Şekillendirme Durumu
- 10) Gördüğü Isıl İşlem

B. Karşı Elemana Bağlı Olanlar:

- 1) Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
- 2) Tane Şekli
- 3) Tane Dağılımı

C. Ortama Bağlı Olanlar:

- 1) Nem
- 2) Sıcaklık

Farklı yüksek basınç ve çalışma hızlarında yapılan deneyler neticesinde sürtünen yüzeyin artması ile aşınmanın hızlandığı, aynı yükte çalışma hızının artması ile aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük aşınmanın artmasına neden olmaktadır (Karamış, 1986).

Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana ve kayma yoluna bağlı olarak belirtilir. Aşınma miktarları aşınan parçanın şekil ve ağırlık değişimine ait sayısal bir büyüklük olup aşınma (olay) ve aşınma miktarı (sonuç) olarak birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Buna göre aşınma miktarı parçanın kütle kaybı ve hacimsel aşınma veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı olarak ifade edilir (Gürleyik, 1986; Arıkan, 1988).

3.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Gelişen ve değişen endüstri ve sanayi alanlarında kullanılan alet ve makinelerde istenilen en önemli özellik kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini arttırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tespiti içinde birçok laboratuvar testlerinin yapılıp daha sonra kullanılması gerekmektedir (Aytaç, 2007).

Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir.

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür (Aytaç, 2007).

a) Kuru ve yağlamalı bir ortamda ana ve karşı malzemelerin adhesiv aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler,

b) Katı, sıvı ve gaz haldeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneylerdir.

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1978) tarafından yüz kadar test sistemi belirlenmiştir. Bu aşınma testlerinde, aşınma ölçüm yöntemleri olarak bilinen kütle farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop metotları gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar aşağıda sırayla açıklanmaktadır. Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarlarını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı veya beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu geliştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bir ölçme yönteminde öncelikle yüksek hassasiyet, kolay ve seri uygulama ve son olarak ekonomik olması beklenen özelliklerdir (İzciler ve Öcal, 2001).

3.4.1. Kütle Farkı Yöntemi

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Kütle kaybının ölçülmesi için 10^{-4} veya 10^{-5} hassasiyetindeki teraziler kullanılır. Aşınma kaybı miktarı gram veya miligram olarak bulunur. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması gerekir, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır.

3.4.2. Kalınlık Ölçme Yöntemi

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değerinin karşılaştırılması ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülebilir.

3.4.3. İz Değişiminin İzlenmesi Yöntemi

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür.

Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir.

3.4.4. Radyo İzotoplarla Ölçme Yöntemi

Sürtünmenin yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α - parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Bu yöntemin en büyük avantajı aşınma miktarının yüksek derecede hassasiyetle ölçülmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesidir (Keleştimur, 1989).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler ve Üretimi

Deneysel çalışmalarda kullanmak amacıyla biri referans numunesi olmak üzere toplam yedi çeşit deney malzemesi kum kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir. Çok farklı şekillere uygulanışı ve kalıplama maliyetinin az oluşu kum kalıba döküm yönteminin tercih edilmesine neden olmuştur.

Ergitme işlemi indüksiyon ocağı kullanılarak yapılmıştır. On kg olarak hazırlanan alaşım döküm sıcaklığına (750 °C) kadar ısıtılmış ve içerisinde toz halinde kolemanit bulunan başka bir potaya ergiyik haldeki malzeme dökülerek karıştırma işlemi yapılmıştır. Kolemanit katkılı ergiyik alaşım önceden hazırlanan kum kalıba dökülerek katılaştırılmıştır.

Çalışmada öncelikle referans malzemesi (SR) daha sonra da referans malzemesine değişik oranlarda (0-1-3-5-10-15-20 ppm) kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ilave edilerek yedi çeşit (SR-S1-S2-S3-S4-S5-S6) deney malzemesi aynı yöntemle üretilmiştir. Döküm sonrası deney numunelerinin % bileşimleri spektral analiz yöntemiyle belirlenmiş ve Tablo 4.1 'de belirtilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kolemanit 45 µm tane büyüklüğüne sahiptir ve Eti Maden Bor İşletmelerinden temin edilmiştir. İlgili kurumun yapmış olduğu spektral analiz sonuçları Tablo 4.2 'de verilmiştir (URL-5, 2015). LOI limit oksijen indeksini ifade etmektedir. LOI, bir malzemenin yanması için ortamda bulunması gereken hava karışımındaki oksijen yüzdesi olarak bilinir. Yani oksijen/(azot+oksijen) oranıdır diyebiliriz. Bu değer yükseldikçe malzemenin yanıcılığı da doğal olarak düşmektedir (URL-6, 2015).

Tablo 4.1. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi

	Numune adı							
	SR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
Kimyasal bileşim (% ağırlık)	O	2,55	1,31	3,08	3,18	1,80	1,50	3,92
	Na	-	0,54	0,01	0,07	0,14	0,29	-
	Mg	0,17	0,42	0,07	-	0,47	0,14	0,11
	Si	5,74	5,66	5,97	6,40	7,19	5,70	6,64
	P	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01
	S	-	0,19	0,01	0,22	0,10	-	0,05
	Ca	-	-	0,07	0,01	-	0,13	0,13
	Ti	0,34	-	0,16	0,21	0,11	0,12	-
	Cr	-	-	0,14	0,13	-	0,15	0,01
	Mn	-	0,18	0,26	0,24	0,09	0,07	0,17
	Fe	0,72	0,41	1,02	0,78	0,34	0,38	0,42
	Ni	0,56	0,21	0,03	0,05	0,30	0,24	0,12
	Cu	1,29	2,26	0,64	0,46	0,68	1,17	0,67
	Zn	1,82	1,17	0,86	1,76	1,43	0,81	1,28
	Sr	-	-	0,03	0,34	0,79	-	0,55
	Sn	0,62	0,62	0,23	0,19	0,46	-	0,09
	Sb	-	0,51	0,55	-	0,25	0,52	-
	Pb	-	-	-	0,22	0,32	0,48	0,07
	Al	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.

Tablo 4.2. Kolemanitin kimyasal bileşimi, (% ağırlıkça)

Numune adı	Analiz sonuçları										
	% Ağırlık										ppm
	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO	SO ₄	LOI	As
45 µm öğütülmüş kolemanit	40,23	27,56	0,07	5,28	2,57	0,20	0,04	0,66	0,22	24,24	1

Kolemanit, doğal yataklarında killer içinde ve cevher boşluklarında iri, parlak ve saydam kristal kümeleri halinde bulunmaktadır. Sert ve yoğun yumrular şeklinde cevher oluşturduğunda yumrular, çekirdekten dışa doğru yayılan ışıksal kristallerden oluşabilir veya düzensiz mineral kümeleri şeklinde görülebilir (Bingöl, 2012).

Isıtıldığı zaman su vermekte olan kolemanit, cam üfleme borusu ile ısıtıldığında alevi sarımsı yeşil bir renge boyamakta ve sonrasında parçalanmaktadır. Ayrıca kolemanit odun kömürünün üstünde ısıtıldığında beyazlaşmaktadır (Güç, 2010).

Kimyasal bileşimi $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) olan kolemanit minerali kalsiyum hidrat borat hidroksit olarak adlandırılmaktadır. Monoklinik kristal sistemine sahiptir. Sertliği 4,5 mohs (mohs sertlik skalası bir minarelin sertliğini ifade eder, flüorit ile apatit arasındaki sertlik), özgül ağırlığı $2,42 \text{ gr/cm}^3$ olup camsı parlaklığında, renksiz, beyaz, şeffaf-yarı şeffaf özelliğine sahiptir. Ergime noktası $930 - 986 \text{ }^\circ\text{C}$ civarındadır. Kolemanit radyoaktif değildir. Kristal formu, mükemmel dilinimi (bir mineral ya da kayanın ince yapraklara ayrılması), diğer bor minerallerinden daha sert olması en önemli özelliklerindendir. Suda çok yavaş, fakat sıcak hidroklorik asitte hızla çözünür ve çözelti soğuyunca bor ve borik asit olarak ayrılır. Borik asit dışında geri kalan malzeme kalsit (CaCO_3) olarak kalır. Kolemanit, bor bileşikleri içinde en yaygın olanıdır (Gülgönül, 1990; Uçbeyiay Şahinkaya, 2010; Bingöl, 2012; URL-7, 2015).

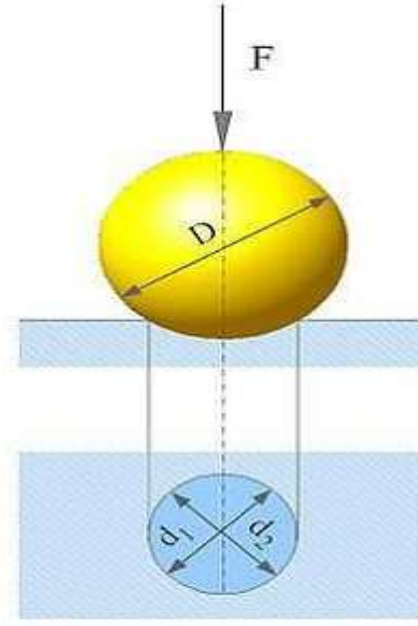
Kolemanit cevheri; kolemanit, kalsit ve kil minerallerinden (İllit) oluşmakta ve ortalama analizleri % 31,67 B_2O_3 , % 30,29 CaO , % 13,37 serbest CaO , % 4,0 SiO_2 , % 1,95 MgO , % 0,13 Na_2O ve % 0,10 FeO içermektedir (Gözkaman, 2008).

4.2. Sertlik Ölçümleri

Deney numunelerinin sertlik ölçümleri makro (Brinell) ve mikro (Vickers) sertlik ölçme yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Brinell (Makro) Sertlik Ölçümü

Brinell sertlik ölçme yönteminde batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik veya tungsten karbürden yapılan bilye kullanılmaktadır. Kullanılacak kürenin çapı numune kalınlığına ve malzemenin şekline göre seçilir. Yükün uygulanma süresi 10-15 saniyedir. Sertliği ölçülecek numune üzerine belirli bir yük veya kuvvet ile bastırılan bilye, hacmi nedeni ile numune üzerine küresel iz bırakır ve malzeme yüzeyinde meydana gelen izin çapı ölçülür. Şekil 4.1 'de Brinell sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir (Jaafar, 2013; Karakoç, 2014).



Şekil 4.1. Brinell sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi (Jaafar, 2013).

Brinell sertlik değeri (BSD), uygulanan kilogram cinsinden yükün (F), yüzeydeki iz yapan mm^2 cinsinden alana (A) bölünmesiyle elde edilir. Bu işlemi kolaylaştırmak için iz çapına karşılık gelen sertlik numarasını gösteren tablolar kullanılabilir. Çelik bilyenin meydana getirdiği iz ne kadar küçükse, Brinell sertlik değeri o kadar büyüktür ve malzeme o kadar serttir (Öztan Peker, 2009)

$$A = \frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$

$$BSD = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Burada, F uygulanan yükü, D bilye çapını (mm), d ise iz çapını (mm) ve d_1 yatay iz çapını ve d_2 dikey iz çapını (90° döndürülerek tespit edilen) göstermektedir (Soy, 2014).

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Standart deney koşullarında 10 mm çapında bilye kullanılmaktadır. Ancak bazı durumlarda çapları 10 mm'den daha küçük (1,25 mm, 2,5 mm ve 5,0 mm) olan bilyeler de kullanılmaktadır. Seçilen bilyeye göre uygulanan yük de değişmektedir (Savaşkan, 2009; Karakoç, 2014; Soy, 2009; Soy, 2014).

Döküm yöntemiyle üretilen deney malzemelerinin makro sertliklerinin belirlenmesi amacıyla 62,5 kg yük ve 2,5 mm çapında sertleştirilmiş bilye ile numunelerin sertliği Brinell cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerlerinin tam olarak belirlenmesi için numunelerin belirli bölgelerinden ölçümler yapılmış ve her bir numuneden toplam 5 adet sertlik değeri alınmıştır. Daha sonra en yüksek ve en küçük sertlik değeri çıkartıldıktan sonra kalan sertliklerin ortalaması alınarak numunelerin ortalama sertlik değerleri bulunmuştur.

4.2.2. Vickers (Mikro) Sertlik Ölçümü

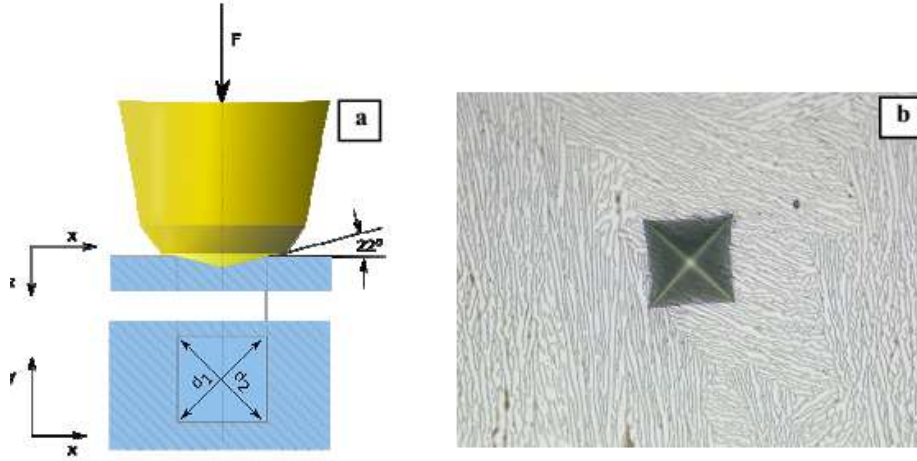
Vickers sertlik deneyi, sertliği ölçülecek materyal yüzeyine, tabanı kare olan piramit biçimindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra oluşan izin köşegenlerinin ölçülmesi prensibine dayanır. Bu yöntem, daha sert materyallerin ölçümünde veya daha hassas ölçümler için kullanılır (MEGEP, 2006; Savaşkan, 2009).

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu sertlik yöntemiyle ölçülebilir. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturur. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir (Jaafar, 2013; Karakoç, 2014; Öztan Peker, 2009; Savaşkan, 2009).

Şekil 4.2 'de Vickers sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin resmi verilmiştir.

Deney malzemelerinin mikroyapılarında özellikle tane içi ve tane sınırı intermetalik bileşiklerin etkisiyle gelişen sertlik değişimlerinin tespiti için Vickers sertlik ölçme yönteminden yararlanılmıştır. 10 g yük ve 10 sn süre ile numunelerin sertliği Vickers cinsinden ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri; Erzurum Teknik Üniversitesi, Mekanik Deney Laboratuvarında bulunan SHIMADZU marka mikro sertlik cihazında (Şekil 4.3) 10

gr yük altında ve 10 sn. süre ile elmas piramit ucun bastırılması ile gerçekleştirilmiştir. Her bir sertlik numunesi üzerinden en az beş ölçüm yapılarak bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Daha sonra bu değerler, bilgisayar ortamına aktarılarak mikro sertlik grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.2. Vickers sertlik ölçme yöntemi, (a) şematik gösterimi, (b) numune yüzeyinde batıcı ucun bıraktığı iz (Jaafar, 2013).

Vicker's sertlik değeri (VSD), uygulanan kuvvetin (F) oluşan izin alanına (A) bölünmesi ile bulunmaktadır (Savaşkan, 2009).

$$A = \frac{l^2}{1,8544}$$

$$VSD = \frac{F}{A} = 1,8544 \frac{F}{l^2}$$

Burada l izin ortalama köşegen uzunluğu olup, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$$



Şekil 4.3. Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihazın resimleri

4.3. Yoğunluk Ölçümleri

Deney malzemelerinin yoğunluğunu belirlemek amacıyla talaşlı işleme hazırlanan numunelerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyetine sahip bir mikrometre ile ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır. Kütle ölçümlerinde ise $\pm 0,1$ mg hassasiyetine sahip bir terazi kullanılmıştır. Ölçülen kütle değerleri hacim değerlerine bölünerek numunelerin yoğunlukları bulunmuştur.

$$d = \frac{m}{v}$$

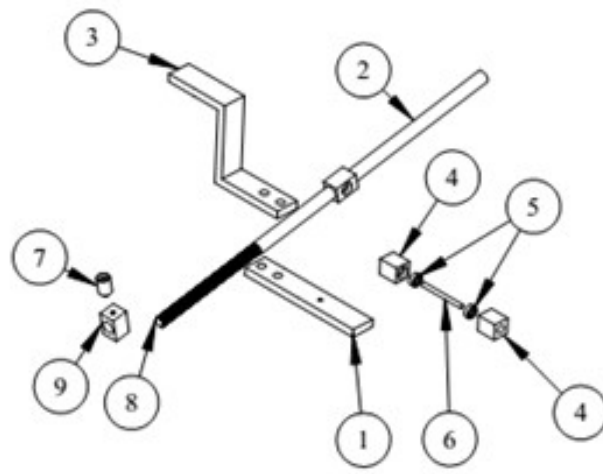
Burada d yoğunluk (gr/cm^3), m kütle (gr) ve v ise hacimdir (cm^3).

4.4. Aşınma Deneyleri

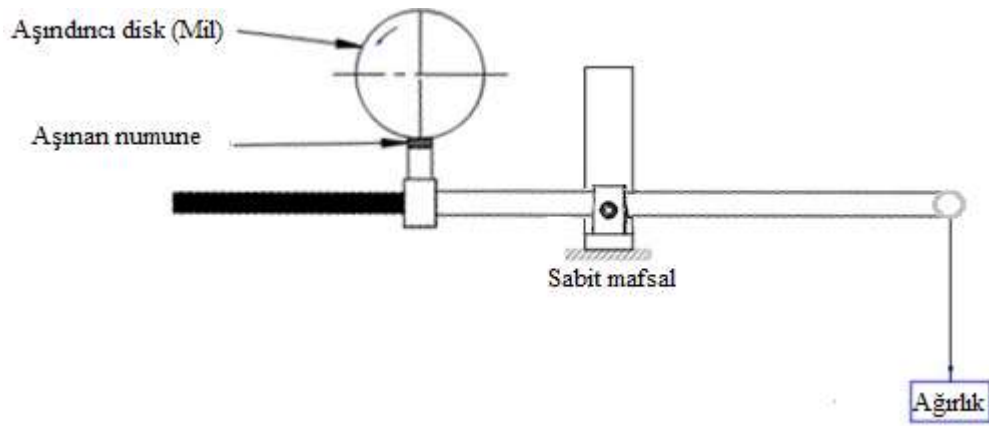
Alüminyum alaşımlarının tribolojik (sürtünme bilimi) özellikleri üzerine yapılan çalışmaların tarihi çok eskilere dayanmakla birlikte, Al MMK malzemelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yaklaşık 30 yıl öncesine dayanmaktadır (Prasad

ve Asthana, 2004; Zhang vd., 1995; Rosenberger vd., 2005). Yapılan çalışmalar daha çok Al MMK malzemelerin aşınma davranışlarını incelemek için yapılmaktadır.

Deneysel çalışmalar için üretilen yatak malzemelerinin aşınma performanslarını belirlemek amacıyla disk(mil)-numune aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneylerinde Şekil 4.4 'de resmi verilen aşındırma aparatı kullanılmıştır. Bu şekilde verilen; 1- Gövde bağlantı sacı, 2- Ana gövde, 3- Gövde bağlantı sacı, 4- Rulman yatağı, 5- Rulman, 6- Rulman yatak mili, 7- Numune tutucu, 8- Sonsuz vida, 9- Numune tutucu yatağıdır.



(a)



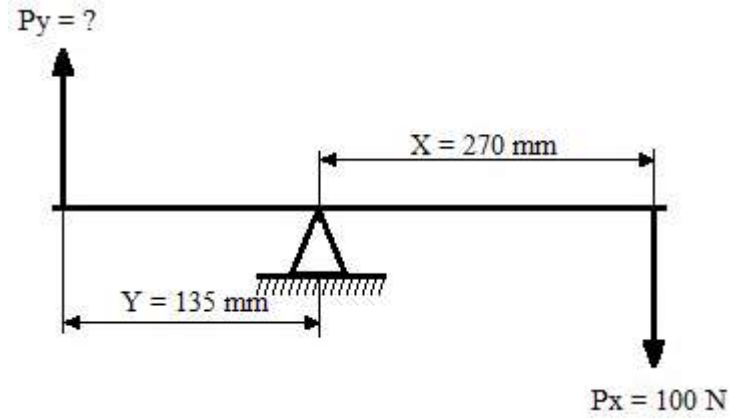
(b)

Şekil 4.4. Aşınma deney düzeneği, (a) şematik görünümü, (b) deney düzeneğine numunenin bağlanma şekli

Aşınma deneyinde kullanılan yük 100 N dur. Ancak numuneye etki eden kuvveti hesaplamak gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 4.5 'de verilen şematik görüntüde ki düzenek esas alınarak numuneye etki eden kuvvet hesaplanmıştır. Burada P_x , aşınma düzeneğinde yük koluna asılı şekilde olan yük miktarıdır ve 100 N dur. X değeri 270 mm olup yük kolunun mafsala olan uzaklığıdır. Y , 135 mm olup numune tutucunun mafsala olan mesafesidir. P_y ise numuneye etki eden kuvvettir. Gerekli hesaplamalar yapıldığında numuneye etki eden kuvvet yaklaşık 200 N olarak bulunmuştur.

$$P_y \cdot Y = P_x \cdot X$$

$$P_y = P_x \cdot \frac{X}{Y}$$



Şekil 4.5. Aşınma deney düzeneğinde şematik kuvvet uygulaması

Aşınma işleminde çapı 110 mm olan disk 42CrMo4 (Fe-% 0,427 C - % 1,072 Cr - 0,6 % Mn - % 0,053 Mo) çeliğinden imal edilmiş olup, ısıtılma işlemle 50 RSD-C değerinde sertleştirilmiştir. Sertleştirme işleminden sonra söz konusu disk $\pm 3 \mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlanarak aşındırıcı disk olarak kullanılmıştır.

Aşınma deneyleri, 120 devir/dakika hız ile dönen aşındırıcı disk üzerine 200 N yükün etki ettirilerek deney numunelerine sırayla uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için kullanılan deney düzeneğinin resimleri Şekil 4.6 'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.6. Aşınma deneyi fotoğrafları, (a) Aşınma deneyi işlemlerinde kullanılan düzeneğin fotoğrafı ve (b) düzeneğin torna tezgahına monte edilmiş şekli

Aşınma deneylerinde aşındırıcı diskin dönmesiyle alınan yollar 500 m artımlı olarak belirlenmiş ve aşınma miktarının alınan yola bağlı olarak değişimi gözlemlenmiştir. Yapılan aşınma deneyleri sırasında yük sabit tutularak 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m ve 2500 m yol koşullarında numunelerin kütle kaybı mg cinsinden tespit edilmiştir. Kütle kaybı hesaplanırken aşınma deneyi uygulanmadan önce numuneler $\pm 0,1$ mg hassasiyetindeki Radwag marka ve AS 220/C/2 model hassas terazide tartılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Hassas terazi

Tartım işleminden sonra numuneler sırasıyla aşınma düzeneğine bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için aşınma deneyi yapıldıktan sonra numuneler tekrar tartılmıştır. Böylece numunelerin aşınma deneyi öncesi ve sonrası kütleleri arasındaki fark numunelerin kütle kayıpları olarak tespit edilmiştir. Ölçülen kütle kayıpları deney malzemelerinin yoğunluklarına bölünerek aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları hesaplanmıştır.

Ayrıca hacim kayıpları kullanılarak özgül aşınma oranı (specific wear rate) sonuçları da hesaplanmıştır. Bunun için aşınma deneyleri sonunda meydana gelen hacim kaybının

normal yük ile toplam sürtünme mesafesinin çarpımına bölünmesiyle (Hacim kaybı / normal yük x toplam sürtünme mesafesi) özgül aşınma oranı hesaplanmıştır (URL-8, 2015).

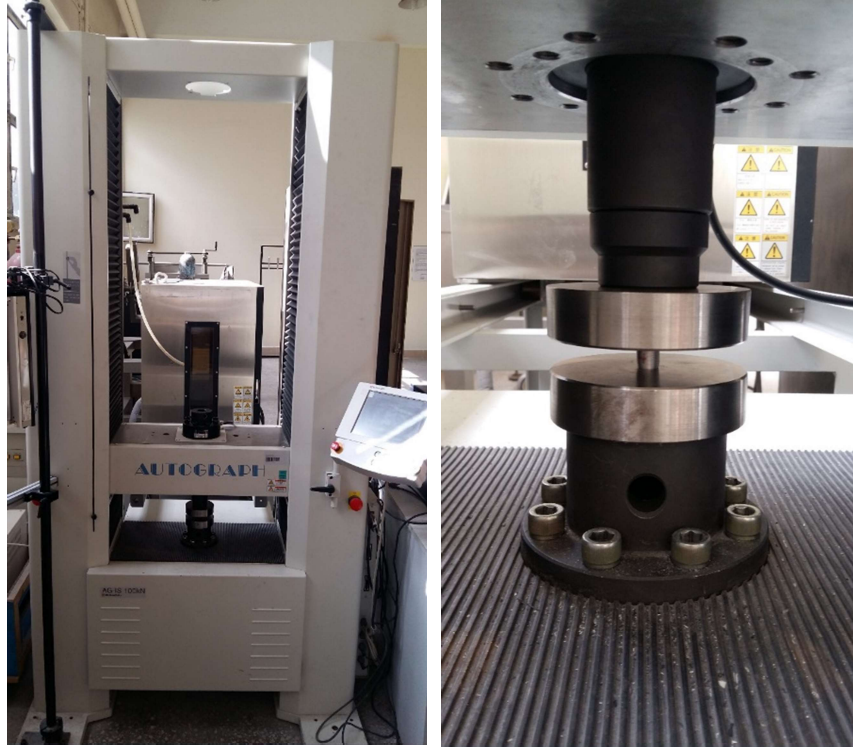
$$\text{özgül aşınma oranı, } \frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}} = \frac{\text{kayıp hacmi (mm}^3\text{)}}{\text{normal yük (N) x toplam sürtünme mesafesi (m)}}$$

Son olarak deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiş ve kolemanit katkı oranı da dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

4.5. Basma Deneyleri

Basma kuvvetlerinin etkin olduğu yerlerde kullanılan malzemeler genellikle gevrek malzemelerdir ve özellikleri basma deneyi ile belirlenir. Gri dökme demir, yatak alaşımları gibi metalik malzemeler ile tuğla, beton gibi metal dışı malzemelerin basma mukavemetleri, çekme mukavemetlerinden çok daha yüksek olduğu için bu gibi malzemeler basma kuvvetlerinin etkin olduğu yerlerde kullanılır ve mekanik özellikleri basma deneyi ile belirlenir. Başka bir ifadeyle kaymalı yatak malzemelerinin gevrek olması ve bu malzemelerin daha çok basma kuvvetinin etkisinde olduklarından dolayı çekme deneyi yerine basma deneyi tercih edilmiştir (Kayalı vd., 1981; Savaşkan, 2009).

Basma deneyi işlemleri Atatürk Üniversitesi Mekanik Deney laboratuvarındaki 100 kN kapasiteli SHIMADZU marka AG-IS model çekme/basma/eğme universal deney cihazında yapılmıştır (Şekil 4.8). Basma deneyi numuneleri 10 mm x 20 mm (çap x boy) boyutlarında üretilmiş ve daha sonra temizlenerek teste hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.8. Basma deneylerinin yapıldığı universal deney cihazı

4.6. Korozyon Deneyleri

Korozyon, metal ve alaşımların kimyasal ya da elektrokimyasal olarak termodinamik bakımdan doğada kararlı olduğu bileşiklerine dönüşme eğilimidir. Başka bir ifade ile metal ve alaşımların çevresiyle etkileşerek fazla enerjisini dışarı vermesi, entropisini küçültmesi ve kararlı bileşiği haline dönüşmesi şeklinde gerçekleşen doğal bir olaydır (Palta, 2009).

Alüminyum, alkali ve toprak alkali metaller haricinde bütün elementlere karşı anodik etki yapması gerekirken, pratikte korozyona dayanıklı bir metaldir. Alüminyumun çözünmesinin pH ile olan asidik veya bazik bağımlılığını veren genel bir bağıntı mevcut değildir. Ortamda bulunan özel iyonlar korozyonu etkilemektedirler. Genel olarak alüminyum alaşımları, kuvvetli HNO_3 (nitrik asit) ve CH_3COOH (asetik asit)'e karşı dayanıklıdır. Fakat sulandırılmış HCl (hidroklorik asit), H_2SO_4 (sülfürik asit) ve seyreltik HNO_3 'de çözünürler (Doğru, 2007).

Deney numunelerinin esas matrisini oluşturan alüminyum, oksijene afinitesi yüksek olan reaktif bir metaldir. Ancak buna rağmen pek çok ortama ve kimyasal ajana karşı direnci yüksektir. Bu özellik, alüminyum yüzeyinde oluşan koruyucu karakterli alüminyum oksit filminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple çoğu ortamda alüminyumun korozyonu zamanla önemli ölçüde azalmaktadır (Shreir, 1994). Ancak, SO₂ içeren endüstriyel ortamlar ya da yüksek oranda klorür içeren deniz ortamı alüminyumun korozyon direncini olumsuz yönde etkilemektedir (Dobrzanski vd., 2005).

Al MMK malzemelerde fiber olarak genelde grafit ya da bor fiberler kullanılırken, takviye olarak ise genelde SiC ya da Al₂O₃ partikülleri kullanılmaktadır. Takviye ilavesi mekanik özellikleri artırabilirken, matris metalinin korozyon özelliklerini olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Grafit ve bor fiberler galvanik korozyona yol açabilirken, SiC ve Al₂O₃ partikülleri yalıtkan olduklarından galvanik korozyona yol açmamaktadırlar (Toptan, 2011).

Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir (Palta, 2009). Tane sınırlarının amorf yapıda olması dolayısıyla tane sınırlarının potansiyel farkı tane içine göre daha büyük olduğundan, daha soy yapıda olan tane içi korunur ve tane sınırı korozyona uğrar. Östenitik paslanmaz çeliklerde görülen krom karbür çökmesi bu korozyon türüne örnek olarak verilebilir (Görener, 2007).

Korozyon deneyi için; numuneler etüvde 115 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle bekletilmiştir. Buradan alınan numuneler vakum desikatöründe soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem, numuneler tartıma gelinceye kadar tekrarlanmış ve numuneler tartıma hazır hale geldikten sonra değerler kaydedilmiştir.

Tartım sonrası numuneler % 96'lık H₂SO₄ (sülfürik asit) korozyon ortamı içerisinde (100 ml) 7 gün süreyle bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler saf su ile temizlenip kurutulmuştur. Numuneler, tekrar etüvde 115 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle bekletildikten sonra vakum desikatöründe soğumaya bırakılmış ve daha sonra tartılarak kütle kayıpları kaydedilmiştir.

Tartımdan sonra numuneler aynı korozyon ortamında ilk deneyde olduğu gibi 7 gün süreyle bekletilerek ikinci ölçümler yapılmıştır. En son olarak 14 gün süreyle tüm numuneler bu işleminden geçirilerek, yaklaşık olarak bir ay gibi bir sürede zamana bağlı olarak asidik ortam korozyon deneyi tamamlanmıştır.

4.7. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri için numuneler zımparalama ve parlatma cihazına uygun ölçülerde hazırlanmış ve bu işlemler Şekil 4.9 'da görülen sulu zımparalama cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri amacıyla numunelerin öncelikle 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik SiC kağıt zımparalarıyla yüzeyleri düzgün hale getirilmiştir.



Şekil 4.9. Zımparalama ve parlatma cihazı

Daha sonra elmas yağlayıcı ve 1 mikronluk elmas pasta kullanılarak numunelerin yüzeyleri çuha ile parlatılmıştır. Parlatma esnasında saf alkol kullanılarak numune yüzeyleri temizlenmiştir. Temizlenen yüzeyler uygun kimyasal maddeler [2,5 ml HNO₃ (nitrik asit) + 1,5 ml HCl + 1 ml HF (hidro florik asit) + 95 ml saf su] ile dağlanarak farklı bölgelerin veya faz yapılarının farklı renk tonlarıyla ortaya çıkması sağlanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler önce Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ait Nikon marka ve MA200 model optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Optik mikroskop cihazı

Optik mikroskopla yapılan incelemelerden sonra numunelerin mikroyapılarını daha detaylı incelemek ve özellikle kolemanit katkılarının mikroyapı özelliklerine etkisini anlayabilmek amacıyla, Fırat Üniversitesi Elektron Mikroskop laboratuvarında bulunan JEOL marka ve JSM 7001F model FE-SEM taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bunlara bağlı elektron enerji dağılım X-ışını (EDX, EDS ya da XEDS) spektrometreleri ile detaylı mikroyapı incelemeleri yapılmıştır (Şekil 4.11). Bu yöntemle mikroyapıda görünen tane sınırı ve tane içi faz ya da bileşiklerle intermetalik bileşiklerin içerikleri (elementler ve yüzde bileşimleri) tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı

4.8. X-Işını Kırınımı (XRD) İncelemeleri

X-ışını 8 Kasım 1895 günü Almanya’da Würzburg Üniversitesi Fizik Profesörü Wilhem Conrad Röntgen tarafından bulunmuştur ve bu keşfiyle Röntgen 1901 yılında Nobel fizik ödülüne layık görülmüştür. Röntgen, X-ışınlarının kristaller içindeki atomlar tarafından yansıtılabilecek dalga boyunda olduğunu düşünmüş ve bu amaçla yapmış olduğu deneylerle kristalografi biliminin ilerlemesinde ilk büyük adımları atmıştır (Güzel, 2006; Demir, 2011).

1912 yılında Max von Laue kristaller tarafından oluşturulan X-Işını kırınımını keşfetmiştir. Aynı yıl Bragg yasası olarak bilinen ve basit bir matematik içeren kırınım şartı İngiliz fizikçiler W.H. Bragg ve oğlu W.L. Bragg tarafından keşfedilmiştir (Demir, 2011). Laue 1914 yılında, Bragg ise 1915 yılında X-Işını kırınımının keşfi ve açıklanması ile ilgili çalışmalarından ötürü Nobel ödülüne layık görülmüşlerdir (Sadık, 2011).

X-Işınları yeter derecede yüksek hızlardaki elektronların bir maddeye çarpmasıyla meydana gelir. Yüksek hızlarda metal hedefe (büyük kinetik enerjiyle) çarpan elektronlar enerjilerinin bir kısmını veya tamamını çarptığı atomda bırakırlar. Düşük enerji düzeyinden kopan elektronlar, hızla üst yörüngedeki elektronlarca tamamlanır. Bu durumda elektronlar yüksek enerji düzeyinden alçak enerji düzeylerine geçerken çok küçük dalga boylu (yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgaların salınmasına neden olurlar. Salınan bu dalgalara X-Işınları denir. X-Işınlarının dalga boyları çok küçük olup yaklaşık $0,1 \text{ \AA} - 100 \text{ \AA}$ arasındadır. Dolayısıyla enerjileri çok büyüktür. Tipik olarak X-Işını kırınımında kullanılan X-Işınlarının dalga boyu $1 \text{ \AA}$ mertebelerindedir ve bu değer kristaldeki atomlar arası mesafeye denk gelmektedir. Bu yüzden kristallerin yapısını araştırmak için sıklıkla X-Işınları kullanılmaktadır (Güzel, 2006; Demir, 2011).

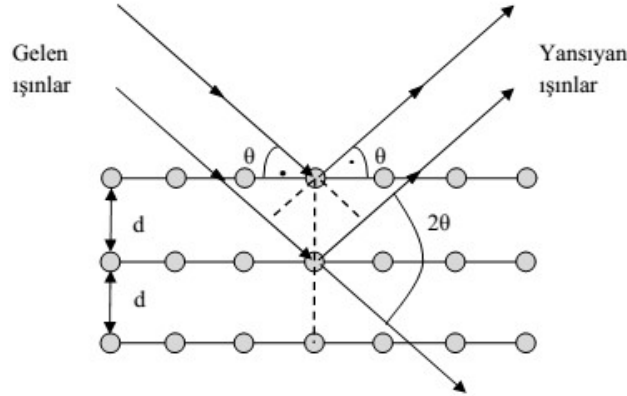
X-ışınları kristal örgüden saçılınca, aşağıdaki koşullara uyan saçılma şiddeti pikleri gözlenir:

1. Geliş açısı = Saçılma açısı
2. Yol boyu farkı, dalga boyunun tam katlarına eşittir.

Bragg yasası, kristal yapısı hakkında veya kristal yapısı biliniyorsa kristalle ilgili X-Işını dalga boyu belirlemeye izin verir (Özgür, 2008). Kristal yapıya sahip bir numune üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın, bu numune ile etkileşip kırınımına uğraması için dalga boyunun atomlar arası uzaklık mertebesinde olması gerekir. Belli bir kristal yapıya sahip olan numunelerde, kırınımına uğrayan dalgalar ancak belli doğrultularda yapıcı girişim yaparlar ve bu doğrultularda maksimumlar gözlenir. Bu doğrultuların dışında kırınımına uğrayan dalgalar birbirleriyle yıkıcı girişim yaparlar ve gözlemlenemezler. Kırınımına uğrayan dalgaların hangi doğrultularda yapıcı girişim yapacakları Bragg Yasası ile belirlenir (Yaşar, 2009).

Kristal yapıyı oluşturan atomlar, gelen X-Işını demetini bütün yönlerde saçar. Bu saçılma sırasında belli yönlerdeki ışınlardan bazıları birbirini yok ederken (yıkıcı girişim) bazı ışınlar birbirini kuvvetlendirerek yapıcı girişim (difraksiyon) oluştururlar (Şekil 4.12). Difraksiyon yalnızca Bragg denklemini sağlayan geliş açılarında meydana gelir (Dönük, 2012):

$$\eta \cdot \lambda = 2 d_{hkl} \cdot \sin \theta$$



Şekil 4.12. Bragg yasasının şematik gösterimi (Demir, 2011).

Burada d_{hkl} düzlemler arası mesafe, $h k l$ tam sayıları Miller indisleri, θ düzleme gelen ve düzlemden yansıyan ışınlarla düzlem arasındaki açı, λ gelen X-Işınının dalga boyu ve η yansıma mertebesidir. $\eta = 0$ değerini alırsa herhangi bir yansıma gözlenmez. η 'nin en küçük değeri 1 olmalıdır (Demir, 2011; Demirezen, 2014).

XRD tekniği alaşımların yapısını ve faz diyagramlarını incelemek için de kullanılır. Birbirini tamamen eritebilen, kristal yapıları aynı olan sistemlerde alaşımdaki bileşenlerin her oranında alaşımların kristal yapısı aynı kaldığından difraksiyon desenlerinin şiddetleri de değişmez. Yalnızca örgü sabitindeki farklılık nedeniyle pik konumları kayabilir. Birbirlerini sınırlı oranda eriten, kristal yapıları farklı olan sistemlerde ise alaşımı oluşturan metallerin belli bileşim değerlerinde toz desenlerine bakılarak yapının hangi bileşimde nasıl bir kristal yapıya ve örgü parametresine sahip olduğu tayin edilebilir (Demirezen, 2014).

Kolemanit katkılarının alaşımların faz ve bileşiklerine etkisini tespit etmek amacıyla Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezine ait Rigaku marka ve Smartlab model ve Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsüne ait Rigaku marka Ultima IV model X-Işını Difraktometre (XRD) cihazı kullanılarak X-Işını

kırınımı analizleri yapılmıştır (Şekil 4.13 – Şekil 4.14). XRD analizleri $\text{CuK}\beta$ kullanılarak 40 kV ve 30 mA deney şartlarında, $3\text{-}90^\circ$ arasındaki 2θ açılarında gerçekleştirilmiştir.

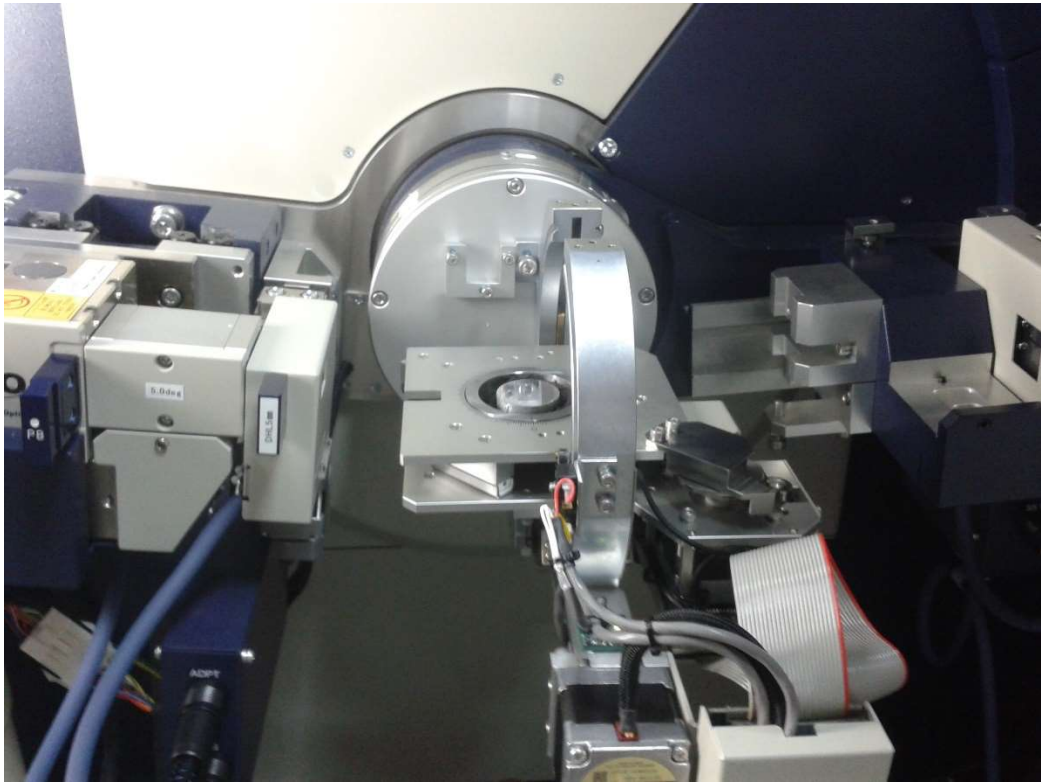


(a)



(b)

Şekil 4.13. X-Işını difraktometre (XRD) cihazları
(a) Rigaku marka Smartlab model
(b) Rigaku marka Ultima IV model



Şekil 4.14. X-Işını difraktometre (XRD) cihazının deneye hazırlanması

4.9. Termal Analiz (TA) İncelemeleri

Bir maddenin veya bu maddenin türevlerinin belli bir sıcaklık programı altında özelliklerinde meydana gelen değişiklerin incelenmesi, tepkimede adsorplanan (endotermik) veya açığa çıkan (ekzotermik) ısıнын ölçülmesi için kullanılan metotların hepsine termal analiz metotları (TA) denir.

Termal analiz metotları polimerlerin, alaşımların, killerin, minerallerin komplekslerinin, tuzların, tuz karışımlarının incelenmesinde ve kalite kontrol amaçlı kullanılır (URL-9, 2015).

Termal analiz testinde bir maddenin sıcaklığın fonksiyonu olarak fiziksel özelliğinin ölçümü yapılır. Fiziksel ölçüm sonuçlarından maddenin yapısında meydana gelen kimyasal değişimler de gözlemlenebilir. Termogravimetrik ölçümler polimerlerde, ilaç üretiminde, killerde, minerallerde, metal ve alaşımlarda kalite kontrol ve araştırma uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gümüş, 2010).

Bu çalışmada termal analiz incelemeleri kolemanit katkılı Al-Si alaşımı deney numunelerinin oksitlenme ve faz dönüşüm sıcaklık değişimlerini tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

4.9.1. Termogravimetrik Analiz (TG/TGA) İncelemeleri

Bu yöntemde programlı olarak arttırılan veya azaltılan sıcaklık sonucunda analiz edilecek maddenin kütlesinde meydana gelecek olan azalmalar (örneğin ayrışmadan ve kurumadan dolayı) veya kütlesinde oluşacak kazanımlar (örneğin oksitlenmeden dolayı), sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak incelenecektir. Sonuçta elde edilen sıcaklık kütle eğrilerine termogram veya termal bozunma eğrileri denilir. Sıcaklık artışı sonucunda meydana gelen kütle kayıpları genel olarak su gibi uçucu bileşiklerin yapıdan ayrılması veya maddenin ayrışmasıdır (URL-9 ve URL-10, 2015).

Termogravimetri cihazı hassas bir terazi, iyi bir fırın, kütle ve sıcaklık değişimini otomatik olarak kaydeden bir sistem, inert gazlı bir temizleyici ve analiz sırasında gaz kesebilen veya değiştirebilen parçalardan oluşmuştur.

Kullanılan numune miktarı 5 mg ile 50 mg arasında değişmektedir. Örneğin koyulduğu özel numune kabı ortamda oluşacak gazları adsorplamamalıdır ve hiç bir şekilde kataliz etkisi taşımamalıdır. Bu numune kabı terazinin içerisine yerleştirilir. Terazinin numune koyulan kısmının dışında kalan diğer bütün kısımları fırından izole edilmiştir. Terazi kolları, elektromıknatısın kolları arasına yerleştirilmiş bir kola sabitlenmiştir. Elektromıknatıstan geçen akım elektrik sinyali olarak kaydedilmektedir (URL-9, 2015).

4.9.2. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) İncelemeleri

Bir malzemenin sıcaklık artışı ile bünyesinde meydana gelen termal ve gravimetrik değişimleri belirlemekte kullanılır. Malzeme bünyesinde meydana gelen ağırlık değişimleri (su kaybı, organik madde uzaklaşması gibi) termogravimetri (TG), ekzotermik ya da endotermik reaksiyonlar sonucu meydana gelen sıcaklık değişimleri de diferansiyel termal analiz (DTA) cihazı ile tespit edilmektedir.

Özellikle seramik hammaddelerinin sıcaklık artışı ile uğradığı ağırlık kayıplarının ve bünyelerinde meydana gelen reaksiyonların hangi sıcaklıklarda meydana geldiği, reaksiyon cinsi ve şiddeti, böylelikle de hammaddelerin termal davranışları belirlenmektedir. DTA tekniği saf silikatlar, killeri, ferritler, seramikler, metaller, katalizörler ve camlar gibi inorganik malzemelerin termal özellikleri ile ilgili ölçümlerinde de kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan, su kaybetme, oksitlenme, indirgenme ve katı- katı, katı-sıvı dönüşümleri gibi olaylar hakkında bilgi elde edilir.

DTA 'daki termogramlarda görülen iki maksimum pikler yani yukarı yönlü pikler, örneğin ısı açığa çıkarttığı ekzotermik değişimi, aşağı yönlüler ısı adsorpladığı anlamındadır. DTA pikleri fiziksel değişimler ve kimyasal reaksiyonlar hakkında önermelerde bulunmayı sağlar. Kimyasal reaksiyonlar endotermik ya da ekzotermik olabilir.

DTA çeşitli değişimlerin meydana geldiği sıcaklıkları ölçebilen kalitatif (nitel) bir teknik olarak bilinmesine rağmen, her bir olaya eşlik eden sıcaklık farkını ölçemez.

Diferansiyel termal analiz polimer karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılır. Seramik ve metal endüstrisinde geniş bir yere sahiptir. Bu gibi malzemelerde bozunma sıcaklığının, faz geçişinin, erime ve kristallenme noktalarının ve termal kararlılığın tespiti için kullanılır (Gümüş, 2010).

Termal analiz incelemeleri (DTG, DTA ve TG/TGA) Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü TGA/DTA laboratuvarında Hitachi marka STA 7300 model Termo-Gravimetrik-Diferansiyel Termal Analizör cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.15).



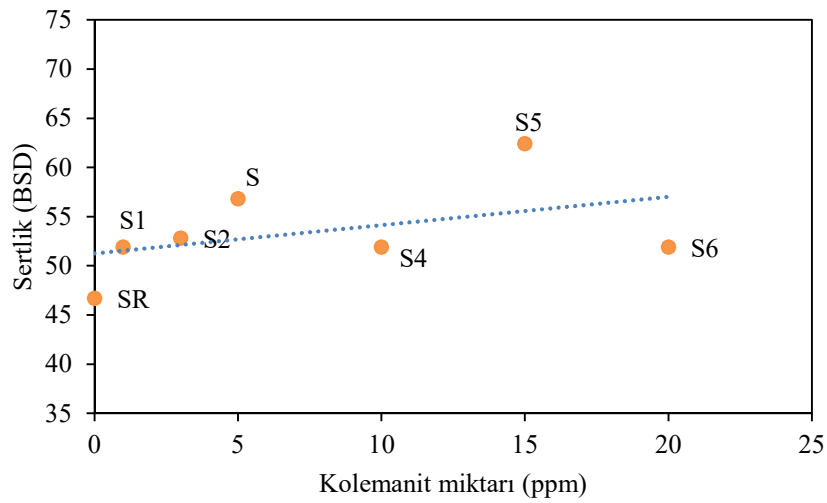
Şekil 4.15. Termal analiz cihazı

5. SONUÇLAR

5.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları

5.1.1. Brinell (Makro) Sertlik Ölçüm Sonuçları

SR, S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 numunelerinin sertliği Brinell (BSD) cinsinden ölçülmüştür. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde her bir numuneden 5 adet sertlik değeri alınmış ve ölçülen sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak numunelerin ortalama sertlik değerleri bulunmuştur. Şekil 5.1 'de deney numunelerine ait kolemanit oranına bağlı sertlik ölçüm sonuçları grafiği görülmektedir.



Şekil 5.1. Kolemanit oranına bağlı makro sertlik ölçüm sonuçları (BSD)

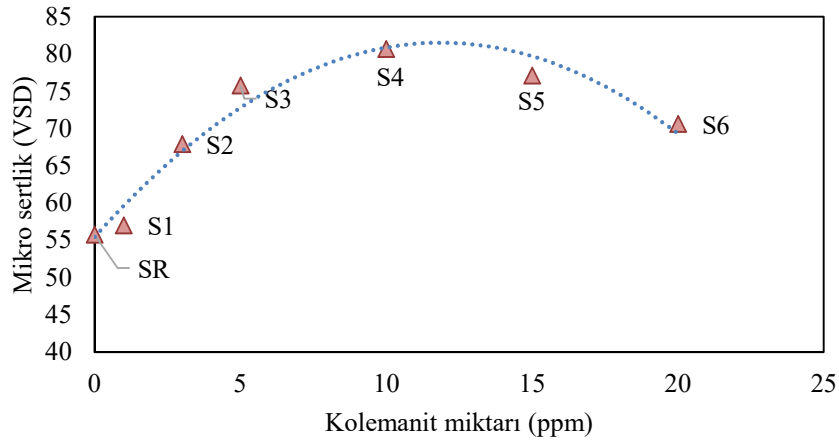
Sertlik ölçümlerinden, referans malzemeye yapılan kolemanit ilavelerine bağlı olarak deney numunelerinin sertliğinde artış meydana geldiği anlaşılmıştır. Örneğin referans numunesinin (SR) sertlik değeri 46,7 BSD iken S5 numunesinin sertlik değeri 62,4 BSD olarak ölçülmüştür. Burada en yüksek sertlik artışının S5 numunesinde olduğu ve referans numuneye göre yaklaşık % 34'lük bir sertlik artışı olduğu görülmüştür. Ayrıca S4 numunesinin sertliğinin aniden düşmesine, yapıyı olumsuz etkileyen demirce zengin

intermetalik bileşiklerin neden olduğu düşünülmektedir (Sreeja Kumari vd., 2007). Şekil 5.1 'de verilen ve kolemanit katkı miktarına bağlı olarak tespit edilen sertlik değişim grafiği dikkate alındığında; ortalama sertlik artış miktarının lineer olduğu kabul edilebilir.

Böylece referans numuneye katılan kolemanit minerali sert olduğu için yatak malzemesinin sertliğini de bir miktar arttırdığı görülmüştür. Konu ile ilgili yapılan diğer çalışmaların sonuçları da bu bulguları desteklemektedir. Örneğin “matrise katılan sert partiküllerin kompozitin sertliğini artırdığı” belirtilmiştir (Uçbeyiay Şahinkaya, 2010; Bican, 2010; Güler, 2012; Buytoz ve Eren, 2007; Gençalp vd., 2011; Sivakumar vd., 2014).

5.1.2. Vickers (Mikro) Sertlik Ölçüm Sonuçları

SR, S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 deney numunelerinin mikro sertliği Vickers (VSD) cinsinden de ölçülmüştür. Mikro sertlik değerlerinin belirlenmesinde her bir numuneden en az beş sertlik değeri alınmış ve bu değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak numunelerin ortalama mikro sertlik değerleri atanmıştır. Şekil 5.2 'de deney numunelerine ait kolemanit oranına bağlı mikro sertlik ölçüm sonuçları grafiği görülmektedir.



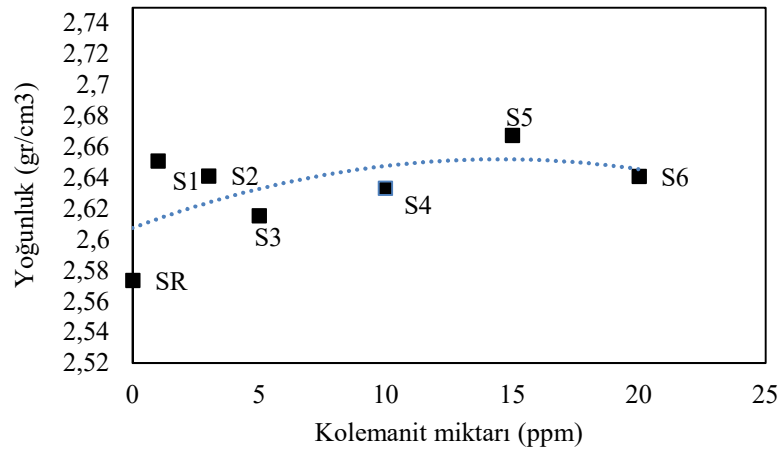
Şekil 5.2. Kolemanit oranına bağlı mikro sertlik ölçüm sonuçları (VSD)

Şekil 5.2 'deki grafik dikkate alındığında, matrise kolemanit ilavesiyle VSD artmakta, ancak S4 numunesinde maksimum değere ulaşmakta ve bu değerden sonra bir miktar azalma eğilimi göstermektedir. Buradan çıkarılacak sonuç bu matris malzemesi için

15 ppm kolemanit ilavesinin optimum değeri olduğudur. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda, sertlik değerleri referans numuneye göre takviye elemanı ilavesi ile artış olduğu yönündedir (Palta, 2009; Uçbeyiay Şahinkaya, 2010; Bican, 2010; Güler, 2012; Buytoz ve Eren, 2007; Gençalp vd., 2011; Sivakumar vd., 2014).

5.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

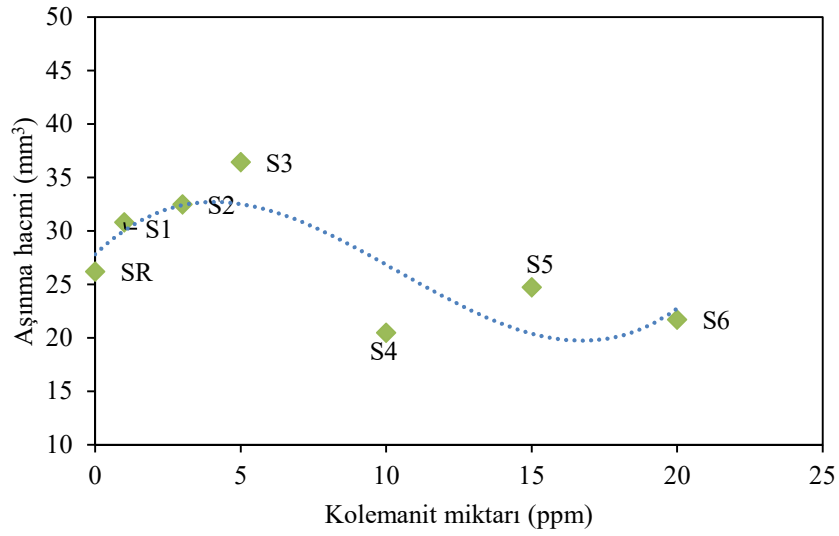
Şekil 5.3 'de deney numunelerinin kolemanit miktarına bağlı yoğunluk değişimi grafiği verilmiştir. Burada artan kolemanit ilavesiyle numunelerin yoğunluklarının grafikte görüldüğü gibi bir miktar arttığı anlaşılmaktadır. Referans numuneye göre yoğunluk artış miktarı yaklaşık 0,1 olup, deney numunelerinin yoğunluk açısından birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Kolemanit oranına bağlı yoğunluk ölçüm sonuçları

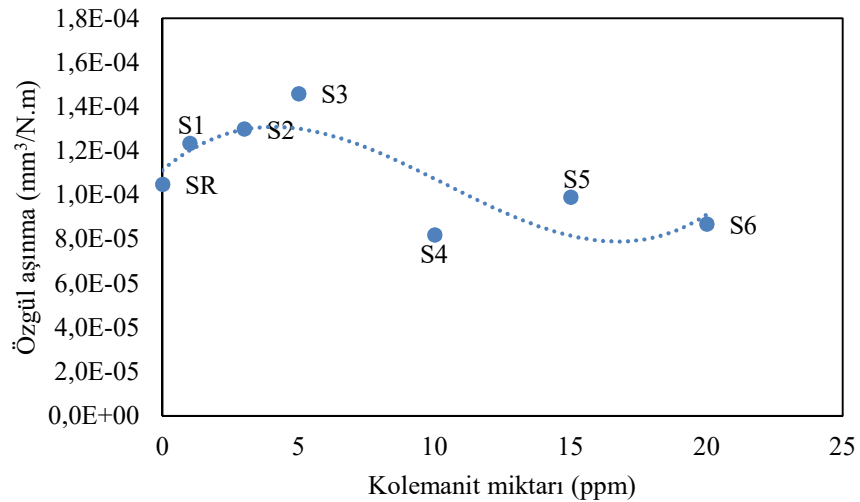
5.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

Şekil 5.4 'de tüm numunelerin toplam 2500 m'lik alınan yol ve 100 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonuçları verilmiştir. Aşınma deneyleri sonunda meydana gelen hacim kaybının, normal yük ile toplam sürtünme mesafesinin çarpımına bölünmesiyle elde edilen kolemanit miktarına bağlı özgül aşınma değişimi grafiği Şekil 5.5 'de verilmiştir. Burada yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının tespiti ile ilgili çalışma yapılamadığını belirtmek gerekir.



Şekil 5.4. Deney numunelerinin kolemanit miktarına bağlı aşınma deneyi sonuçları

Şekil 5.4 'deki grafik incelendiğinde, aşınma dayanımı en az olan numune 5 ppm katkılı S3 numunesidir. Referans numuneyle kıyaslayacak olursak S1, S2 ve S3 numunelerinin daha düşük aşınma dayanımına, S4, S5 ve S6 numunelerinin ise daha yüksek aşınma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, 10 ppm ve daha fazla kolemanit ilavesinin numunelerin aşınma dayanımını yaklaşık % 45 – 50 arası arttırdığı tespit edilmiştir.

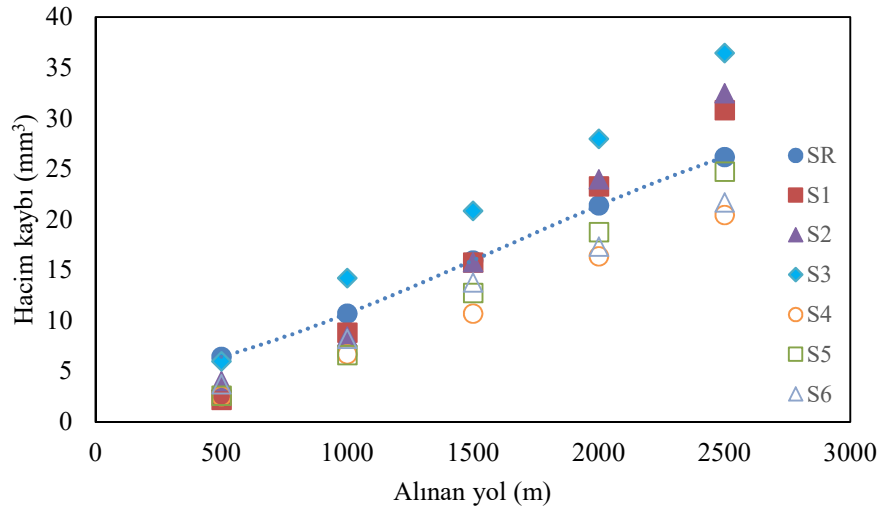


Şekil 5.5. Deney numunelerinin kolemanit miktarına bağlı özgül aşınma oranları

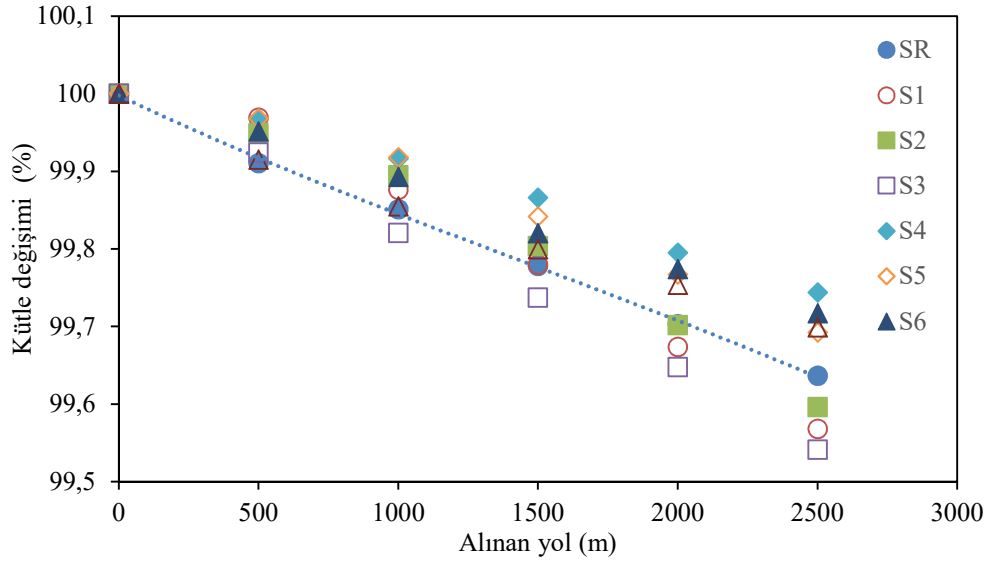
Şekil 5.5 'deki kolemanit miktarına bağlı özgül aşınma oranı grafiği incelendiğinde de aynı şekilde kolemanit miktarının 5 ppm olduğu S3 numunesine kadar bu oranın arttığı ancak bu noktadan sonra kolemanit miktarının artmasıyla özgül aşınma oranı da azalma eğilimine girmiştir. S4, S5 ve S6 numuneleri referans numuneye göre daha düşük özgül aşınma oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.6 'da tüm numunelerin alınan yola bağlı aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Ayrıca çalışmada aşınma deneyleri sonuçlarına ait grafiklerin daha iyi anlaşılması ve hazırlanan numunelerin her birinin boyutları birbirine yakın olmakla birlikte, tamamı aynı ağırlıkta olmadığından grafik değerleri, yüzde (%) olarak da verilmiştir (Şekil 5.7).

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 incelendiğinde, 2500 m'lik alınan yol sonunda en az aşınma kaybı S4, S5 ve S6 numunelerinde görülmektedir. Burada en düşük aşınma kaybının yaklaşık 20 mm³ ile S4 numunesinde olduğu ve aynı sonuç Şekil 5.5 'deki grafik ile de desteklenmekte ve en az kütle değişiminin 10-15-20 ppm kolemanit katkılı S4, S5 ve S6 numunelerinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.6. Numunelerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yola göre değişimi



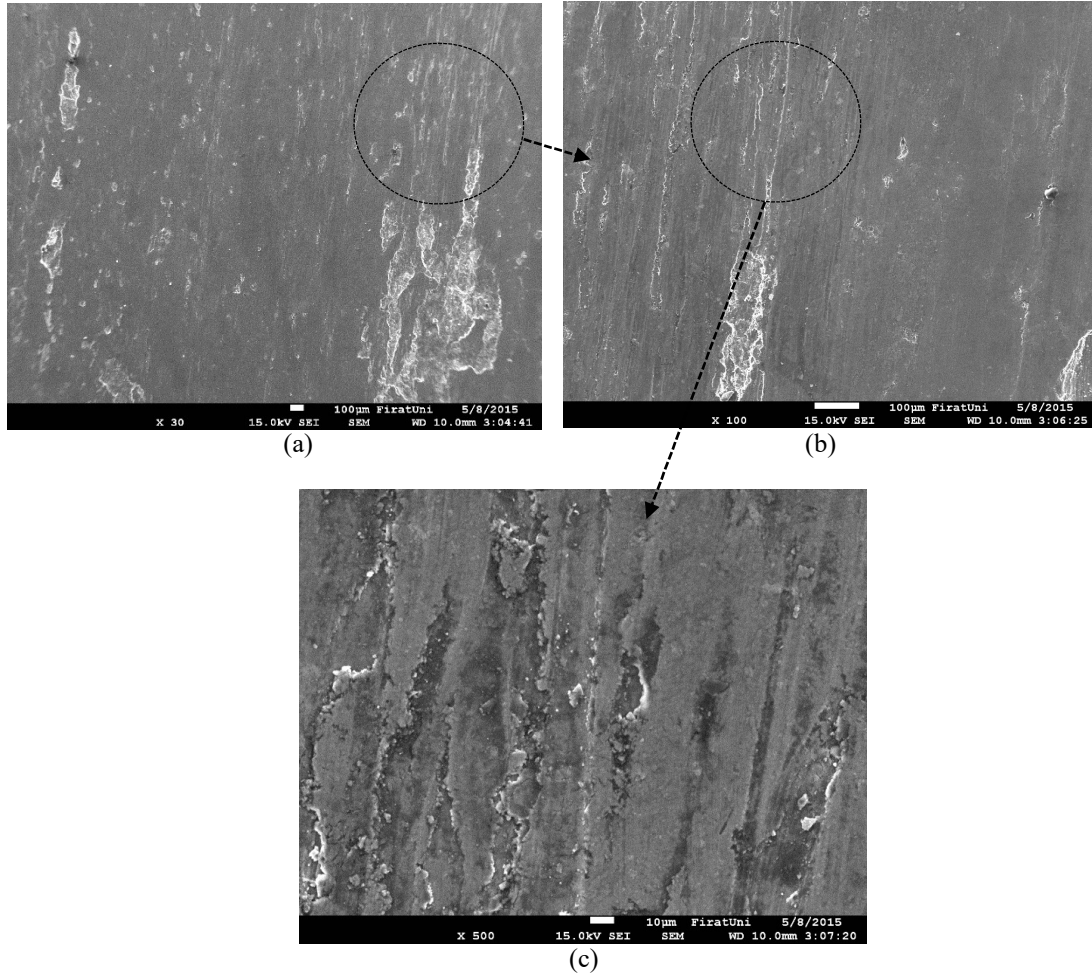
Şekil 5.7. Numunelerde aşınma ile meydana gelen % kütle değişimi

Al-Si esaslı yatak malzemelerinin aşınması ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalarda da bu sonuçlara benzer bulgulara ulaşıldığı yapılan literatür araştırmalarından tespit edilmiştir (Ranganath vd., 2001; Zhu vd., 2002; Lasa ve Rodriguez-Ibabe, 2002; Kori ve Chandrashekharaiyah, 2007; Kori ve Prabhudev, 2011; Feyzullahoğlu ve Sakiroğlu, 2011; Rana vd., 2012; Feyzullahoğlu vd., 2013; Bican, 2014; Baradeswaran ve Perumal, 2014; Sivakumar vd., 2014) İlgili literatür çalışmalarında, matrise sert partikül ilavesiyle elde edilen malzemenin aşınma özelliklerinin geliştirildiği öne sürülmüştür. Çalışmamızda da kolemanit ilavesiyle elde edilen kompozit malzemenin aşınma direncinin referans numuneye göre arttığı görülmüştür.

Deney numunelerinin aşınma deneyleri sonucunda oluşan aşınmış yüzeylerin mikroyapıları incelendiğinde; aşınma izlerinin karakteristik yapıları Şekil 5.8 – Şekil 5.21 'de verilmiştir. Bu mikrograflar numune yüzeylerinde aşınma sırasında oluşan, sıvanma belirtilerini ve aşınma izlerini belirgin bir şekilde göstermektedir.

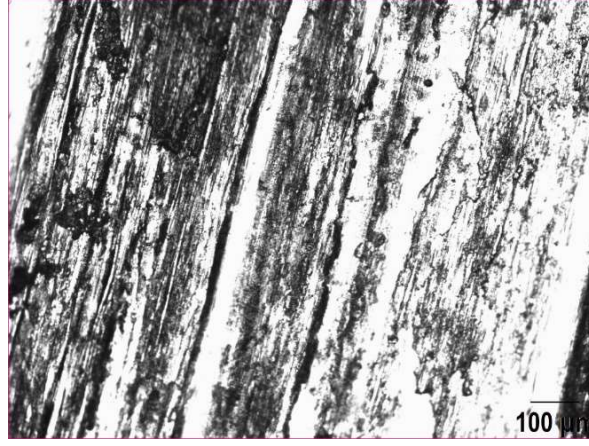


Şekil 5.8. SR numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X 100.

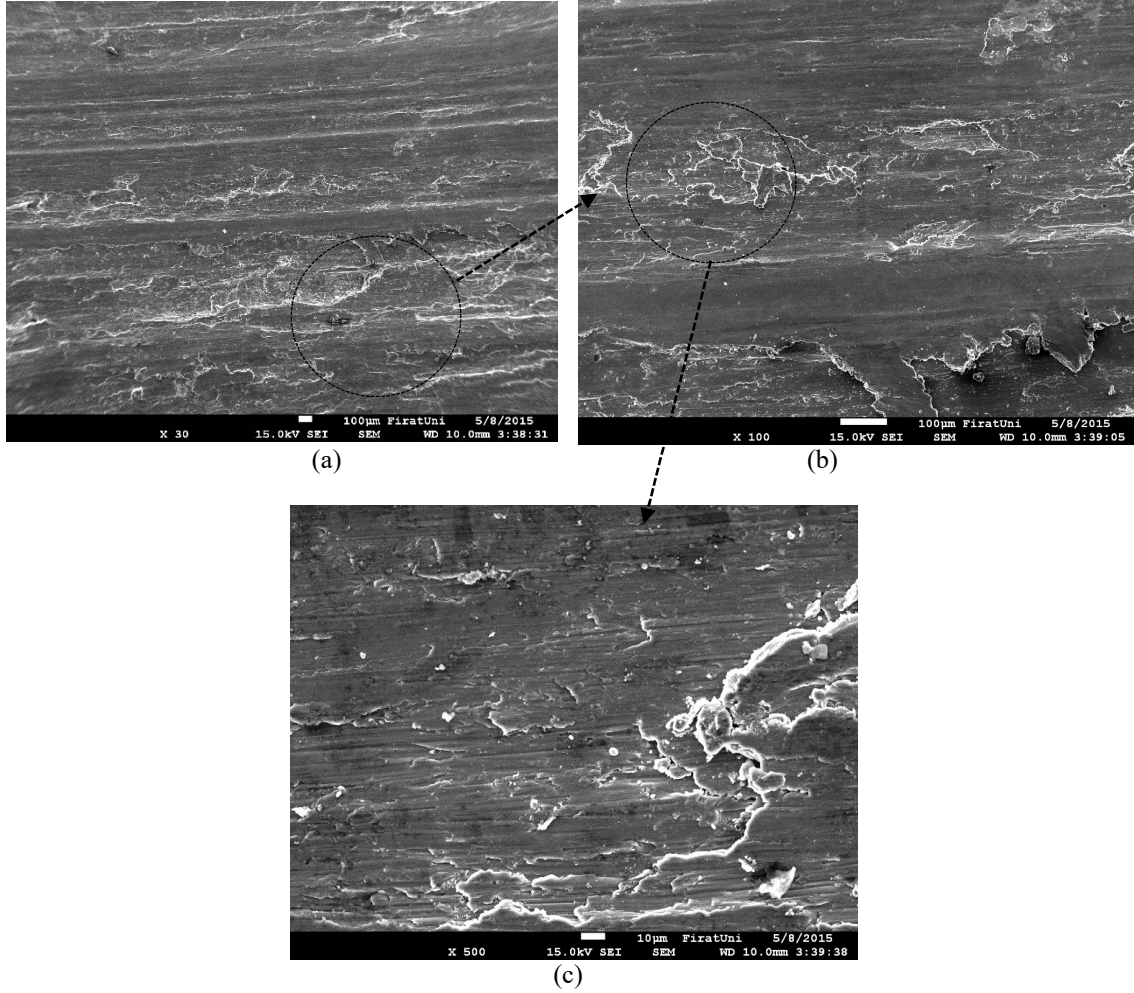


Şekil 5.9. SR numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ’da verilen SR numunesinin aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oluklar ve kraterler görülmektedir.



Şekil 5.10. S1 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m'lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X 100

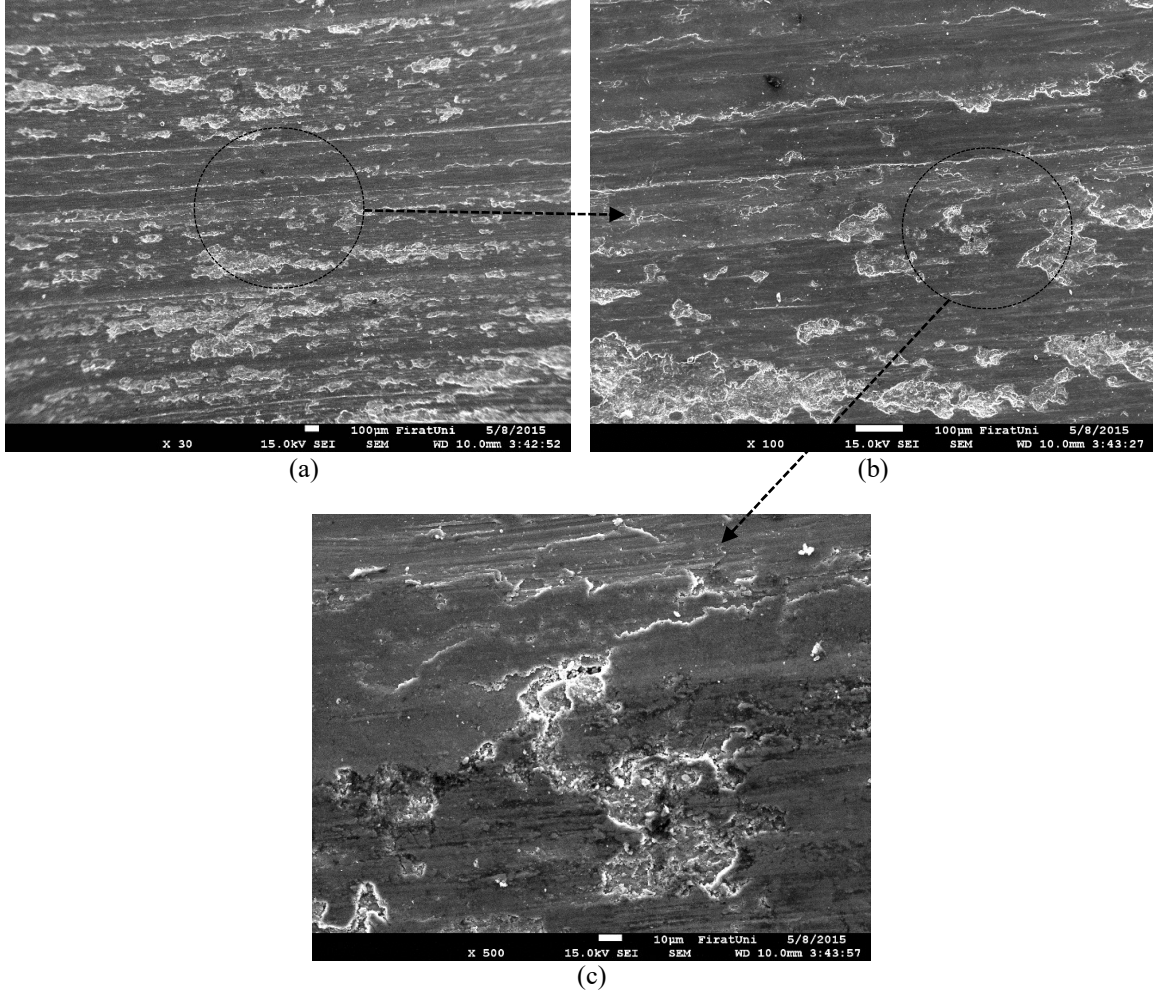


Şekil 5.11. S1 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m'lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

S1 numunesinin Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 'deki aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oluklar ve yüzeye yapışmış parçacıklar görülmektedir.

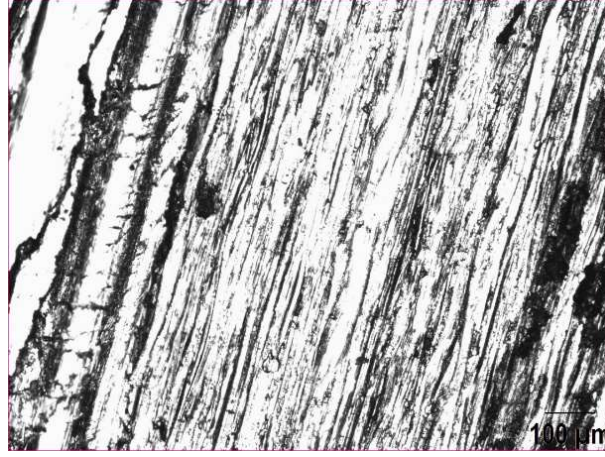


Şekil 5.12. S2 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m'lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X 100

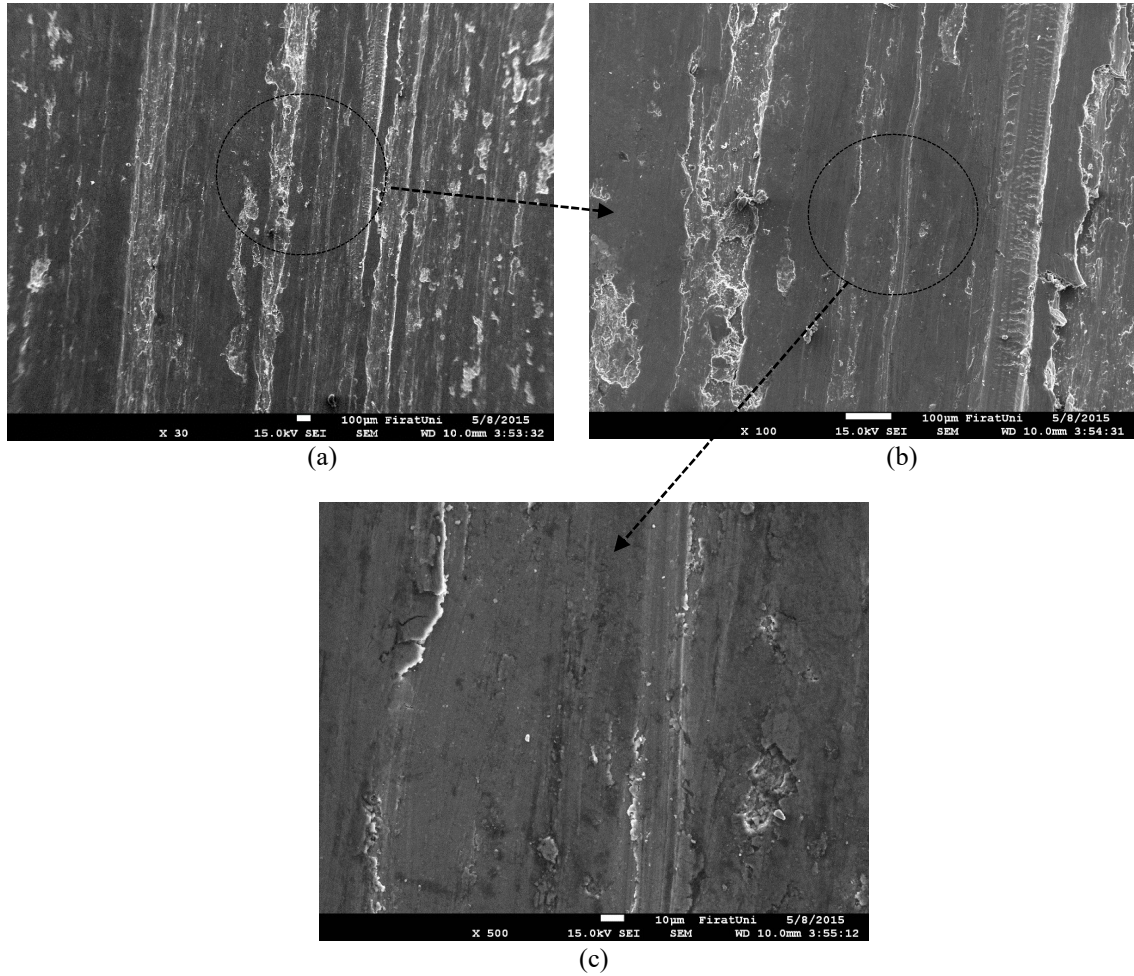


Şekil 5.13. S2 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m'lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 'de verilen S2 numunesinin aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel dar aşınma izleri, oluklar, oksitler ve kraterler görülmektedir.



Şekil 5.14. S3 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X100

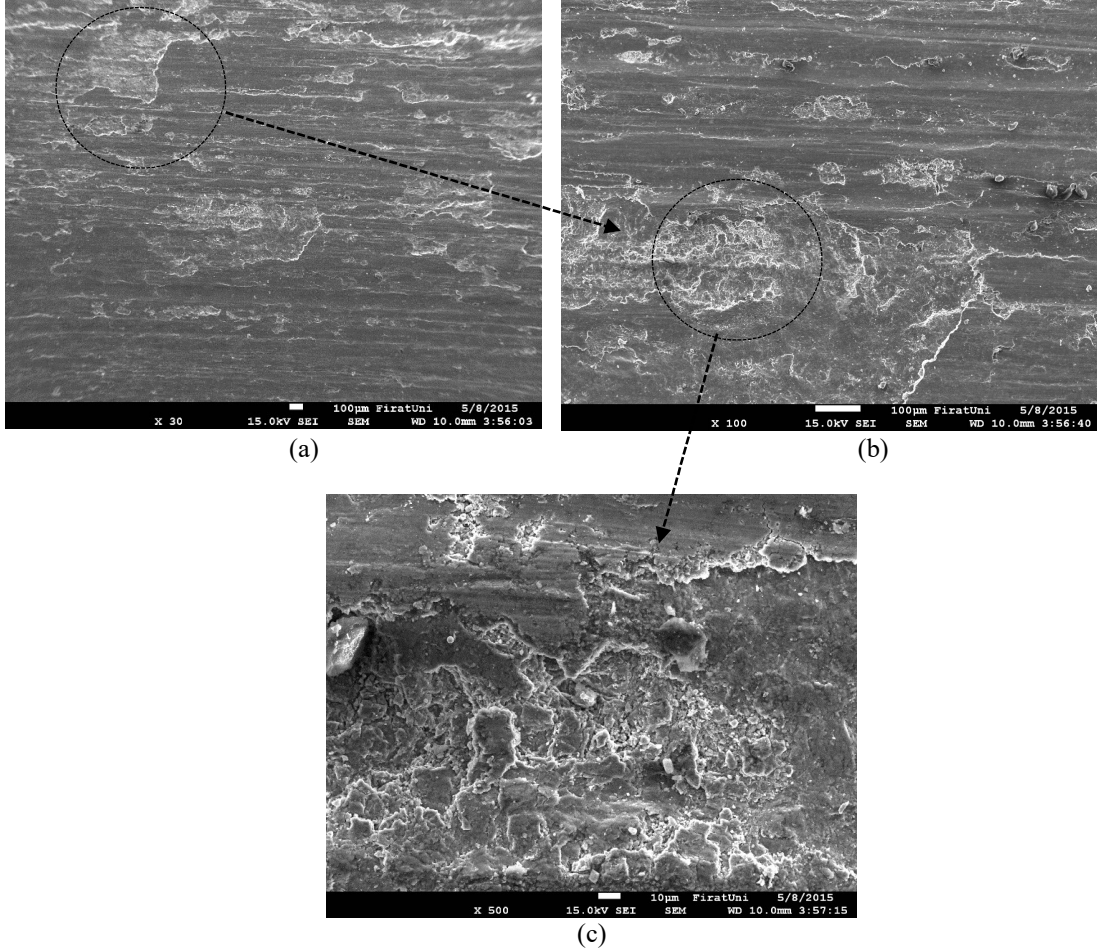


Şekil 5.15. S3 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

S3 numunesinin Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 ’deki aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oluklar ve yüzeye yapışmış parçacıklar görülmektedir.



Şekil 5.16. S4 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X100

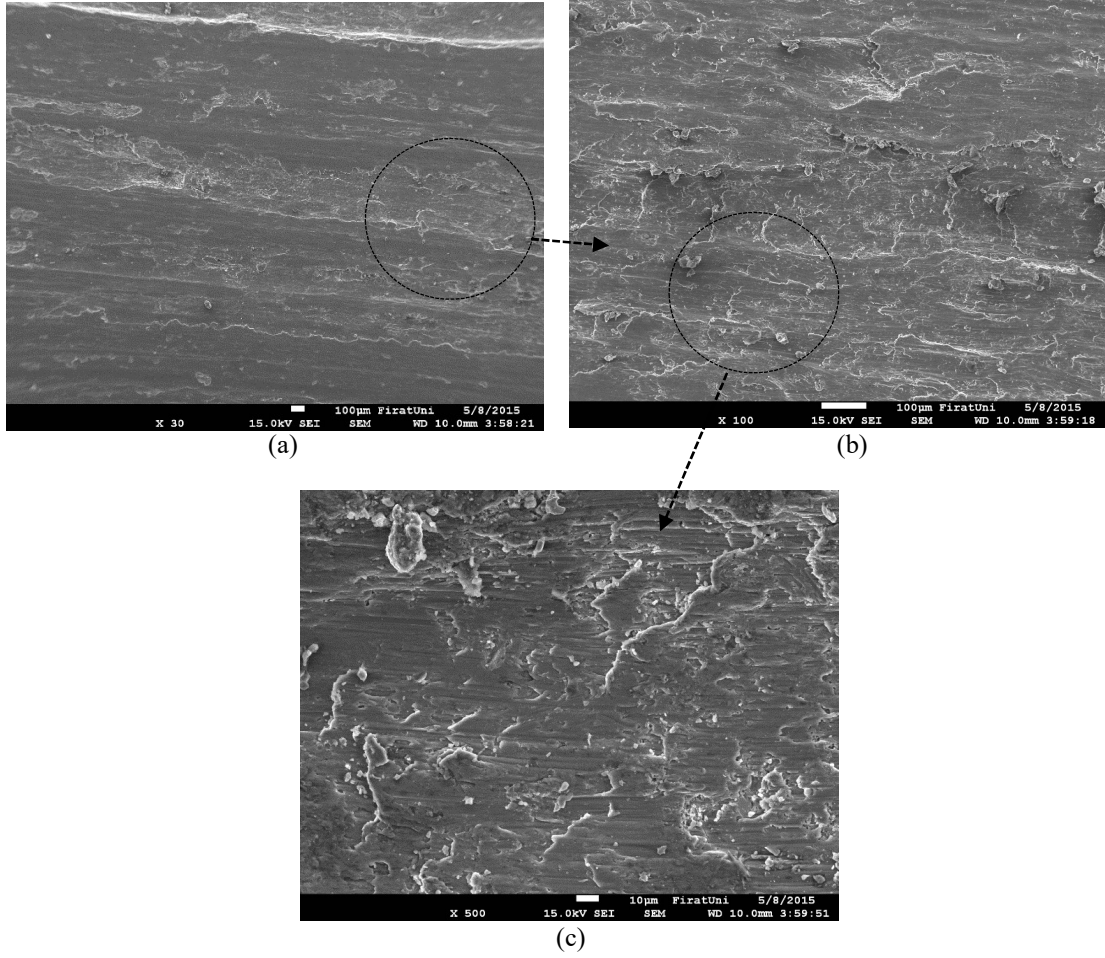


Şekil 5.17. S4 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 ’de verilen S4 numunesinin aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oluklar, oksitler, kraterler ve sıvanmış kısımlar görülmektedir.



Şekil 5.18. S5 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X 100

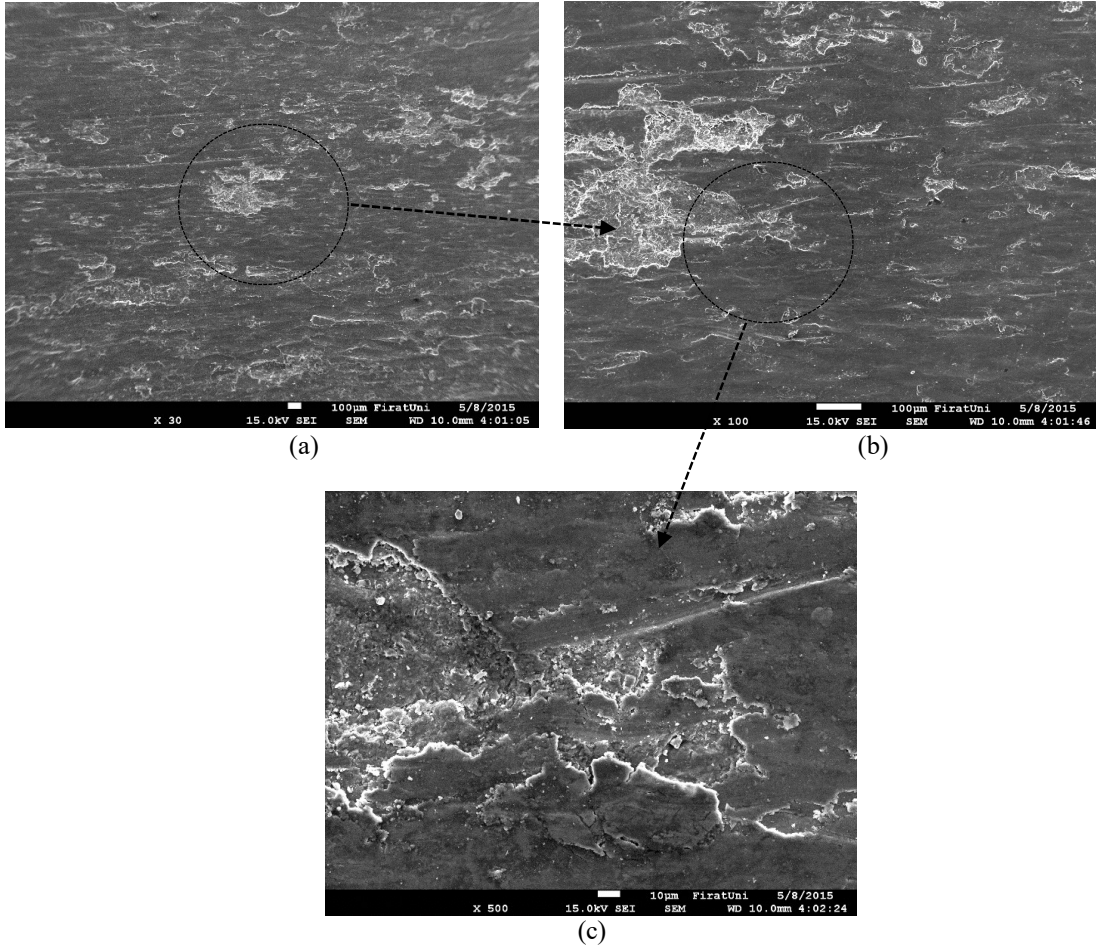


Şekil 5.19. S5 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

S5 numunesinin Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 ’daki aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oluklar ve yüzeye yapışmış parçacıklar görülmektedir.



Şekil 5.20. S6 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki optik mikroskop resmi, X 100



Şekil 5.21. S6 numunesinin aşınmış yüzeyinin 2500 m’lik alınan yol sonundaki SEM görüntüleri, (a) X 30, (b) X 100, (c) X 500

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 ’de verilen S6 numunesinin aşınma resimleri incelendiğinde, aşınma yönüne paralel aşınma izleri, oksitler, kraterler, pullar ve sıvanmış kısımlar görülmektedir.

Şekil 5.8 ile Şekil 5.21 arasındaki tüm numunelerin aşınmış yüzey resimlerinde görüldüğü gibi referans malzeme ve kolemanit ilaveli numuneler birbirine yakın yüzey morfolojisi sergilemişlerdir (Kori ve Prabhudev, 2011; Bican, 2010; Toptan, 2011; Büyükdoğan, 2011). Tüm yüzeylerde aşınma yönüne paralel dar ve geniş aşınma izleri; oluklar (grooves), yüzeyde çıkıntı halindeki partiküller, kraterler, pullar, aşınma yüzeyinde oksitler, plastik deformasyon, çatlaklar şeklinde görülmektedir (Kumar vd., 2008; Toptan, 2011; Iwai vd., 2000; Chunfu vd., 2007; Özsarac vd., 2007; Dhiman vd., 2014; Kaplan vd., 2008; Grün, 2009; Prakash vd., 2010; Raju vd., 2011).

Bir önceki bölümlerde verilen numunelerin aşınmış yüzey resimleri birbirleriyle karşılaştırılırsa aşınma deneyi grafikleri ile orantılı olarak artan ve kolemanit miktarına da bağlı olarak aşınmış yüzey izlerinde önemli değişimler görülmektedir. Bu OM ve SEM fotoğraflarında, kolemanit miktarına bağlı olarak aşınma etkisi ile oluşan aşınma izleri (oluklar) azalmakta, ancak sıvanma miktarı artmaktadır. Başka bir ifadeyle aşınma grafikleri ve aşınmış yüzey resimleri birbirlerini destekler mahiyette olup, artan kolemanit miktarına bağlı olarak aşınmanın azaldığı ve sıvanmanın arttığı dikkati çekmektedir (Bican, 2010; Toptan, 2011; Buytoz ve Eren, 2007).

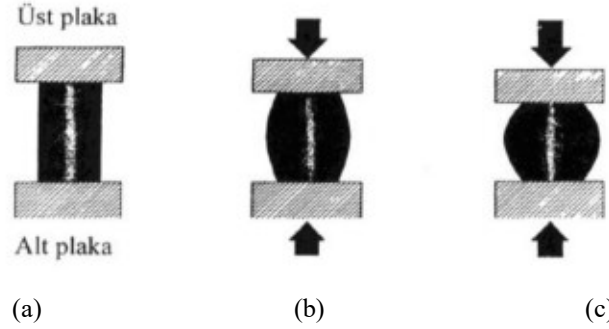
5.4. Basma Deneyi Sonuçları

Araştırmamıza konu olan yatak malzemesi gibi kopma uzaması ve kopma büzülmesi değerleri sıfıra çok yakın olan gevrek malzemelerin sünekliği çekme deneyi ile ölçülemez. Bu tür gevrek malzemelerin sünekliği basma deneyi ile tespit edilmektedir (Savaşkan, 2009). Bu nedenle deney numunelerinin mukavemet değerlerinin tespitinde basma deneyi tercih edilmiştir.

Yapılan basma deneyleri 100 kN kapasiteli ve bilgisayar kontrollü SHIMADZU marka ve AG-IS model universal deney makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuç grafikleri deney cihazından alınan orijinal datalar ile elde edilen grafiklerdir.

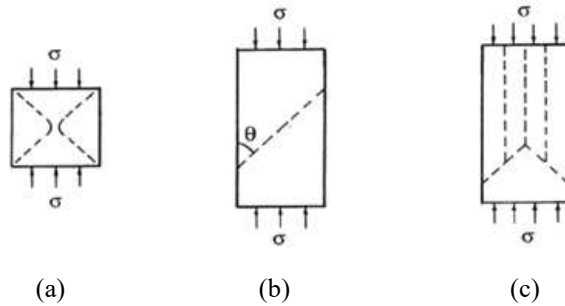
Yapılan tüm basma deneylerinde numuneler teorik olarak kopma göstermiş ancak gözle görülür bir ayrılma kopması ve/veya parçalanma meydana gelmemiştir. Numunelerde böyle bir durum meydana gelmesinde özellikle yapının homojen olmasının en büyük

etken olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte basma numuneleri üzerinde çatlak oluşumu çıplak gözle görülür durumdadır. Bu çatlakların oluşması, basma deneyi sırasında uygulanan gerilimin etkisiyle malzemenin şişmesi/fıçılaşması ve neticesinde gevrek malzemelerde meydana gelen bir kırılma şeklidir (Şekil 5.22 - Şekil 5.23).



Şekil 5.22. Basma kuvveti uygulanan sünek malzemelerdeki fıçılma oluşumu;

- a) Basma kuvveti yok,
- b) Basma kuvveti etkisiyle fıçılma oluşumunun ilk aşaması,
- c) Fıçılma oluşumunun tamamlanması (Savaşkan, 2009).



Şekil 5.23. Gevrek malzemelerde basma kuvveti sonucunda meydana gelen kırılma şekilleri (Savaşkan, 2009).

- (a) Kayma konisi veya saat camı oluşumu
- (b) Kayma düzlemi boyunca kırılma (dökme demir ve betonda görülür)
- (c) Kayma konisi oluşumu (betonda meydana gelir).

Şekil 5.24 'de basma deneyi sonrasında numunelerin plastik şekil değişimine uğramış şekillerini gösteren resimler incelendiğinde, deney numunelerine kuvvet uygulandığında malzemelerde fıçılama olarak adlandırılan şekil değişimleri meydana gelmektedir. Uygulanan kuvvetin artmasıyla numunelerde kayma düzlemi boyunca oluşan kırılmalar görülmektedir. Daha sert olan numunelerde fıçılama olayı daha az olmakla birlikte basma mukavemetinin artmasına neden olmaktadır (Sreeja Kumari vd., 2007; Savaşkan, 2009; Soy, 2014).

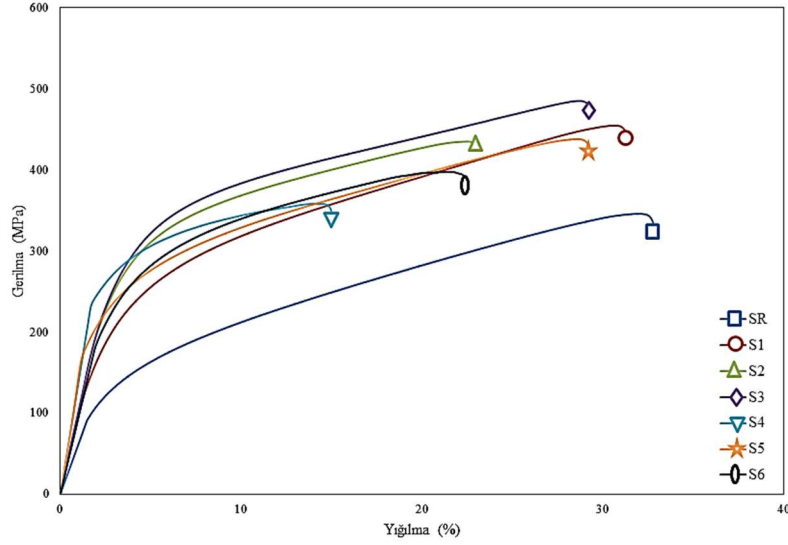


Şekil 5.24. Basma deneyi ile gevrek kırılma şeklinde plastik şekil değişimine uğramış numuneler

Şekil 5.24 'de dökme demir gibi gevrek malzemelerde kayma düzlemi boyunca meydana gelen gevrek kırılma şekilleri gözlenmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait basma deneyi (gerilme-yığılma) sonuçları Şekil 5.25 'de verilmiştir.

Şekil 5.25 'de verilen numunelerin basma deneyi sonuçları dikkate alındığında, referans numuneye göre kolemanit ilavesiyle basma mukavemetlerinin arttığı, buna karşın şekil değişim derecesinin (yığılma) azaldığı görülmektedir.

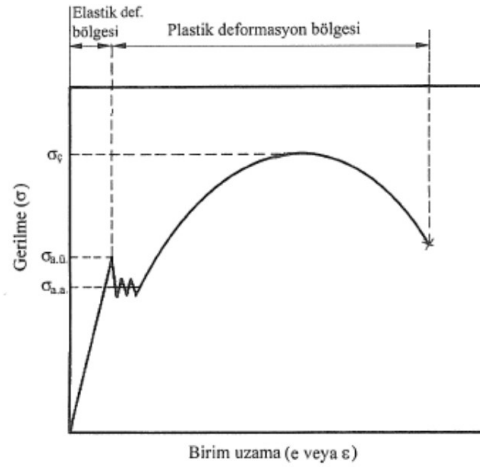


Şekil 5.25. Deney numunelerinin basma deneyi sonuçları

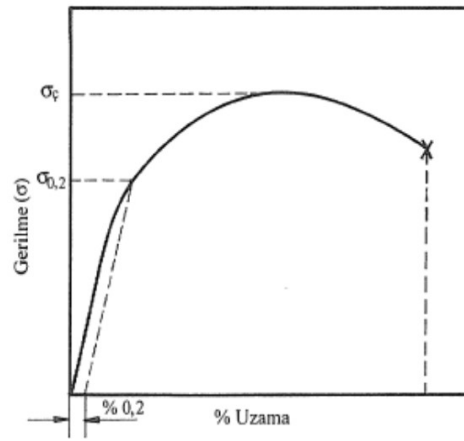
Şekil 5.25 ‘de en yüksek basma mukavemetine S3 numunesinin ve en yüksek şekil değişim derecesine SR numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Ancak SR numunesinin mukavemet değeri en düşük değere sahiptir. Sertlik değerinin malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı göz önüne alınırsa basma mukavemetinin artmasıyla plastik şekil değiştirme miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla matrise katılan kolemanit minareli malzemenin sertliğini artırmakta ve bu da malzemenin basma mukavemeti – şekil değişimi (gerilme – yığılma) özelliklerini etkilemektedir (Palta, 2009; Uçbeyiay Şahinkaya, 2010; Bican, 2010; Güler, 2012; Buytoz ve Eren, 2007; Gençalp vd., 2011).

Yapılan basma deneyi ile ilgili grafiklerden anlaşıldığı gibi deney numunelerinin basma mukavemeti, kolemanit takviyesi ile artmıştır. Ancak yatak malzemelerinde esas olan plastik şekil değişim bölgesi değil de elastik şekil değişim bölgesidir. Düşük karbonlu yumuşak çelik gibi malzemeler, deney koşullarına bağlı olarak belirgin akma sınırı gösterebilirler (Şekil 5.26). Malzemelerin belirgin akma göstermemesi durumunda, genelde % 0,2 ‘lik plastik uzamaya karşılık gelen çekme/basma gerilmesi akma sınırı veya akma mukavemeti olarak kabul edilir ve buna 0,2 teknik akma sınırı denir (Savaşkan, 2009; Soy, 2014). Şekil 5.27 ‘de belirgin bir akma göstermeyen malzemenin akma mukavemetinin nasıl belirlendiği görülmektedir (Savaşkan, 2009).

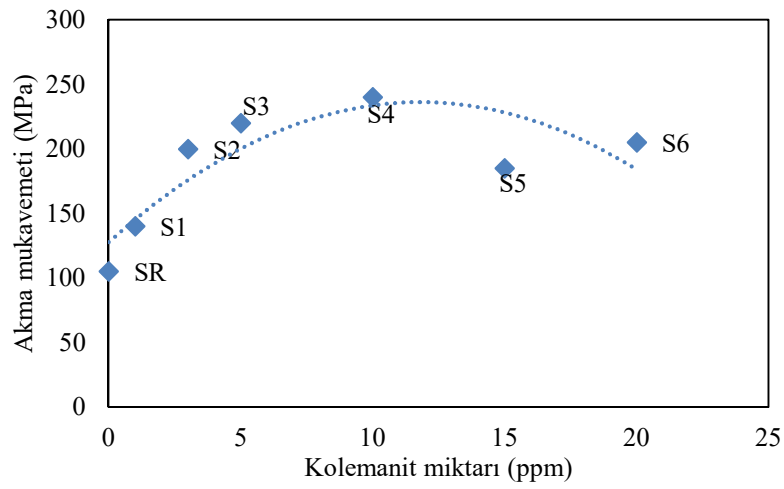
Bu durumda deney numunelerinin akma mukavemeti, gerilme-yığılma grafiğindeki % 0,2 ‘lik uzamadan belirlenmiştir (Şekil 5.28). Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait basma deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.1 ‘de toplu halde verilmiştir.



Şekil 5.26. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı (Savaşkan, 2009).



Şekil 5.27. Belirgin akma göstermeyen bir malzemenin akma mukavemetinin belirlenmesine ait diyagram (Savaşkan, 2009).



Şekil 5.28. Deney numunelerinin kolemanit oranına bağlı akma mukavemet değeri sonuçları

Şekil 5.28 'de verilen deney numunelerinin kolemanit oranına bağlı akma mukavemet değeri sonuçları dikkate alındığında, 10 ppm kolemanit ilaveli S4 numunesine kadar akma mukavemetinin maksimum noktaya ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan sonra akma mukavemeti azalma eğilimine girmiştir. Sonuç olarak çalışma şartlarına en uygun S4 numunesinin olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Basma deneyi sonuçları

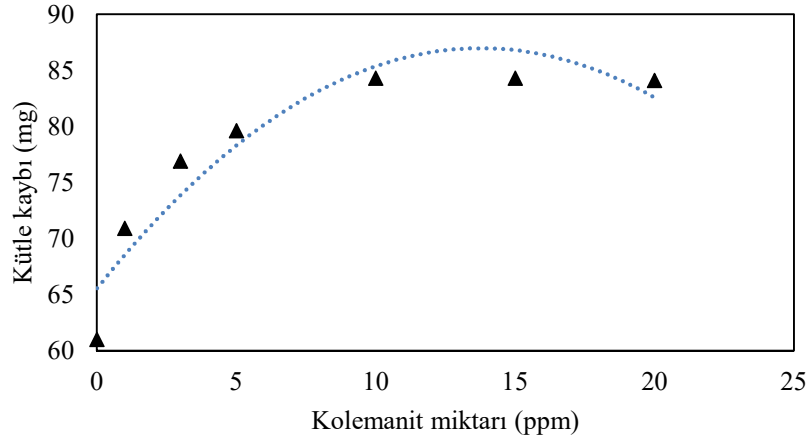
Numune No	Basma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Yığılma %
SR	345	105	32
S1	455	140	31
S2	435	200	23
S3	485	220	29
S4	360	240	15
S5	435	185	29
S6	400	205	22

Basma deneyi sonucunda elde edilen bulgulara göre; 1 – 20 ppm kolemanit ilavesi deney numunelerinin basma mukavemetini belirli bir değere kadar artırmıştır. Ancak yapıda oluşan intermetalik bileşikler ve oksitler gibi etkenlerle bazı deney numunelerinin basma mukavemetlerinin olumsuz olarak etkilendiği sonucuna varılmıştır (Sreeja Kumari vd., 2007; Ashtari vd., 2003; Seifeddine vd., 2008).

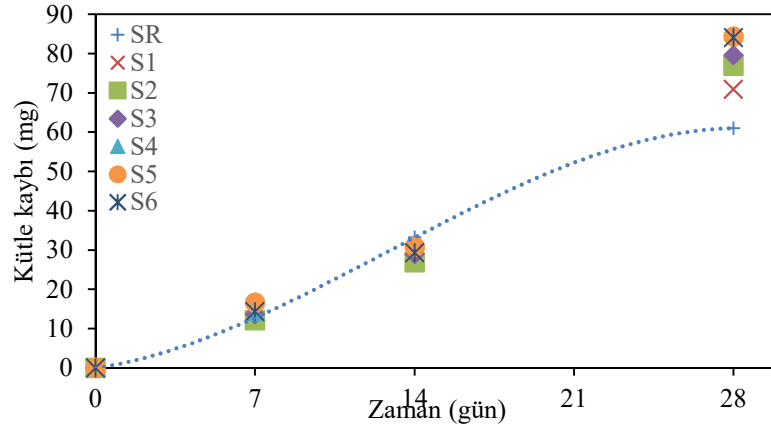
5.5. Korozyon Deneyi Sonuçları

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 'da deneysel çalışmalarda kullanılan numunelere ait korozyon deneyi sonuçları verilmiştir.

Esas itibari ile alüminyum ve alaşımlarının asitlere karşı duyarlı olduğu bilinen bir gerçektir. Ancak kolemanit ilavesinin bu özelliği bir miktar arttırabileceği düşünülmüştür. Bu deneyin yapılma amacı kolemanitin bu özelliği geliştirebileceği beklentisinden kaynaklanmaktadır. Ancak literatürde, takviye ilavesi mekanik özellikleri artırabilirken, matris metalinin korozyon özelliklerini olumsuz olarak etkilediği belirtilmektedir (Fang vd., 1999; Tandler vd., 2000).

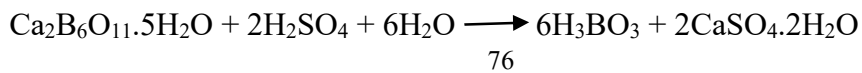


Şekil 5.29. Deney numunelerinin kolemanit oranına bağlı olarak korozyon etkisiyle kütle kaybı değişimi sonuçları



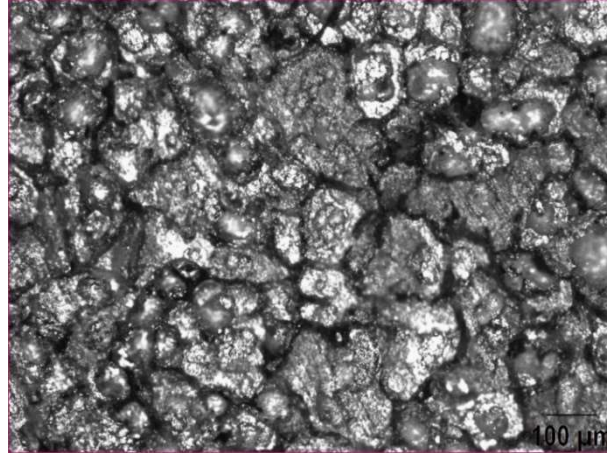
Şekil 5.30. Numunelerde korozyon deneyleri ile meydana gelen kütle kaybının zamana göre değişimi

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 'da verilen korozyon deneyi grafikleri incelendiğinde referans numuneye göre numunelerin ana matrisi oluşturan alüminyumun korozyon ortamına karşı göstermiş olduğu direncin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak matrise katılan kolemanit ve kolemanitin sülfürik aside olan ilgisinden dolayı bu numunelerin korozyon direnci zamanla düşmektedir (Dobrzanski vd., 2005). Kolemanit ve sülfürik asit arasında gerçekleşen ve asidik korozyon aşınması olarak belirtilen reaksiyon aşağıdaki gibidir. Ancak deney numunelerinin (AlSi6ZnCuFe) de sülfürik asitle benzer bir reaksiyon gösterdiği Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 'da verilen korozyon deneyi sonuçlarından anlaşılmaktadır.

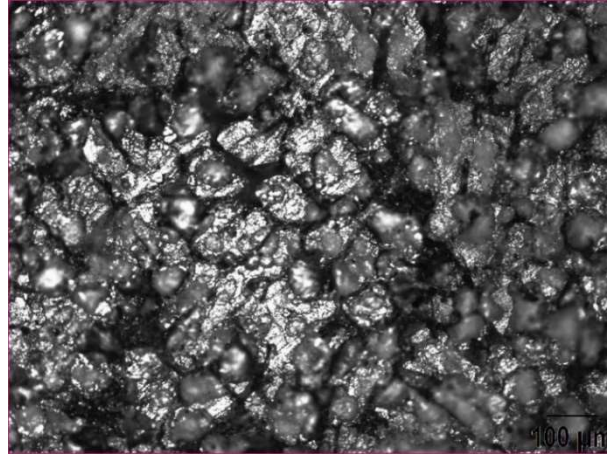


Özellikle % 10 kolemanit ilavesine kadar malzemenin korozyon direnci iyice azalmakta ve bu değerdan sonra tekrar artmaktadır. Kolemanit yerine başka takviye bileşiklerin ve/veya minarellerin kullanıldığı çalışmalar bu sonucu doğrular niteliktedir (Fang vd., 1999; Tandler vd., 2000; Dobrzanski vd., 2005).

Deney numunelerinin korozyon deneyleri sonucunda oluşan aşınmış yüzeylerinin mikroyapıları incelendiğinde; aşınma izlerinin karakteristik yapıları Şekil 5.31 – Şekil 5.37’de görölmektedir.

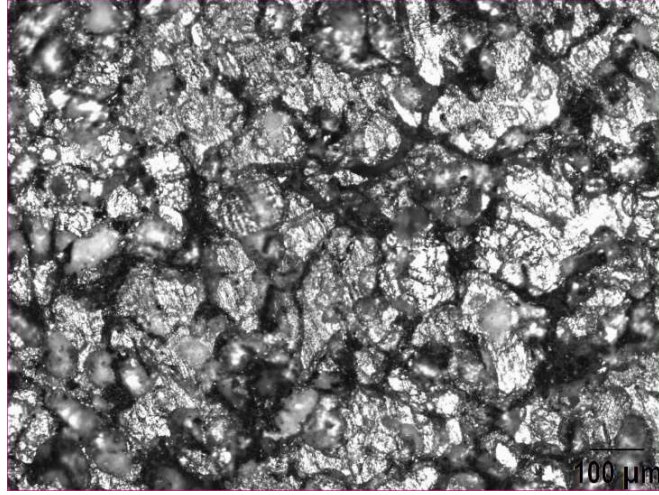


Şekil 5.31. SR numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100



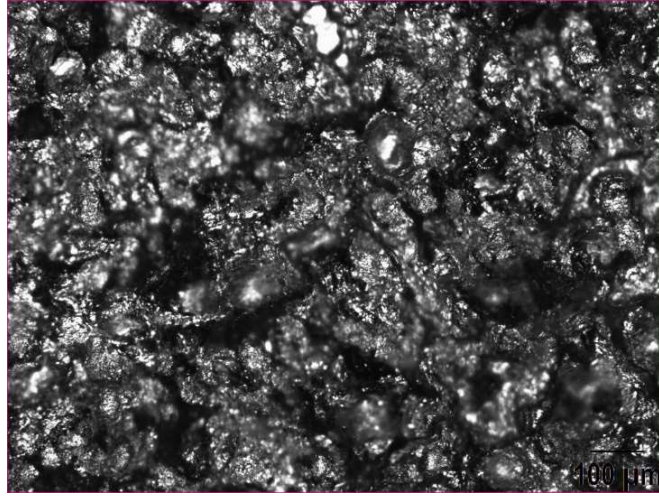
Şekil 5.32. S1 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.31 ve Şekil 5.32 incelendiğinde; kolemanit ilavesiyle tane sınırlarında, tane küçölmesinden ziyade tane sınırının genişlemesine neden olan ve intermetaliklerin çökmesi ile korozif reaksiyon aşınma kaybı veya karbon çökmesi meydana gelmektedir.



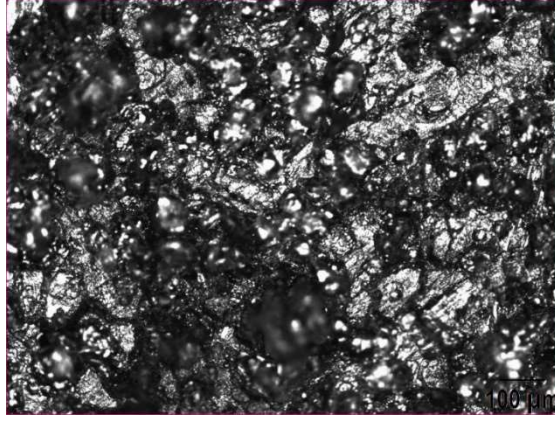
Şekil 5.33. S2 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.33 ‘de verilen S2 numunesine ait asidik korozyon etkisiyle aşınmış yüzey resmi incelendiğinde kolemanit etkisiyle yine taneler arası korozyon oluşumu izlenmektedir.

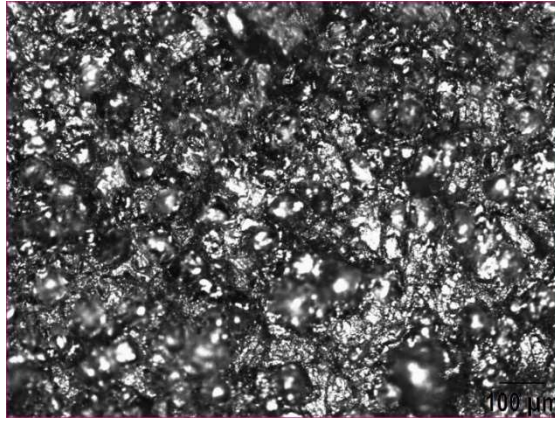


Şekil 5.34. S3 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

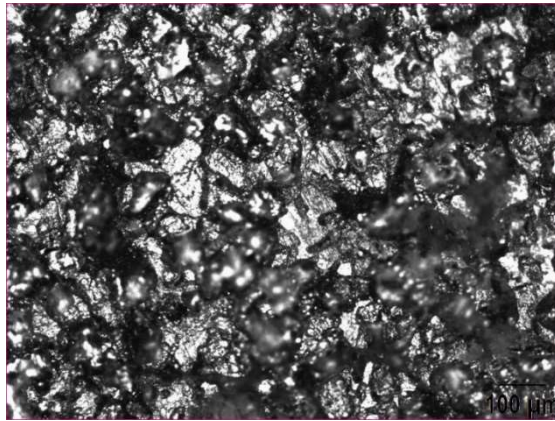
S3 numunesinin Şekil 5.34 ‘de verilen asidik korozyon ile aşınmış yüzey resminde kolemanit etkisiyle taneler arası korozyonun artarak geliştiği görülmektedir.



Şekil 5.35. S4 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

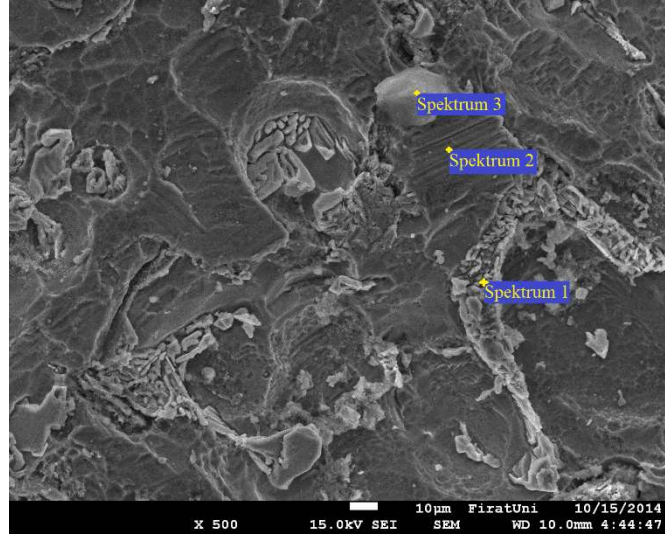


Şekil 5.36. S5 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

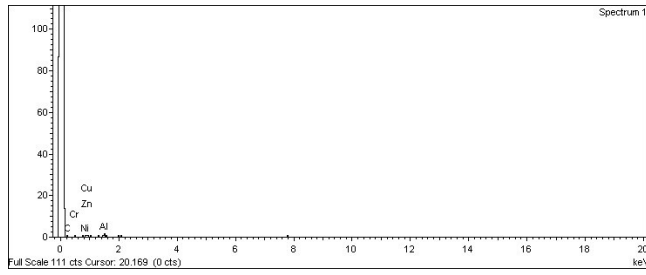


Şekil 5.37. S6 numunesinin korozyon deneyleri sonucundaki optik mikroskop resmi, X 100

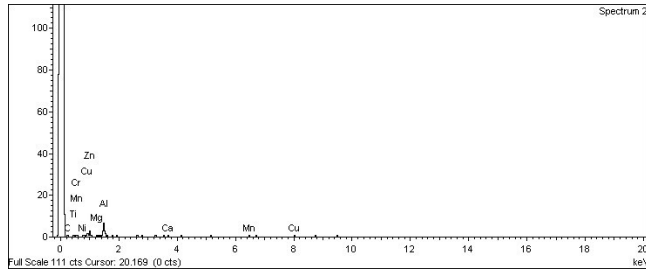
Şekil 5.35 – Şekil 5.37 ‘deki S4, S5 ve S6 numunelerine ait resimler incelendiğinde, asidik korozyon aşınmasının artan kolemanit (10-15-20 ppm) etkisiyle tane sınırları ile beraber tane içlerinde de yaygınlaşmış olduğu görülmektedir.



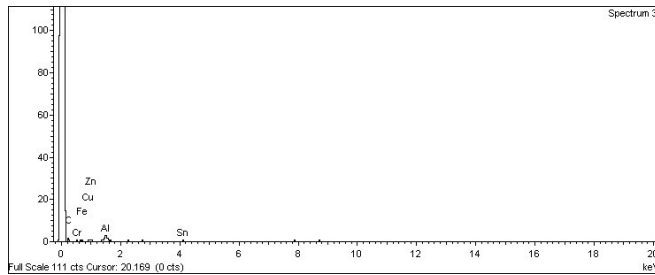
Şekil 5.38. S6 numunesinin asidik korozyon deneyleri sonucu aşınmış yüzeyinin EDX 'li SEM görüntüsü



Element	Weight%	Atomic%
C K	86.02	96.50
Al K	1.74	0.87
P K	0.19	0.08
Cr K	0.01	0.00
Mn K	0.01	0.00
Ni K	0.53	0.12
Cu L	8.72	1.85
Zn L	2.78	0.57
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
C K	83.73	94.80
Mg K	0.26	0.14
Al K	5.52	2.78
Ca K	0.28	0.10
Ti K	0.01	0.00
Cr K	0.18	0.05
Mn K	0.16	0.04
Fe K	0.22	0.05
Ni K	0.15	0.03
Cu L	4.90	1.05
Zn L	4.55	0.95
Sb L	0.05	0.01
Totals	100.00	



Element	Weight%	Atomic%
C K	89.06	96.94
Al K	2.99	1.45
Si K	0.14	0.06
Ti K	0.01	0.00
Cr K	0.01	0.00
Mn K	0.01	0.00
Fe K	0.01	0.00
Cu L	4.85	1.00
Zn L	2.39	0.48
Sn L	0.17	0.02
Sb L	0.35	0.04
Totals	100.00	

Şekil 5.39. Korozyon deneyleri sonucu asidik olarak aşınan S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları (Spektrum 1, 2, ve 3)

Şekil 5.38 ve Şekil 5.39 da verilen SEM fotoğraf ve EDX analiz sonuçlarından anlaşıldığı üzere korozyon aşınması ürünü olarak matrisin ortalama % 85’lik kısmı karbona dönüşmüş durumdadır. Yani asidik korozyon aşınmasına maruz kalmıştır. Ancak Cu₃Zn alaşımı, CCu₉Zn₃Al₂, CA₁₆Cu₅Zn₅ ve CCu₅Al₃Zn₂ bileşikleri ile bazı numunelerde Mn, Cr ve Ni gibi elementlerin yapıda kaldığı tespit edilmiştir.

Korozyon deneyi numunelerinin, mikroyapı incelemeleri sonucunda, taneler arası korozyonuna maruz kaldıkları açık bir şekilde görülmektedir. Taneler arası korozyon etkisi gözle görülemediği için en tehlikeli korozyon türü olarak kabul edilmektedir ve mikroyapı incelemeleri sonucunda tespit edilebilmektedir. Ayrıca taneler arası intermetalik bileşiklerin asidik korozyon direnci tane içlerine göre daha zayıf olduğu belirtilmektedir. Buna, tane sınırlarında bulunan intermetalik çökeltilerin özel ortamlarla reaksiyona girmesinin neden olduğu bilinmektedir (MEGEP, 2012).

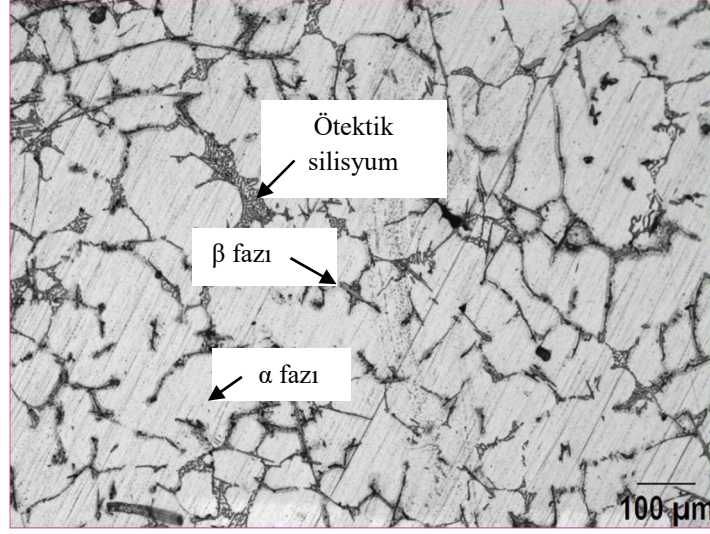
5.6. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

5.6.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

Şekil 5.40 – Şekil 5.46 ’da deney numunelerinin optik mikroskop resimleri görülmektedir. Burada açık renkli kısımlar alüminyum esaslı bileşimleri temsil etmektedir.

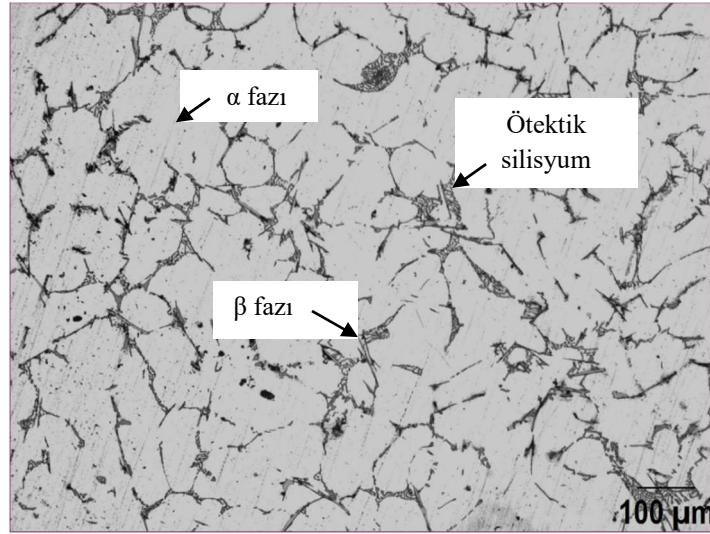
Kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen numunelerden alınan optik mikroskop mikroyapı resimlerinde α -Al taneleri açık olarak görülmektedir. Alüminyum taneleri arasında esas olarak silisyum ve diğer bileşenler bulunmaktadır (ASM; Yıldırım, 2012; Sreeja Kumari vd., 2007; Zeren vd., 2011; Savaşkan ve Alemdağ, 2008; Hekmat-Ardakan vd., 2010; Dayanand vd., 2013; Feyzullahoğlu vd., 2013).

Optik mikroskop fotoğraflarında referans numuneye göre kolemanit etkisiyle tane sınırı çökeltileri ve ayrıca bir miktar tane incelmesi izlenmektedir.



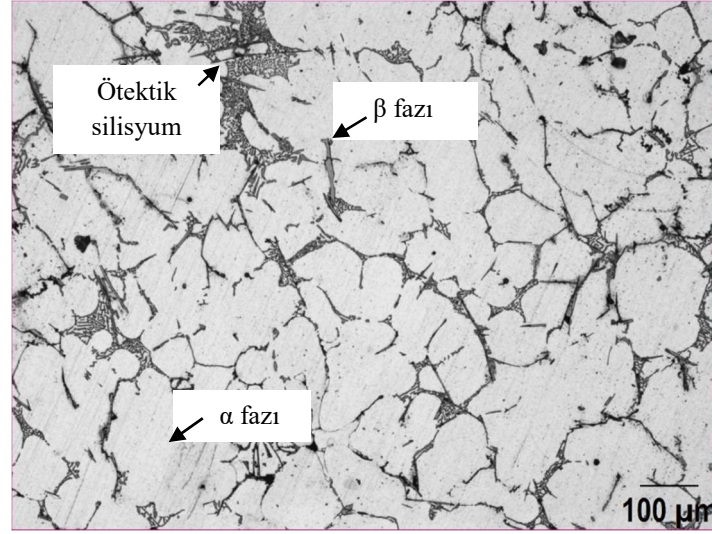
Şekil 5.40. SR numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.40 ‘da görülen SR numunesinin optik mikroskop resminde, matris α -Al dendritlerinden oluşmaktadır. Tane sınırlarında ise intermetalikler ve silisyum ötektiklerinin olduğu görülmektedir.



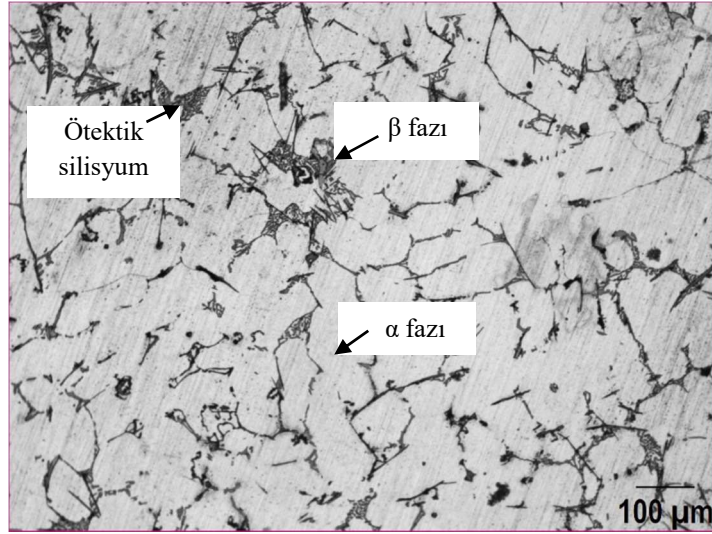
Şekil 5.41. S1 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

S1 numunesinin Şekil 5.41 ‘de verilen optik mikroskop resminde, matrisin α -Al dendritlerinden ve tane sınırlarında ise intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden meydana geldiği görülmektedir.



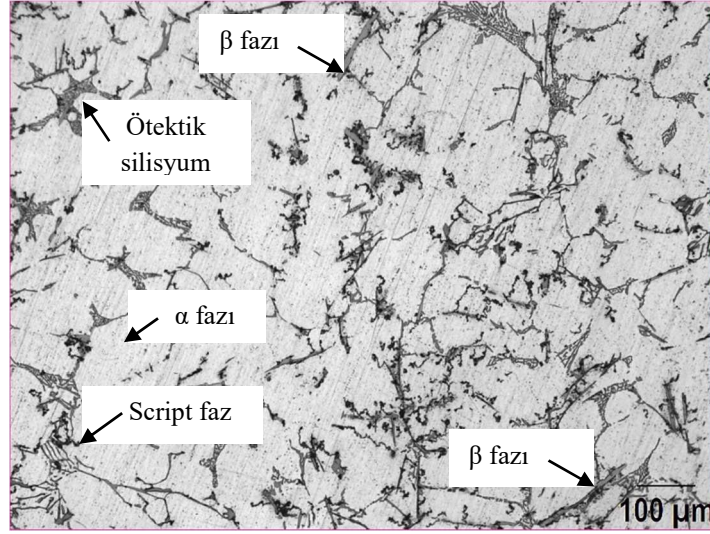
Şekil 5.42. S2 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.42 ‘de S2 numunesinin optik mikroskop resmi incelendiğinde, matrisin α -Al dendritlerinden, tane sınırlarında intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden oluştuğu görülmektedir.



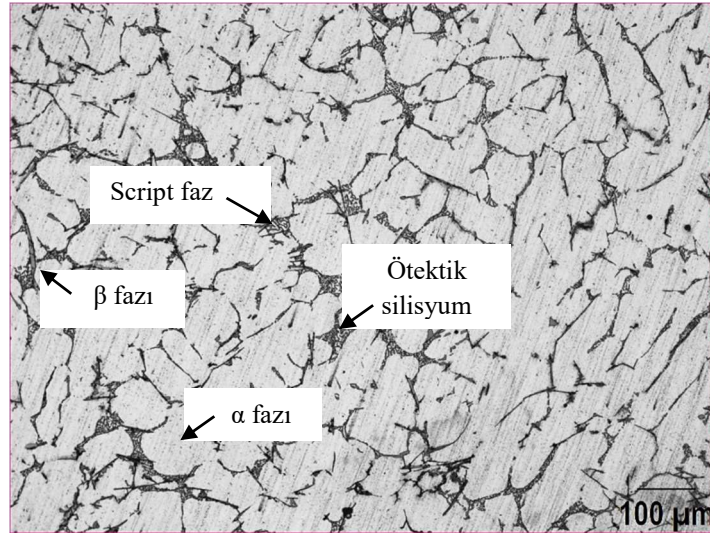
Şekil 5.43. S3 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

S3 numunesinin Şekil 5.43 ‘de verilen optik mikroskop resminde, matrisin α -Al dendritlerinden ve tane sınırlarında ise intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden oluştuğu görülmektedir.



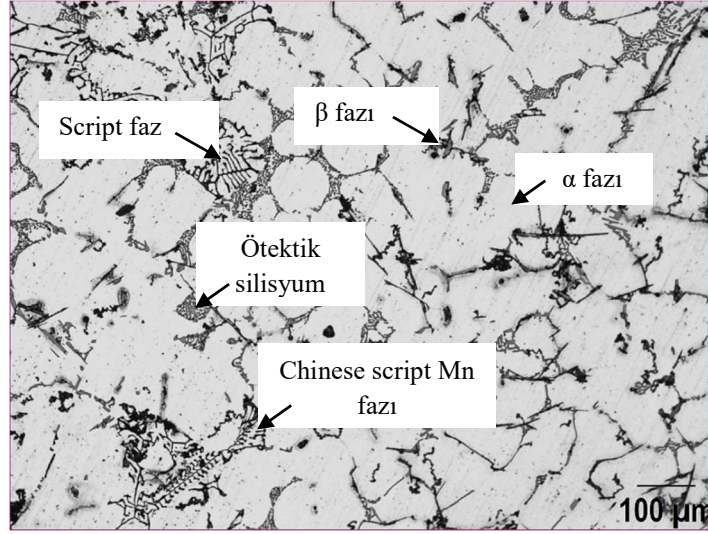
Şekil 5.44. S4 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.44 ‘de S4 numunesinin optik mikroskop resminde, matrisin α -Al dendritlerinden, tane sınırlarında intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca yapıda Çin harflerine benzer şekilde Script fazına da rastlanılmıştır.



Şekil 5.45. S5 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

S5 numunesinin Şekil 5.45 ‘de verilen optik mikroskop resminde, yine matrisin α -Al dendritlerinden ve tane sınırlarında ise intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden oluştuğu görülmektedir. Kolemanit miktarının artmasıyla birlikte Script fazlar da artmaya başlamıştır



Şekil 5.46. S6 numunesinin optik mikroskop resmi, X 100

Şekil 5.46 ‘da S6 numunesinin optik mikroskop resmi incelendiğinde, matrisin α -Al dendritlerinden, tane sınırlarında intermetalikler ve silisyum ötektiklerinden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca yapıda Script fazları Ca miktarına paralel olarak artmaya başlamıştır. Artan kolemanit etkisiyle tane sınırı genişlemesi ve dentritleşme oranında önemli bir artış izlenmiştir. Burada benzer bulguların asidik korozyon incelemesinde de tespit edildiği hatırlanmalıdır.

Şekil 5.40 ile Şekil 5.46 ‘daki yapılarda ana matrisi oluşturan α fazına, tane sınırlarında meydana gelen silisyum ötektiğine ve iğne şekline benzer (iğnemsisi) β fazına rastlanılmıştır. Daha önceden yapılan çalışmalarda buna benzer bulgulara ulaşıldığı bildirilmektedir (Sreeja Kumari vd., 2007; Bican, 2010; Yıldırım, 2012; Ji vd., 2013; Dhiman vd., 2014; Feyzullahoğlu vd., 2013; Rao vd., 2006).

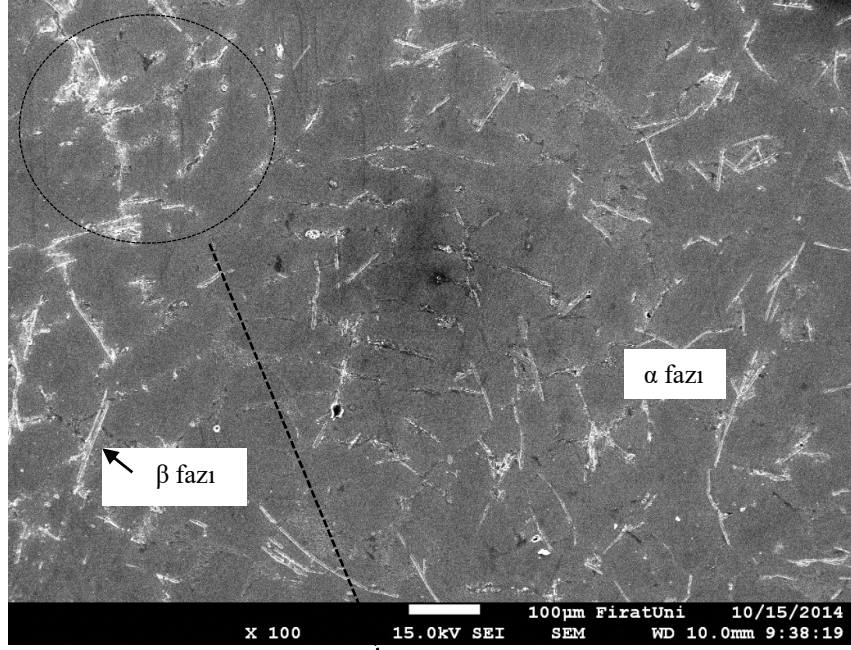
Ayrıca yapıya takviye elemanı ile birlikte giren Ca elementinin modifikasyon özelliğinden dolayı iğnemsisi olan Si ötektiğinin β -fazını, script fazına (Çin harflerine benzer) dönüştürmüştür (McDonald, 2004). Ayrıca yine yapıdaki β -fazlarını (AlFeSi) değiştirerek, demirce zengin intermetaliklerin olumsuz etkilerini azaltarak, çekme ve darbe dirençlerini iyileştirmektedir. Dolayısıyla yapıdaki kırılma etkisini ortadan kaldırmaktadır (Sreeja Kumari vd., 2007; Dæhlen, 2013; Ashtari vd., 2003; Seifeddine vd., 2008; Uludağ, 2011). Demirce zengin intermetaliklerin nötralize edilebilmesi için optimum Ca miktarı % 0,03-

0,04 olarak tespit edilmiştir (Sreeja Kumari vd., 2007). Araştırma malzemelerimizde ise Ca oranının literatürde belirtilen % oranının sınırları dışına çıkan S4, S5 ve S6 numunelerinde de intermetalik ve script fazının tespit edilmiş olmasının nedeni anlaşılmıştır.

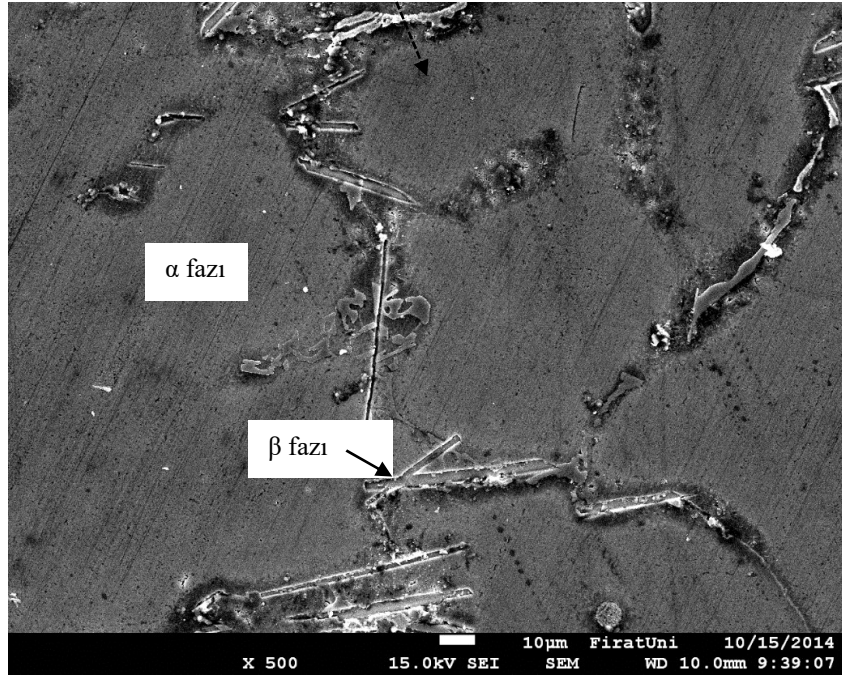
5.6.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX İncelemeleri

Parlatılmış ve dağlanmış numunelerden çeşitli büyütmelerde alınan mikroyapı SEM resimleri ve EDX analizleri SR, S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 numuneleri için sırasıyla Şekil 5.47 – Şekil 5.80 'de verilmiştir.

Deney numunelerinden alınan mikroyapı SEM görüntülerinde ana matrisi meydana getiren α -Al yapıları açık olarak görülmektedir. Matris yapısının % 85 – 90 'nın α -Al + Si ve/veya α -Al + Si + Zn / α -Al + Si + Zn + Cu ana bileşeni olan alüminyum tane sınırlarında silisyum bileşenli yapılar ve demirce zengin intermetalikler bulunmaktadır. Matris içerisinde özellikle Si, Zn ve Cu elementlerinin homojen bir dağılım gösterdiği ve kolemanit ilavesiyle yoğunluğun az da olsa artmasıyla mikroyapıdaki gözenekliliğin azaldığı düşünülmektedir.



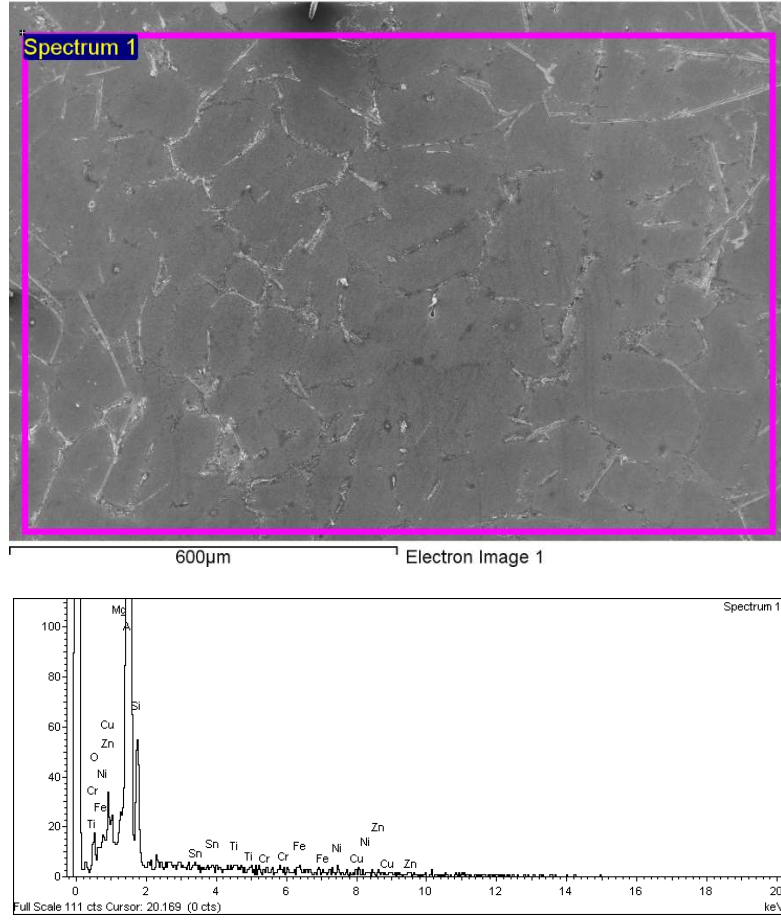
(a)



(b)

Şekil 5.47. SR numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

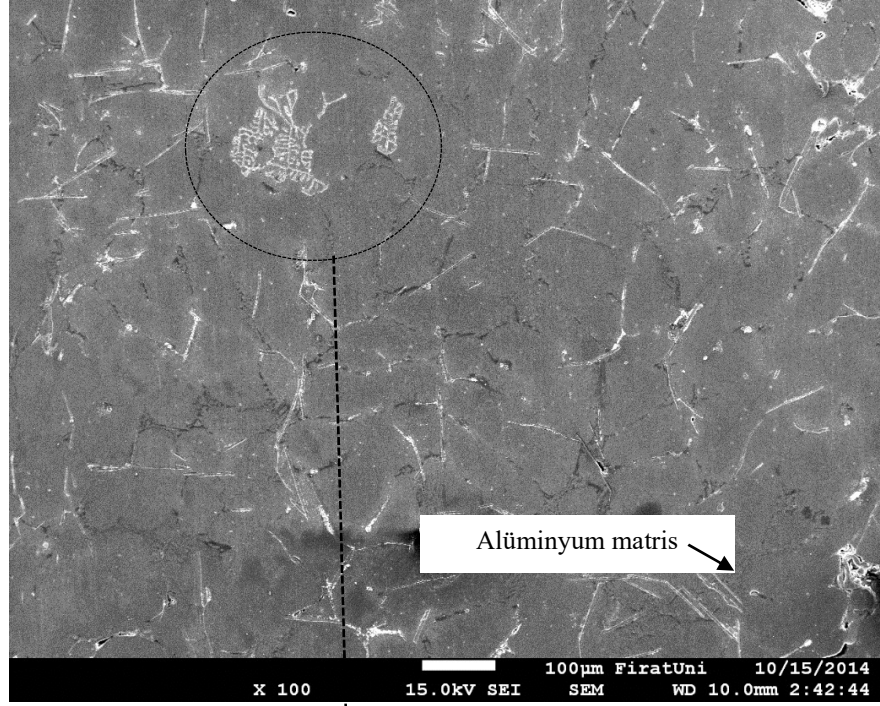
Şekil 5.47 incelendiğinde matrisi oluşturan yapılar, α -Al dendritleri ve tane sınırlarında Si bileşimli ve demirce zengin intermetalikler görülmektedir (ASM; Sreeja Kumari vd., 2007; Feyzullahoğlu vd., 2013).



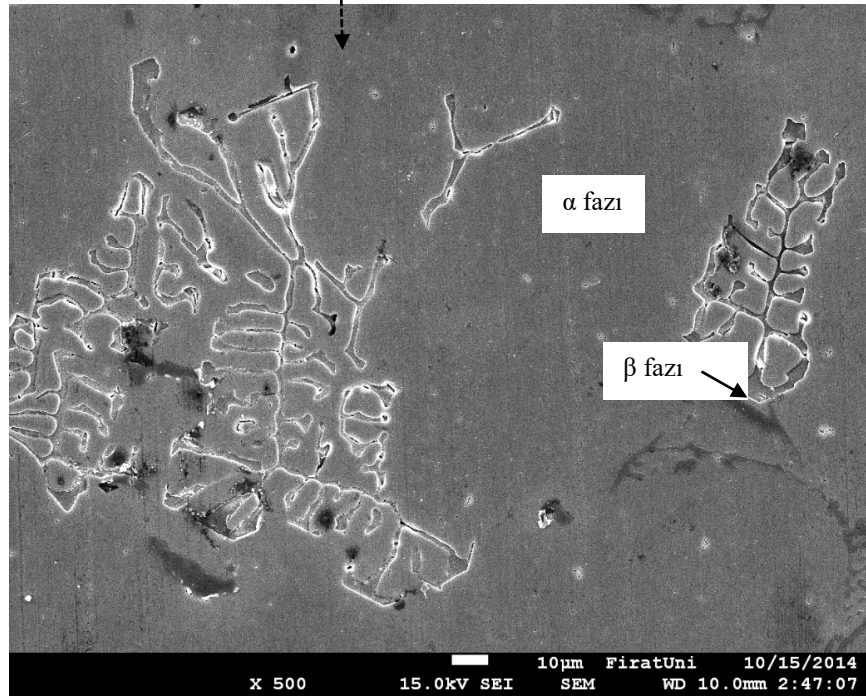
Element	Weight%	Atomic%
O K	2.61	4.46
Mg K	0.29	0.32
Al K	86.25	87.42
Si K	5.68	5.53
Ti K	0.18	0.11
Cr K	0.31	0.16
Fe K	0.78	0.38
Ni K	1.05	0.49
Cu L	1.42	0.61
Zn L	1.03	0.43
Sn L	0.41	0.09
Totals	100.00	

Şekil 5.48. SR numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

Şekil 5.48 'de SR numunesinin EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunun $\text{AlSi}_6\text{CuNiZn}$, metal ve ametal oksitler ve diğer bileşiklerden oluştuğu belirlenmiştir.



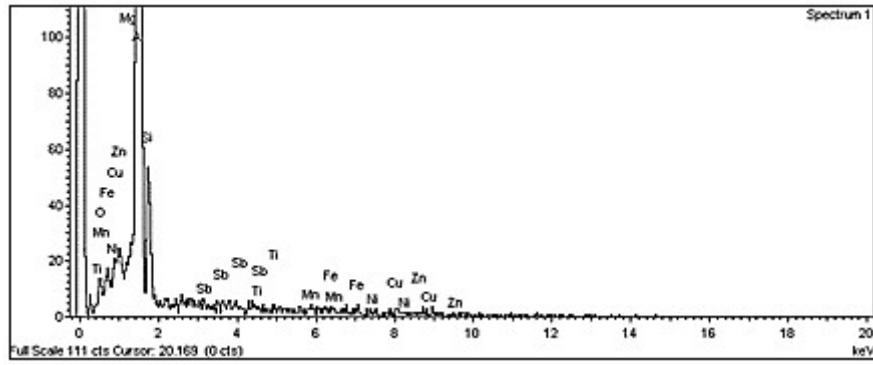
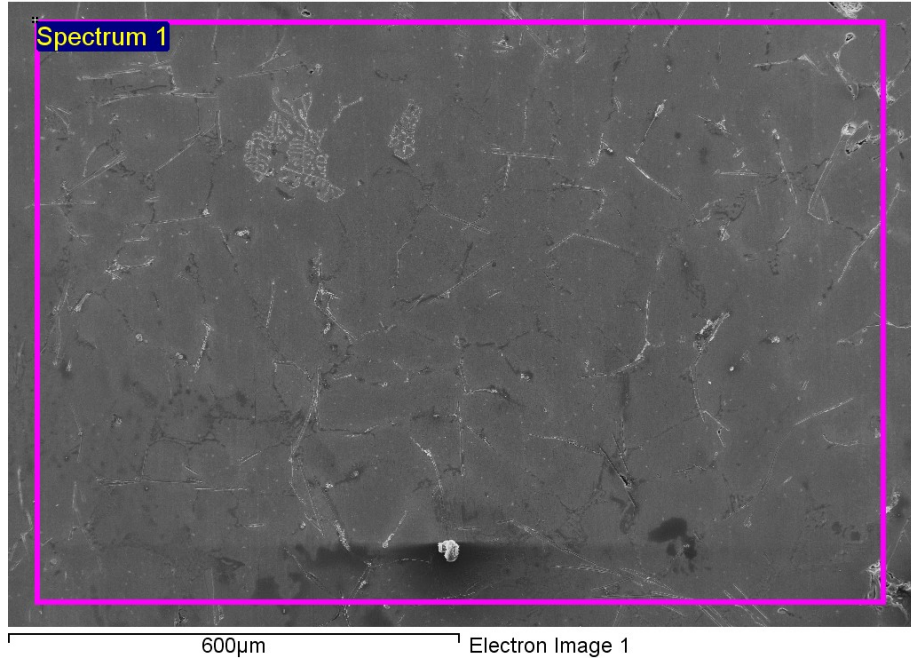
(a)



(b)

Şekil 5.49. S1 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

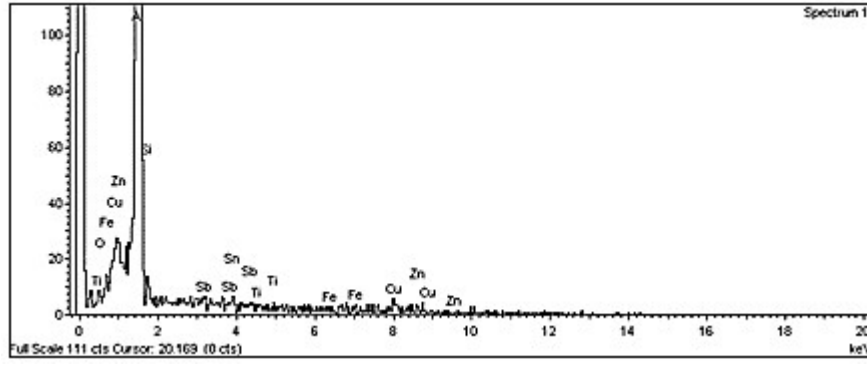
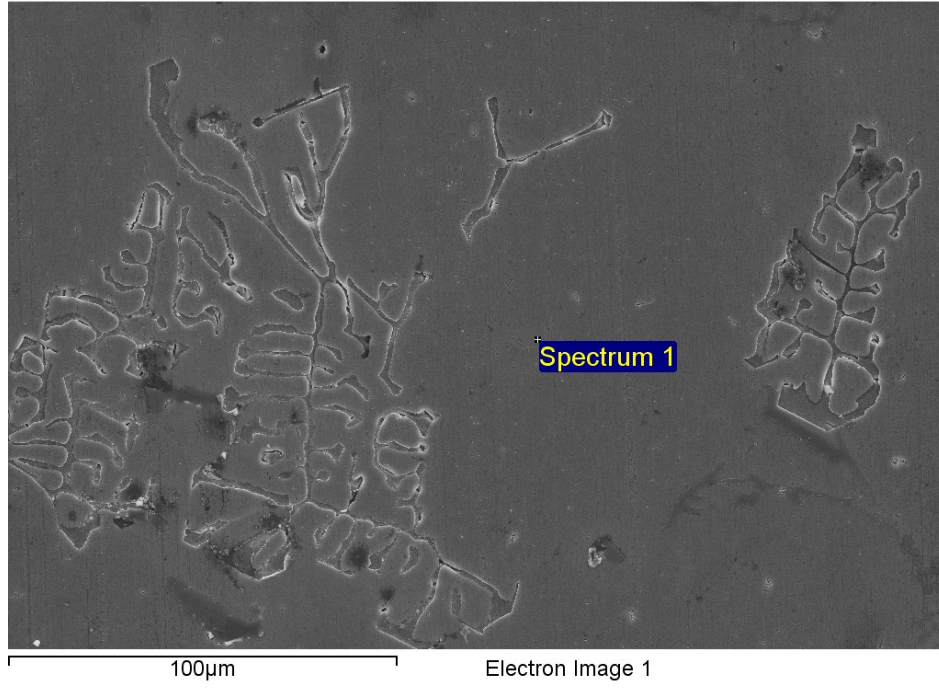
S1 numunesinin X100 ve X500 büyütmeli SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapısının referans numunesi gibi α -Al + Si, tane sınırlarında Si bileşenlerinden ve intermetaliklerden oluştuğu görülmektedir (ASM; Sreeja Kumari vd., 2007; Feyzulloğlu vd., 2013).



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.63	3.30
Mg K	0.05	0.06
Al K	88.37	89.97
Si K	5.18	5.05
Ti K	0.01	0.01
Mn K	0.61	0.30
Fe K	0.56	0.26
Ni K	0.98	0.46
Cu L	1.08	0.46
Zn L	1.30	0.55
Sb L	0.23	0.05
Totals	100.00	

Şekil 5.50. S1 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

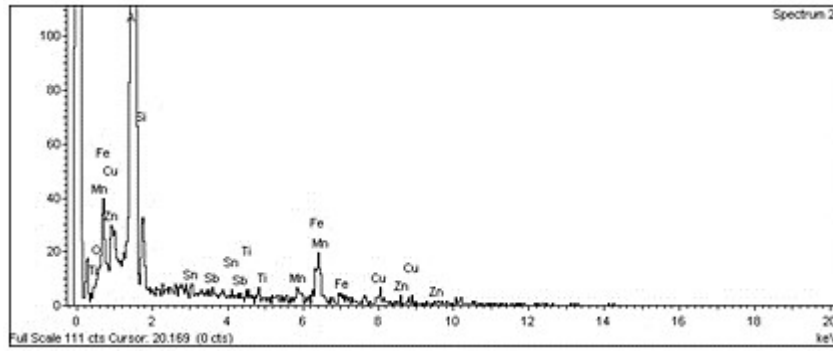
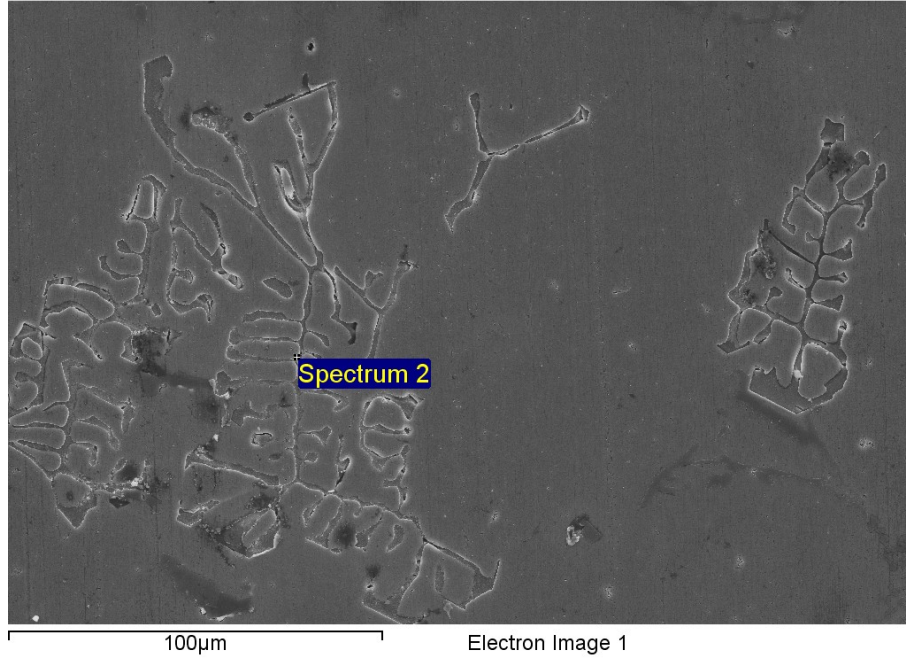
Şekil 5.50 'de X100 büyütmeli S1 numunesinin EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel (genel) analiz sonucunda matris kompozisyonunun AlSi5ZnCuNi, metal ve ametal oksitler ve diğer (Ti, Mn, Fe gibi) elementlerden oluştuğu belirlenmiştir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	0.48	0.83
Al K	94.88	89.99
Si K	1.06	1.03
Fe K	0.33	0.17
Cu L	0.73	0.32
Zn L	0.32	0.14
Sn L	0.75	0.18
Sb L	1.45	0.34
Totals	100.00	

Şekil 5.51. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

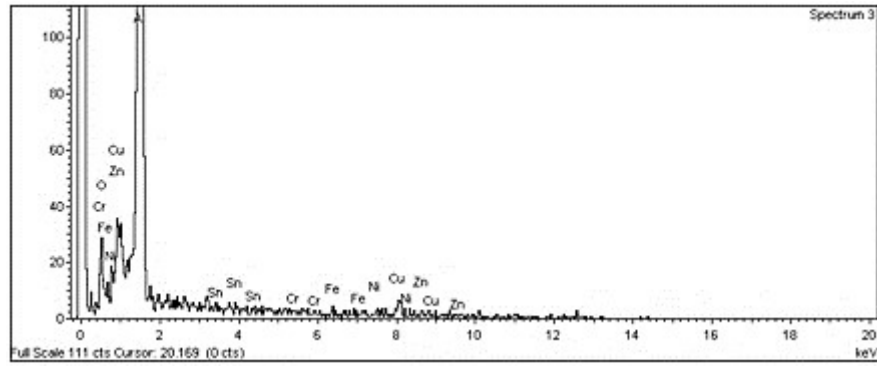
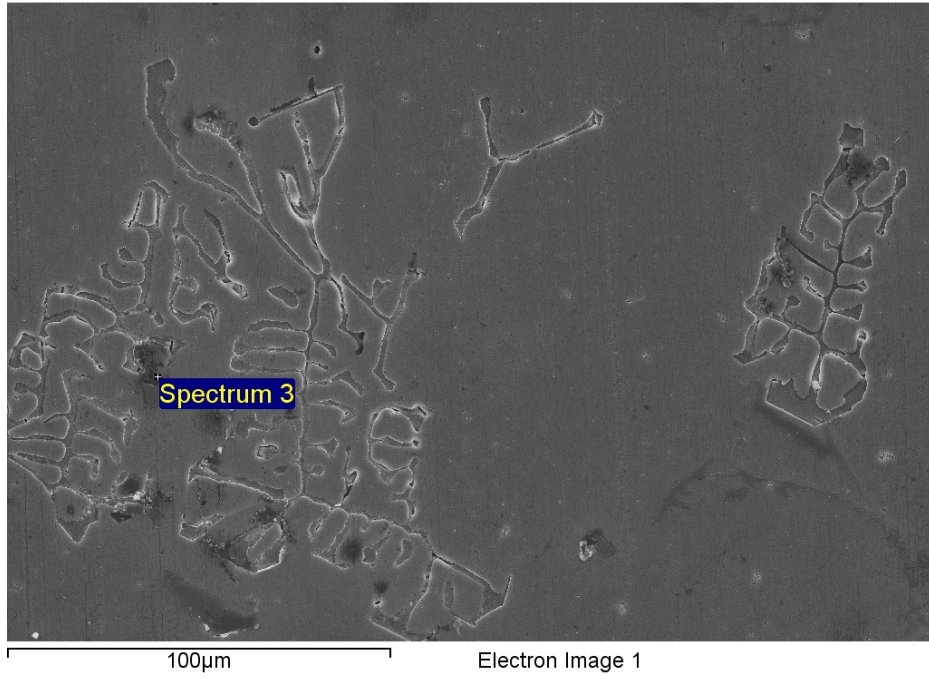
X500 büyütmede S1 numunesine ait Şekil 5.51 'deki EDX resminde görülen ve 1 numaralı noktasal analize göre bölgenin AlSbSi ve diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	0.69	1.25
Al K	81.44	88.48
Si K	3.08	3.19
Ti K	0.39	0.25
Mn K	1.43	0.77
Fe K	7.10	3.73
Cu L	2.86	1.31
Zn L	1.34	0.60
Sn L	0.47	0.13
Sb L	1.20	0.29
Totals	100.00	

Şekil 5.52. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

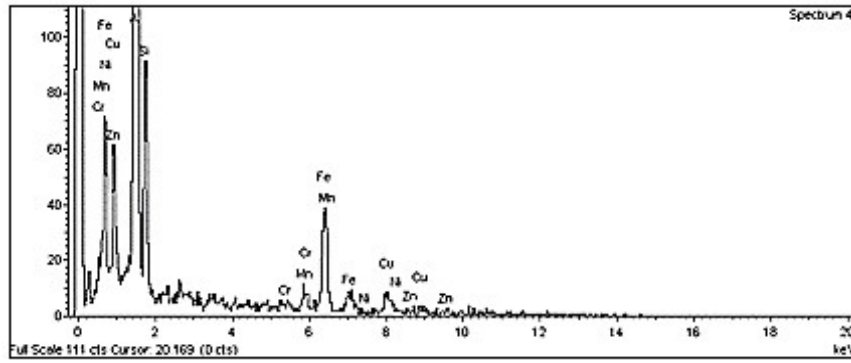
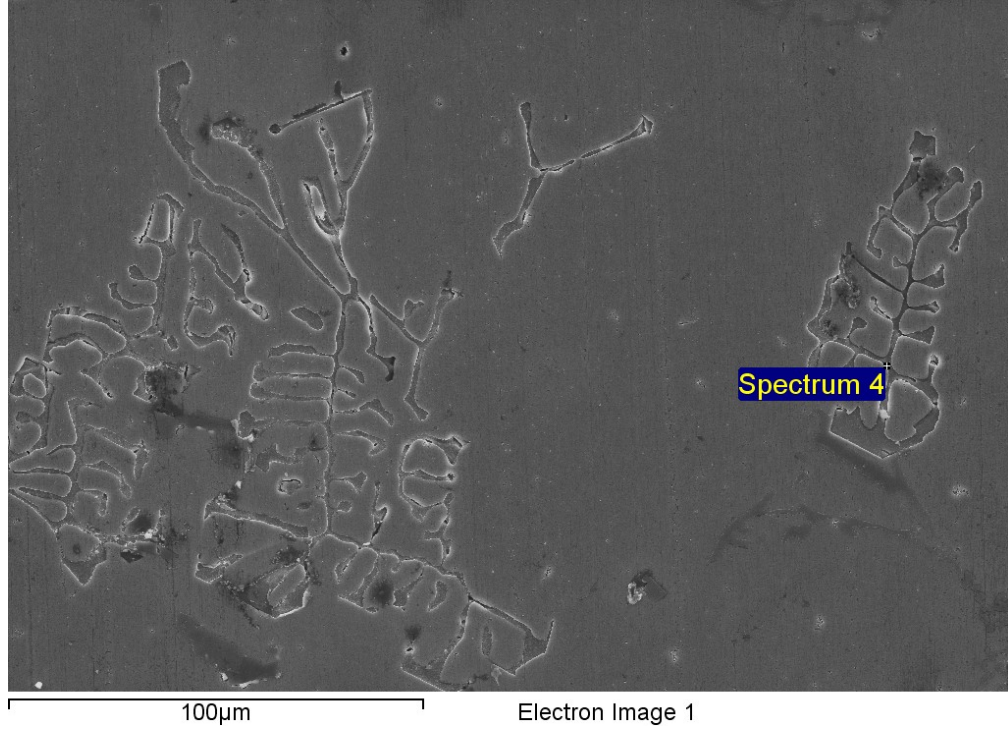
Şekil 5.52 'de X500 büyütme S1 numunesinin EDX resminde görülen 2 numaralı noktasal analiz sonucunda $AlFe_7Si_3Mn$ ve $AlCu_3$ elementlerini ihtiva eden intermetalik bileşiklere, $AlZnSb$ ve diğer elementlerin meydana getirdiği bileşime sahip olduğu görülmüştür (ASM; Sreeja Kumari vd., 2007; Feyzulloğlu vd., 2013).



Element	Weight%	Atomic%
O K	5.32	8.99
Al K	88.10	88.23
Cr K	0.07	0.04
Fe K	0.89	0.43
Ni K	0.55	0.25
Cu L	2.34	0.99
Zn L	2.38	0.98
Sn L	0.35	0.09
Totals	100.00	

Şekil 5.53. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

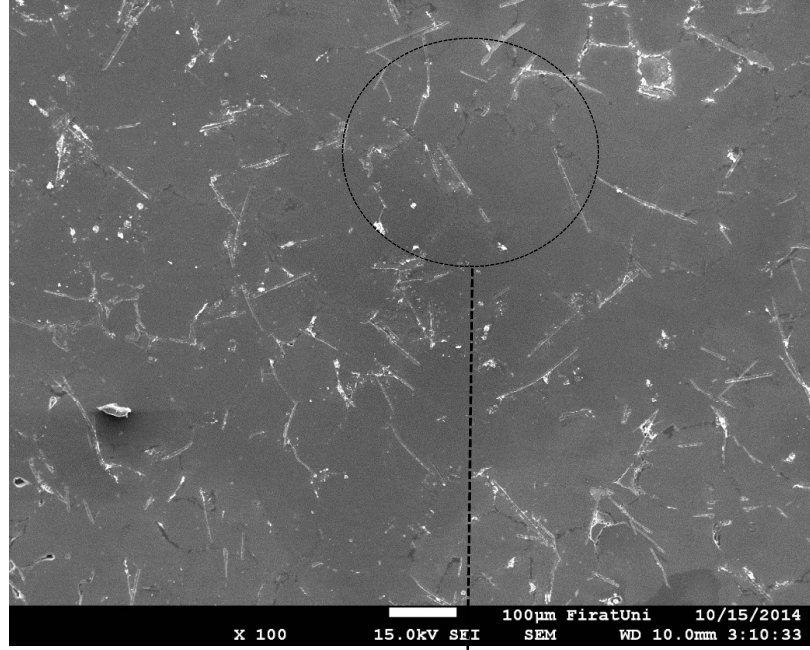
X500 büyütmede S1 numunesine ait Şekil 5.53 'deki EDX resminde görülen ve 3 numaralı noktasal analiz sonucunda matris kompozisyonunun $AlZn_2Cu_2$, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



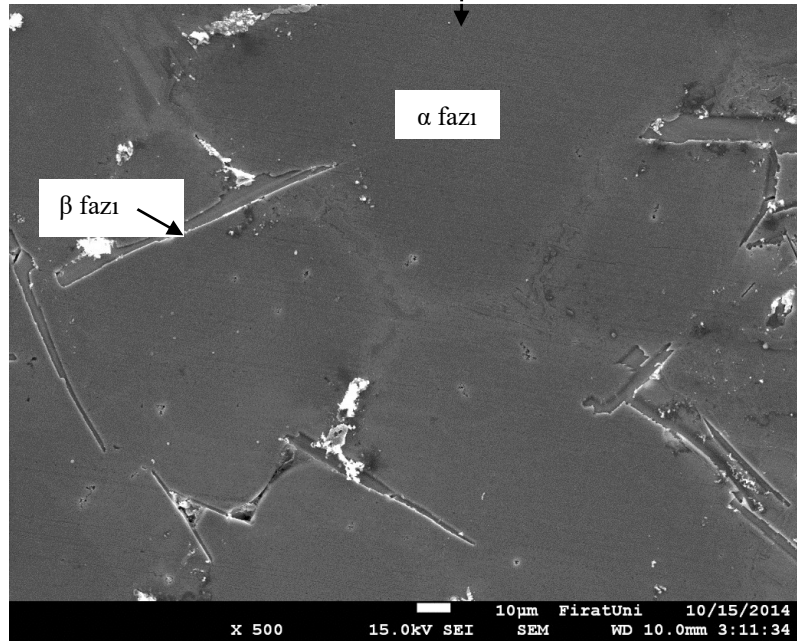
Element	Weight%	Atomic%
Al K	58.90	71.83
Si K	8.33	9.74
Cr K	0.09	0.05
Mn K	2.48	1.48
Fe K	18.07	10.64
Ni K	0.09	0.05
Cu L	10.34	5.37
Zn L	1.67	0.84
Totals	100.00	

Şekil 5.54. S1 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

Şekil 5.54 incelendiğinde, tane sınırında dendritik (dalı) çökelti (Al, Fe, Si, Mn, Zn) yapıların ve $\text{AlFe}_{18}\text{Si}_8\text{Mn}_2$ ve $\text{AlCu}_{10}\text{Zn}$ bileşimlerinin olduğu tespit edilmiştir.



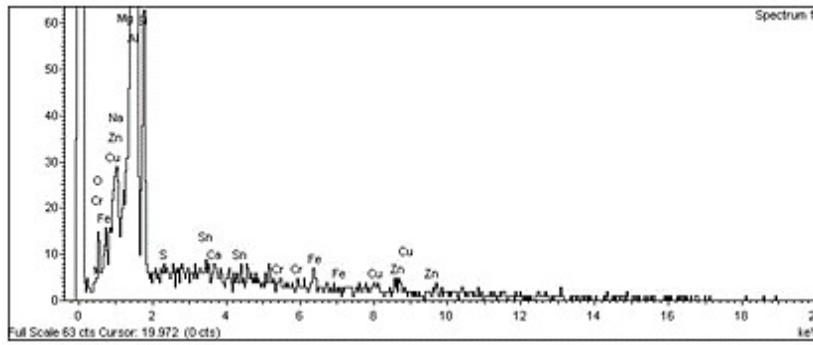
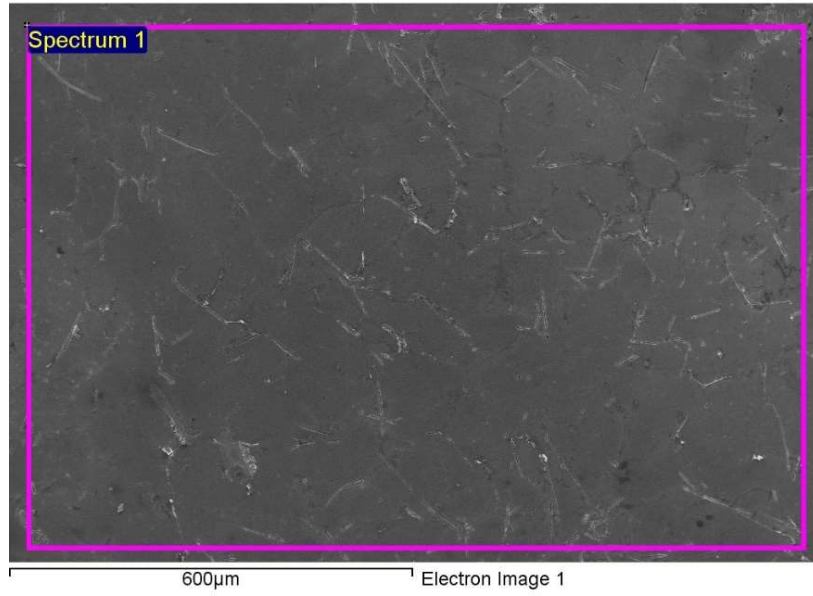
(a)



(b)

Şekil 5.55. S2 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

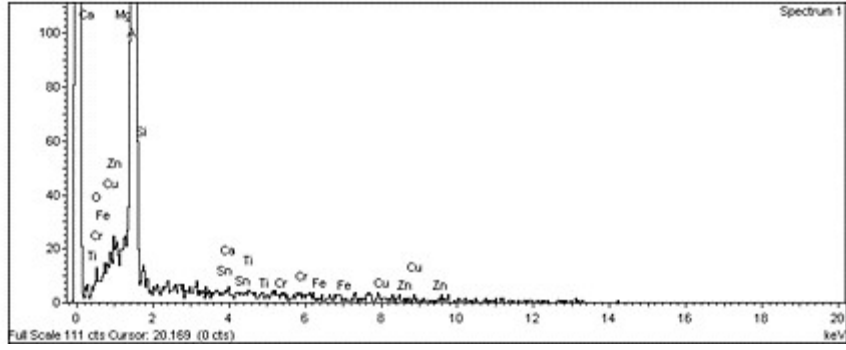
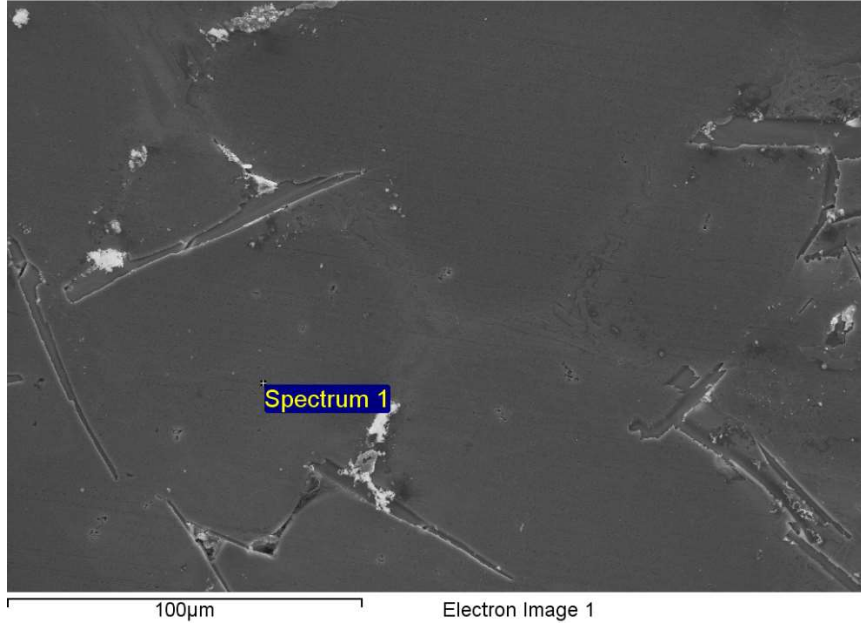
Şekil 5.55 'de S2 numunesinin X100 ve X500 büyütme SEM görüntüleri incelendiğinde, α -Al + Si'dan oluşan ana matris ve tane sınırlarında da intermetalikler görülmektedir (ASM; Sreeja Kumari vd., 2007; Feyzullahoğlu vd., 2013).



Element	Weight%	Atomic%
O K	3.08	5.18
Na K	0.01	0.01
Mg K	0.07	0.08
Al K	87.91	87.72
Si K	5.97	5.72
S K	0.01	0.01
Ca K	0.07	0.05
Cr K	0.14	0.07
Fe K	1.02	0.49
Cu K	0.64	0.27
Zn K	0.86	0.35
Sn L	0.23	0.05
Totals	100.00	

Şekil 5.56. S2 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

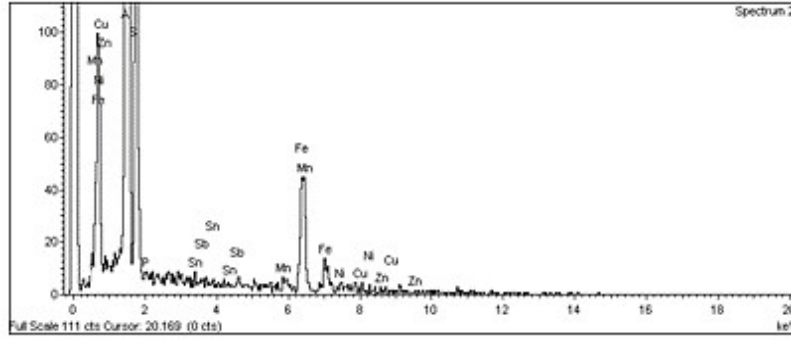
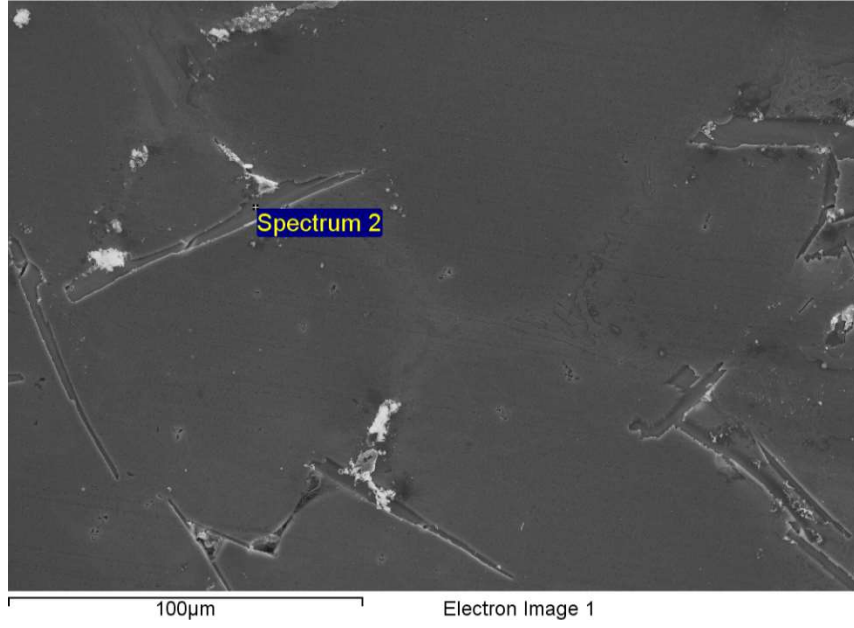
S2 numunesinin Şekil 5.56 'daki EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunu AlSi_6FeZn , metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerin oluşturduğu belirlenmiştir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.70	2.85
Mg K	0.08	0.08
Al K	95.53	95.36
Si K	0.93	0.90
Ca K	0.21	0.13
Ti K	0.22	0.12
Cr K	0.23	0.12
Cu L	0.37	0.16
Zn L	0.54	0.23
Sn L	0.19	0.05
Totals	100.00	

Şekil 5.57. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

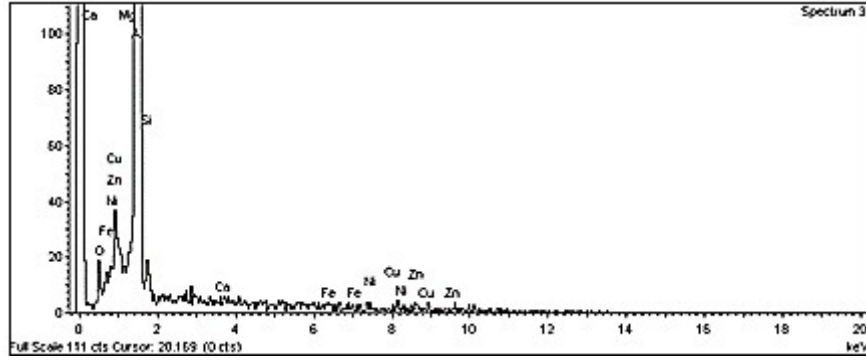
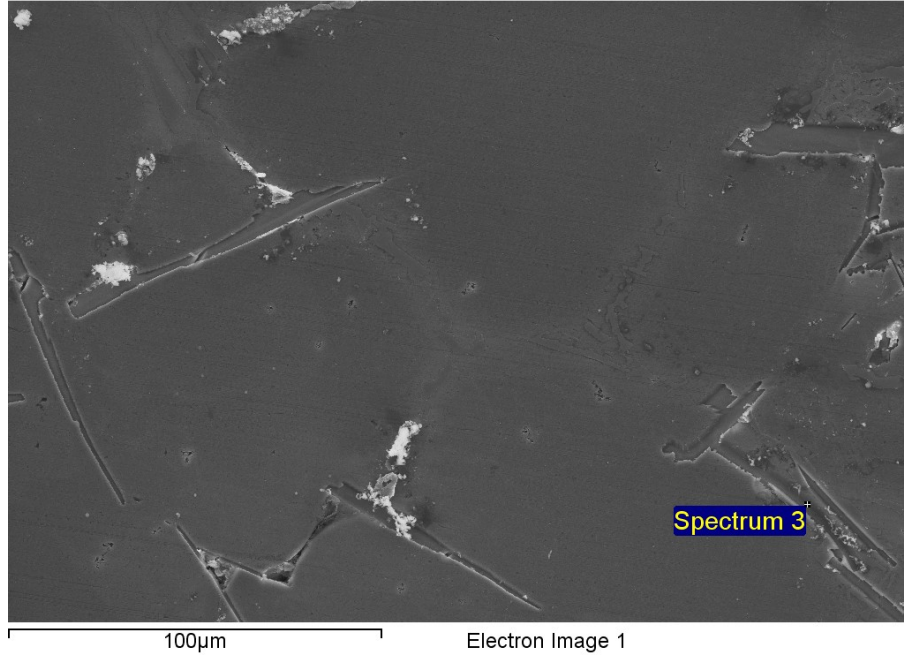
Şekil 5.57 'deki X500 büyütmede S2 numunesine ait EDX resminde görülen ve 1 numaralı noktasal analize göre bölgenin AlSi, metal ve ametal oksitler ve az miktarda (% 1 değerinin altında olduğu için) diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
Al K	56.15	66.60
Si K	15.08	17.18
P K	0.10	0.09
Mn K	1.41	0.81
Fe K	24.30	13.94
Ni K	1.18	0.65
Cu L	0.56	0.28
Zn L	0.47	0.23
Sn L	0.52	0.15
Sb L	0.23	0.07
Totals	100.00	

Şekil 5.58. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

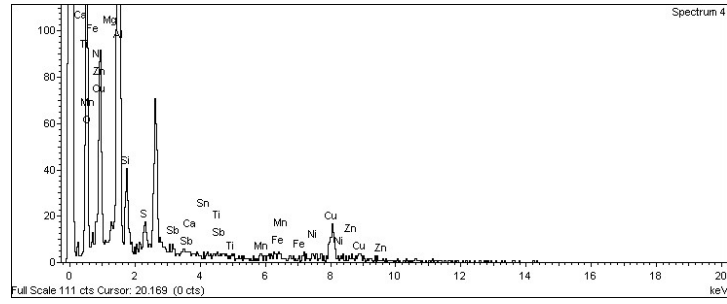
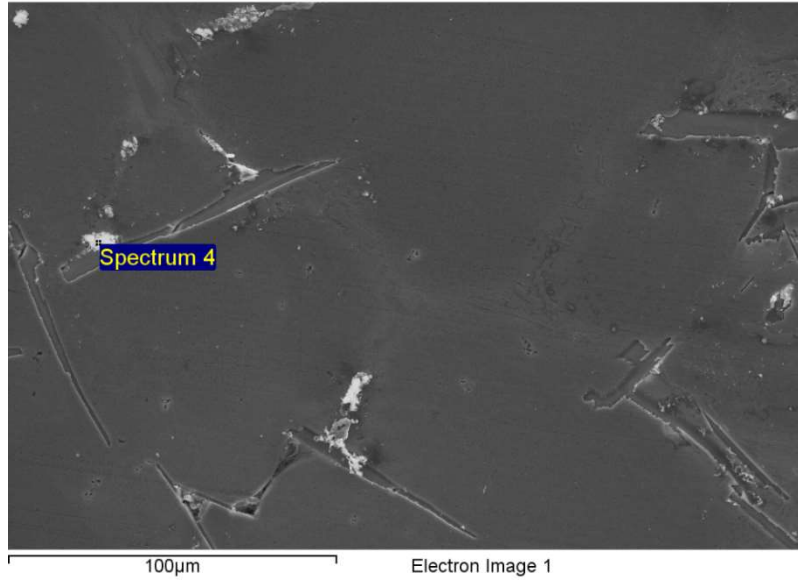
X500 büyütmede S2 numunesine ait Şekil 5.58 'deki EDX resminde 2 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin $\text{AlFe}_{24}\text{Si}_{15}\text{Mn}$ elementlerini ihtiva eden intermetalik bileşiklere ve diğer elementlerin meydana getirdiği bileşime sahip olduğu görülmüştür (ASM; Sreeja Kumari vd., 2007; Feyzullahoğlu vd., 2013).



Element	Weight%	Atomic%
O K	2.78	4.74
Mg K	0.17	0.18
Al K	90.64	91.44
Si K	1.51	1.47
Ca K	0.01	0.01
Fe K	0.60	0.29
Ni K	1.07	0.50
Cu L	2.31	0.99
Zn L	0.91	0.38
Totals	100.00	

Şekil 5.59. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

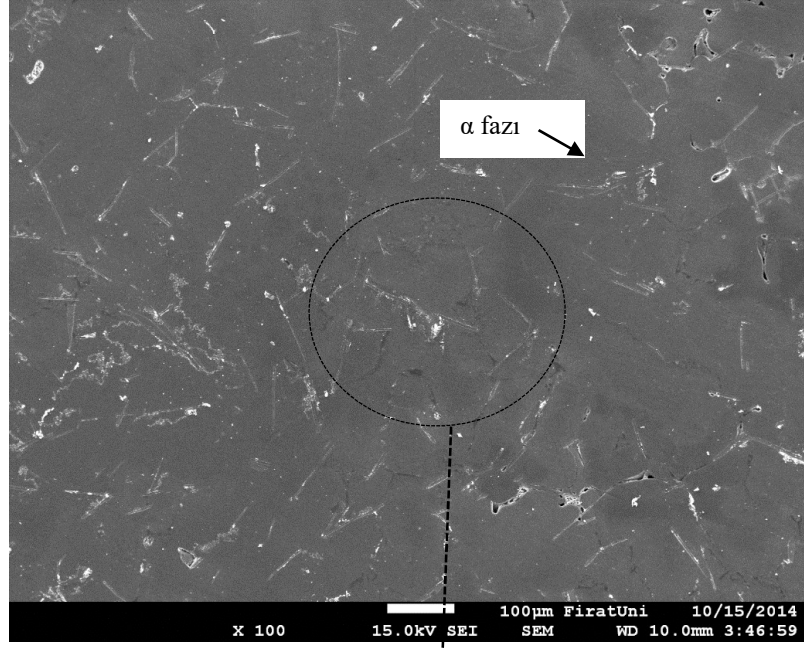
Şekil 5.59 'da X500 büyütmeli S2 numunesinin EDX resminde görülen 3 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin AlCu₂NiZn, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



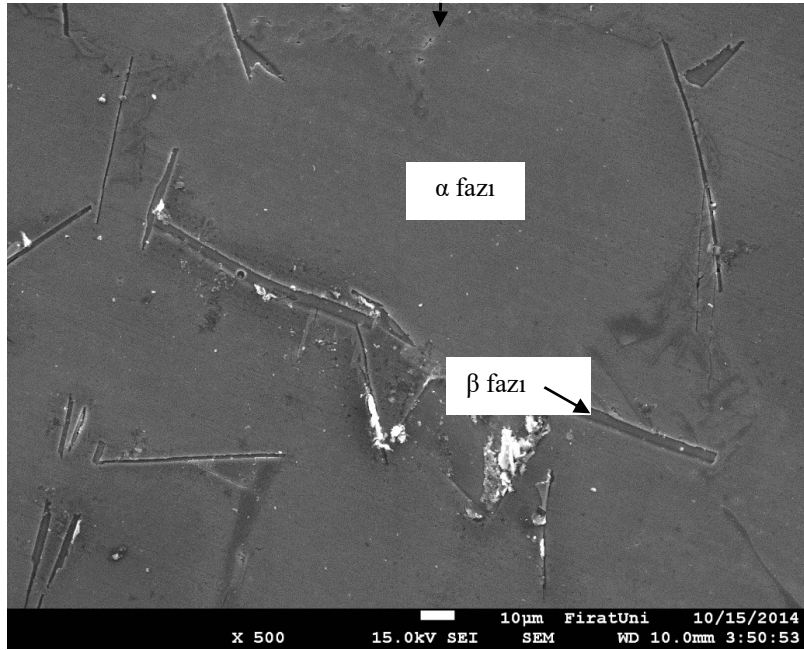
Element	Weight%	Atomic%
O K	27.41	45.02
Mg K	0.45	0.49
Al K	38.80	37.79
Si K	4.23	3.95
S K	1.76	1.44
Ca K	0.08	0.05
Ti K	0.54	0.30
Mn K	0.88	0.42
Fe K	1.04	0.49
Ni K	1.23	0.55
Cu L	20.48	8.47
Zn L	1.88	0.76
Sn L	0.61	0.13
Sb L	0.62	0.13
Totals	100.00	

Şekil 5.60. S2 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

X500 büyütmede S2 numunesine ait Şekil 5.60 'daki EDX resminde 4 numaralı noktasal analizde belirtilen bölgenin Al, Cu, Si, Zn ve S, metal ve ametal oksit bileşiklerinden oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca % 0,08 Ca elementinin varlığı intermetalik bileşiklerin varlığını da destekler niteliktedir.



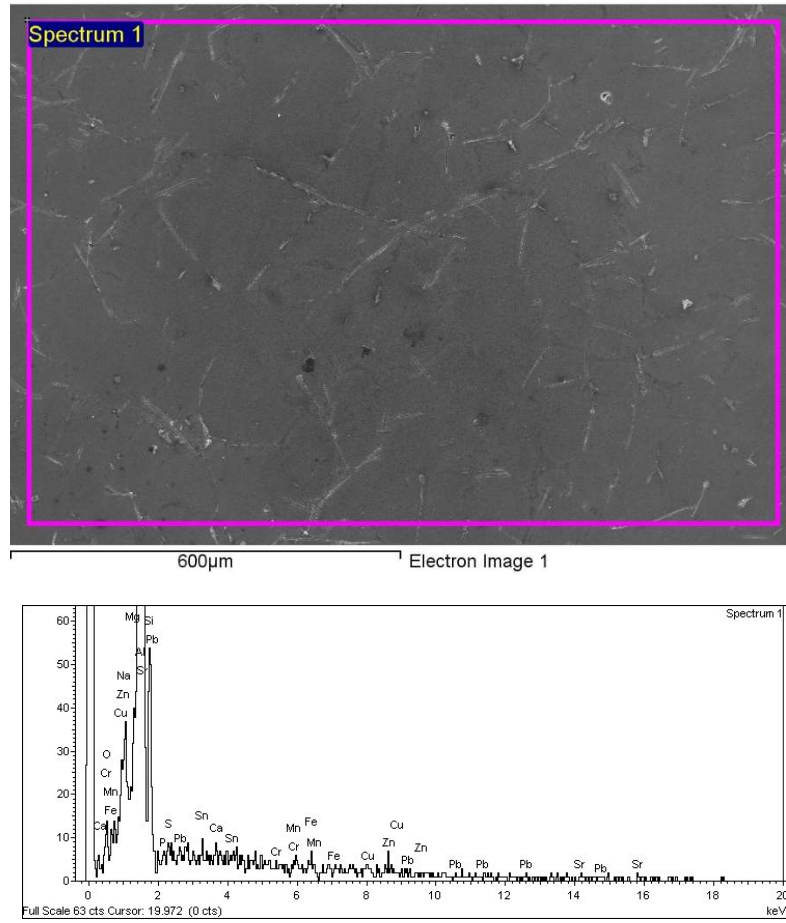
(a)



(b)

Şekil 5.61. S3 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

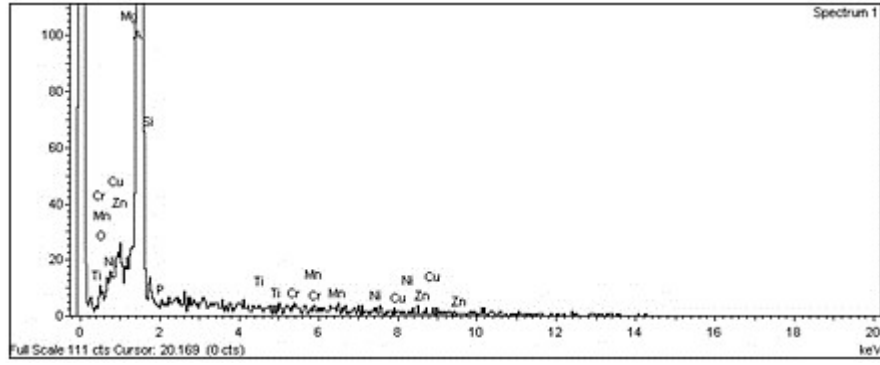
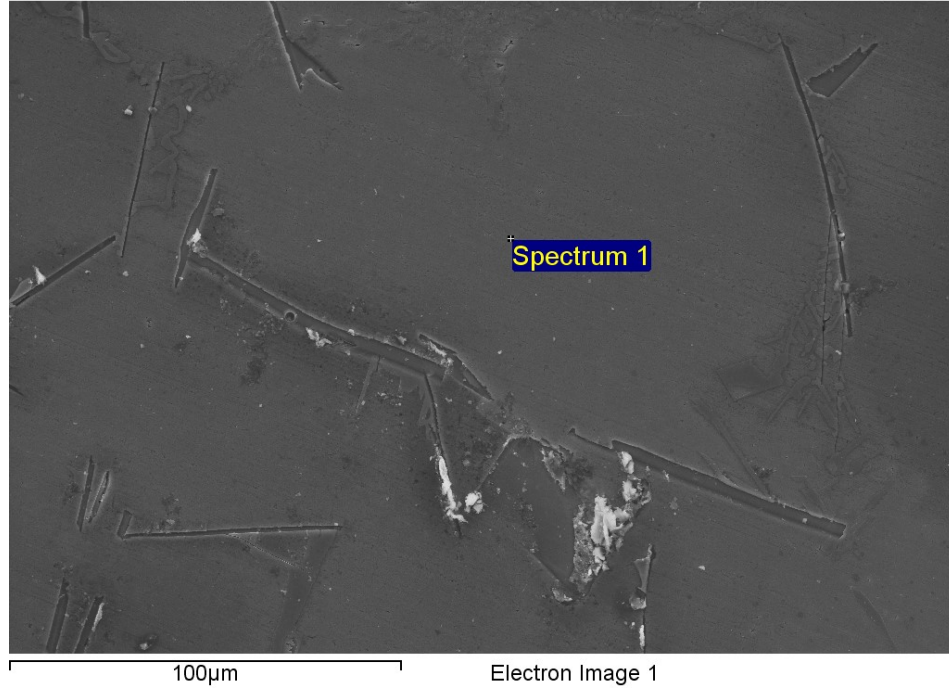
Şekil 5.61’de verilen S3 numunesinin X100 ve X500 büyütmeli SEM görüntülerine göre, yapının α -Al + Si, tane sınırlarında Si bileşenlerinden ve intermetaliklerden oluştuğu görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	3.40	5.71
Na K	0.56	0.65
Mg K	0.11	0.12
Al K	87.35	87.09
Si K	5.12	4.90
P K	0.09	0.08
S K	0.22	0.18
Ca K	0.01	0.01
Cr K	0.06	0.03
Mn K	0.30	0.15
Fe K	0.63	0.30
Cu K	0.68	0.29
Zn K	0.74	0.30
Sr L	0.34	0.11
Sn L	0.19	0.04
Pb M	0.22	0.03
Totals	100.00	

Şekil 5.62. S3 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

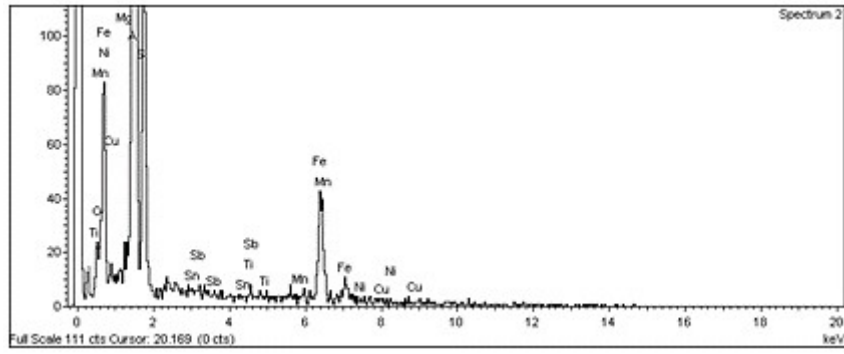
Şekil 5.62 'de X100 büyütme S3 numunesinin EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunun AlSi5, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden oluştuğu belirlenmiştir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.88	3.18
Mg K	0.03	0.03
Al K	93.73	94.30
Si K	0.92	0.88
P K	0.01	0.01
Ti K	0.20	0.12
Cr K	0.70	0.36
Mn K	0.45	0.23
Ni K	0.26	0.12
Cu L	0.85	0.37
Zn L	0.97	0.40
Totals	100.00	

Şekil 5.63. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

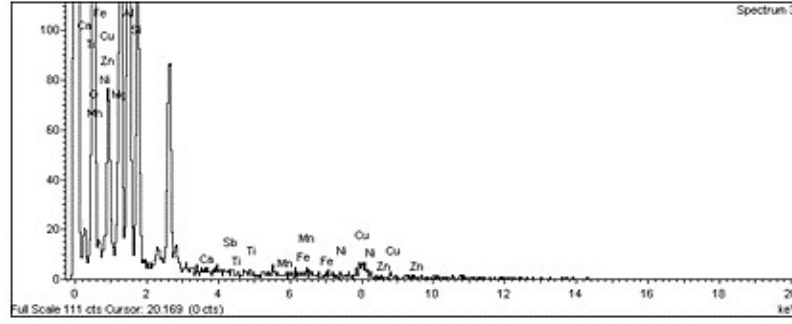
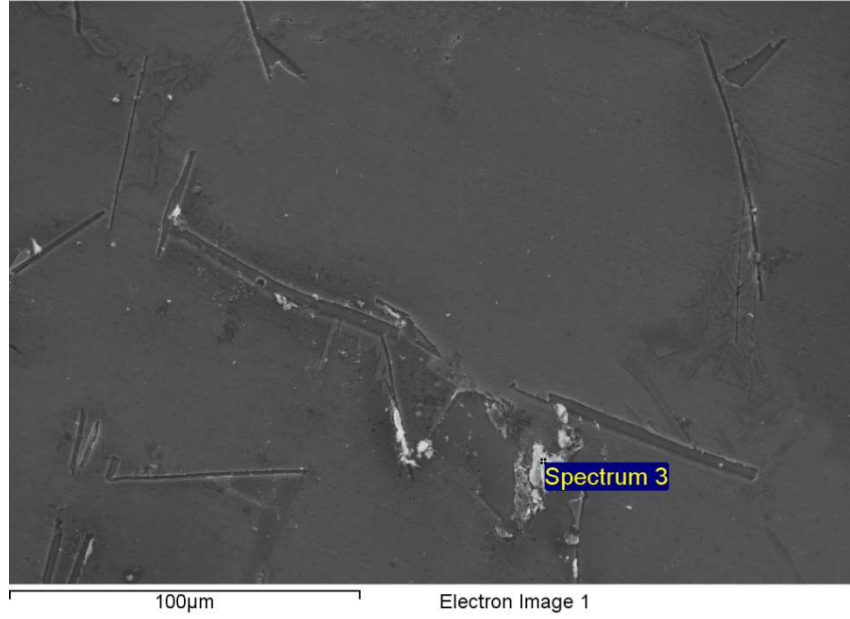
Şekil 5.63 'de S3 numunesinin X500 büyütmede EDX resminde görülen 1 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin α -Al + Si 'den oluştuğu görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.84	3.46
Mg K	0.09	0.11
Al K	61.79	69.31
Si K	13.99	15.08
Ti K	0.17	0.11
Mn K	0.89	0.49
Fe K	20.43	11.06
Ni K	0.27	0.14
Cu L	0.47	0.22
Sb L	0.06	0.02
Totals	100.00	

Şekil 5.64. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

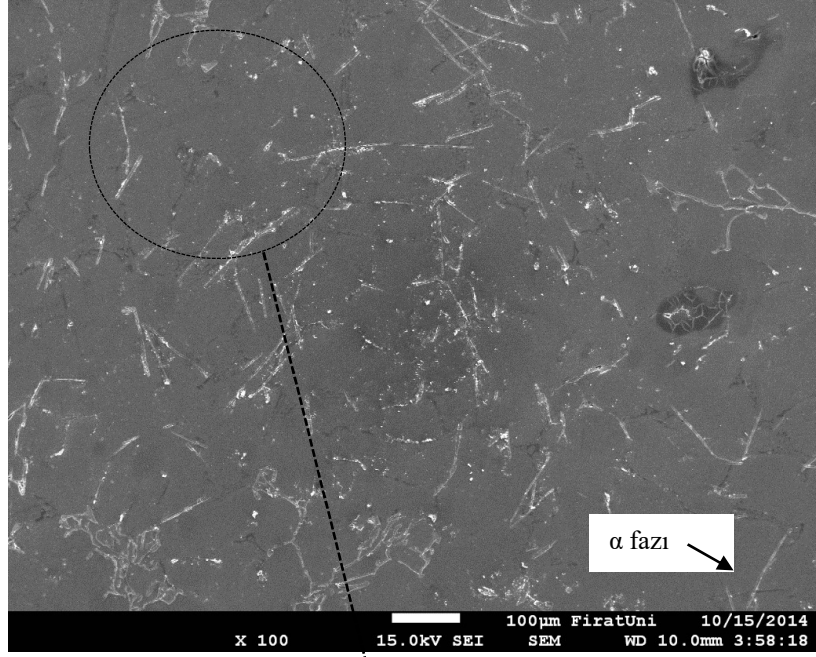
X500 büyütmede S3 numunesinin Şekil 5.64 ‘deki EDX resminde görülen 2 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin demirce zengin $\text{AlFe}_{20}\text{Si}_{14}\text{Mn}$ intermetaliklerinden oluştuğu görülmektedir (ASM; Feyzullahoğlu vd., 2013).



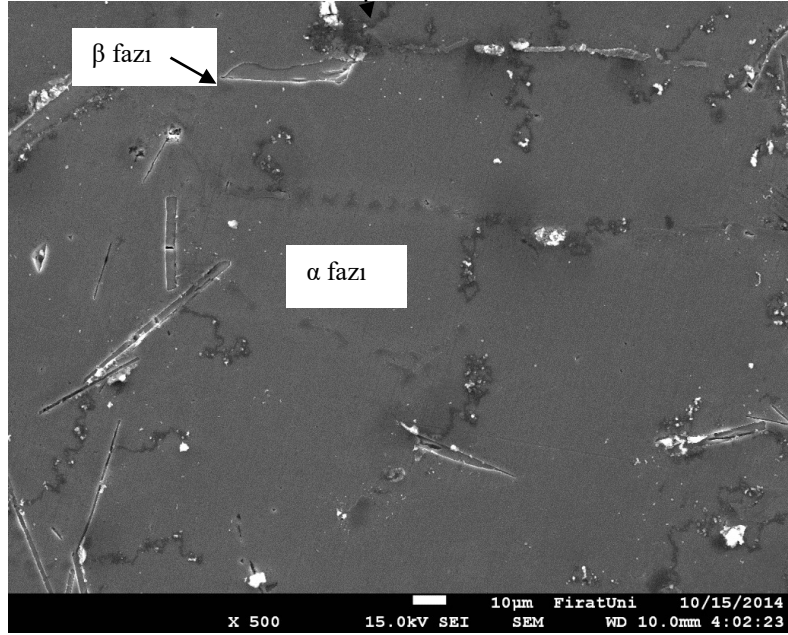
Element	Weight%	Atomic%
O K	55.80	71.30
Mg K	9.33	7.85
Al K	14.94	11.33
Si K	7.62	5.55
Ca K	0.10	0.05
Ti K	0.07	0.03
Mn K	0.14	0.05
Fe K	0.03	0.01
Ni K	0.02	0.01
Cu L	10.94	3.51
Zn L	0.88	0.28
Sb L	0.13	0.03
Totals	100.00	

Şekil 5.65. S3 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

Şekil 5.65 'de S3 numunesinin X500 büyütmede 3 numaralı noktasal analiz sonuçlarına göre bölgenin EDX resminde de görüldüğü gibi metal ve ametal oksit bileşiklerinden oluştuğu görülmektedir. Kolemanit bileşimindeki Ca elementinin miktarı da artmaktadır ki bu elementin artması intermetaliklerin gelişimi tetiklemektedir (Sreeja Kumari vd., 2007).



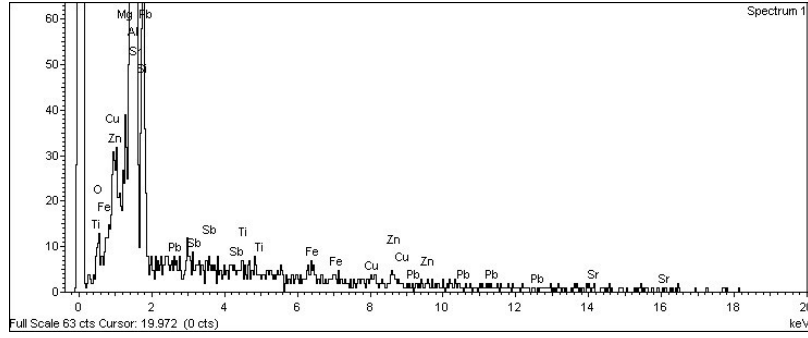
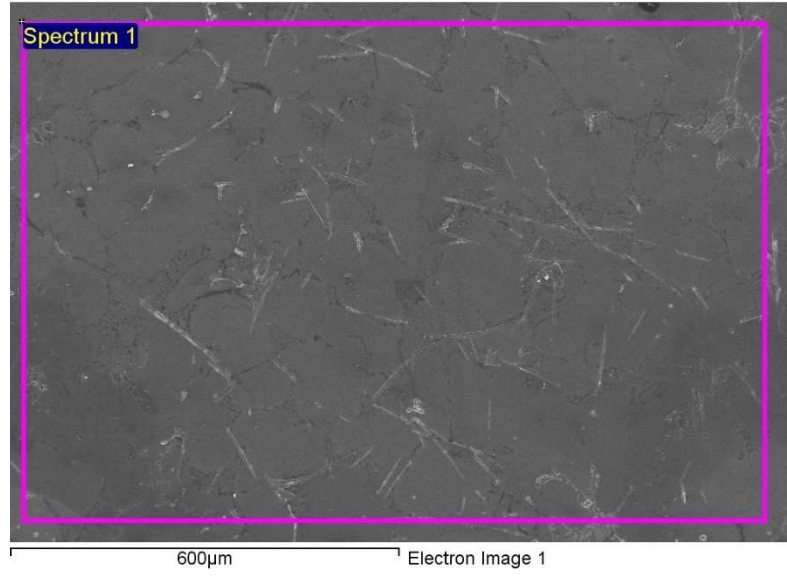
(a)



(b)

Şekil 5.66. S4 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

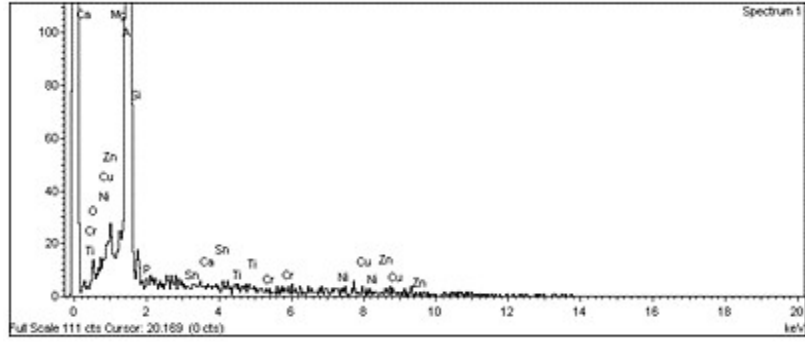
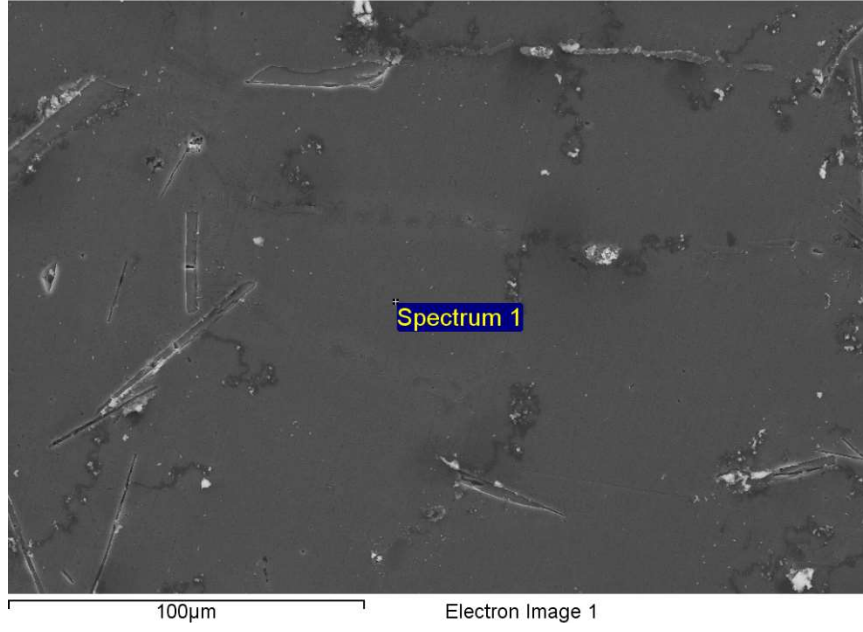
S4 numunesinin X100 ve X500 büyütmeli SEM görüntülerine göre, yapının α -Al + Si ve ayrıca tane sınırlarında Si bileşenleri ve intermetalikler görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.80	3.08
Mg K	0.47	0.53
Al K	86.71	87.97
Si K	7.19	7.01
Ti K	0.01	0.00
Fe K	0.34	0.17
Cu K	0.68	0.29
Zn K	1.43	0.60
Sr L	0.79	0.25
Sb L	0.25	0.06
Pb M	0.32	0.04
Totals	100.00	

Şekil 5.67. S4 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

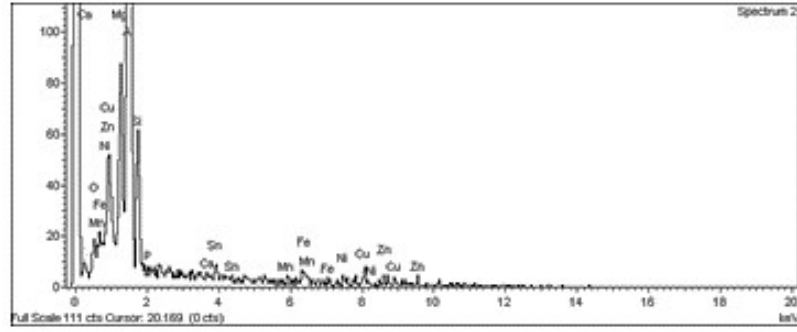
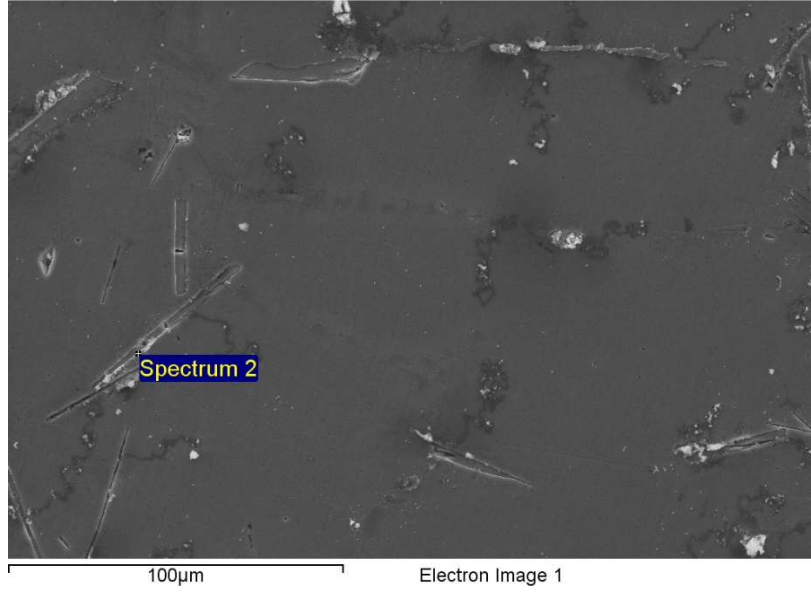
S4 numunesinin Şekil 5.67 'deki EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunun AlSi7Zn, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden oluşturduğu belirlenmiştir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	2.04	3.46
Mg K	0.35	0.38
Al K	92.40	93.06
Si K	1.37	1.33
P K	0.36	0.31
Ca K	0.08	0.05
Ti K	0.01	0.01
Cr K	0.00	0.00
Ni K	0.87	0.41
Cu L	0.84	0.37
Zn L	1.31	0.54
Sn L	0.37	0.08
Totals	100.00	

Şekil 5.68. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

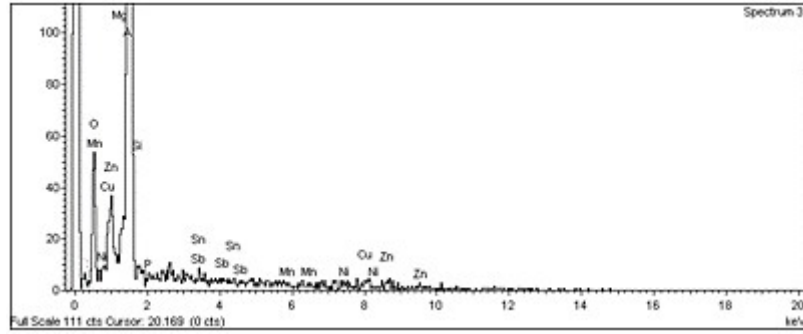
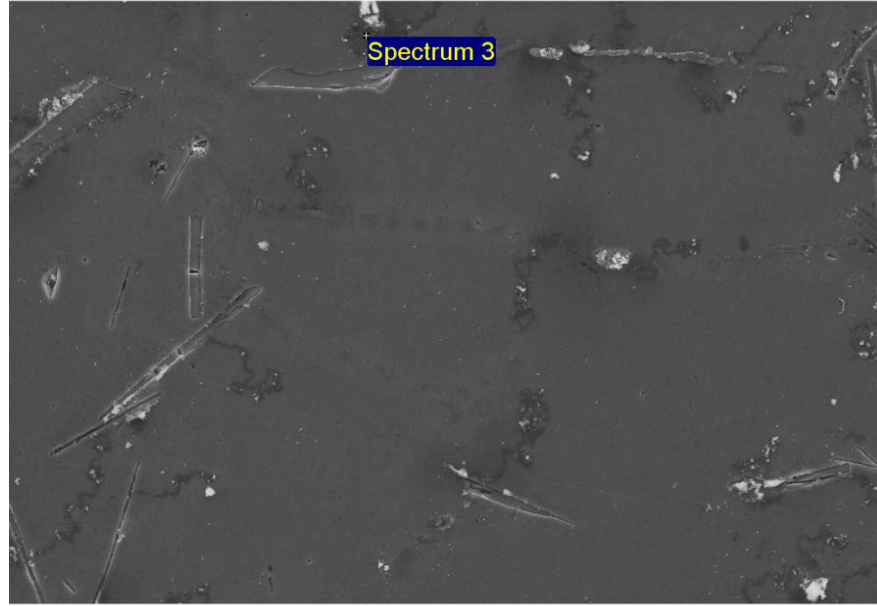
Şekil 5.68 'deki X500 büyütmede S4 numunesine ait EDX resminde görülen ve 1 numaralı noktasal analize göre bölgenin (matrisin) AlSiZn, oksitler ve diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	2.58	4.51
Mg K	3.32	3.81
Al K	78.67	81.47
Si K	6.03	5.98
P K	0.07	0.07
Ca K	0.10	0.07
Mn K	0.15	0.08
Fe K	2.07	1.04
Ni K	0.05	0.02
Cu L	4.83	2.13
Zn L	1.62	0.69
Sn L	0.51	0.13
Totals	100.00	

Şekil 5.69. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

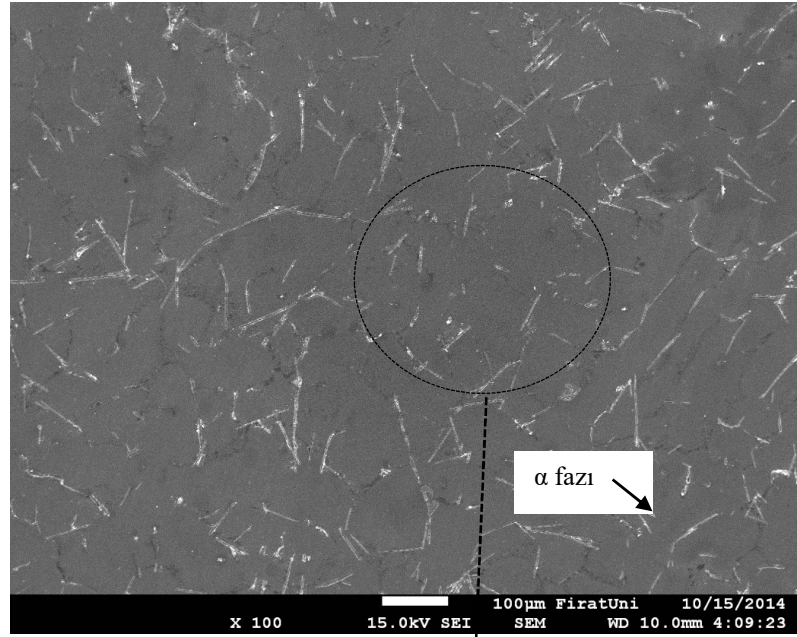
S4 numunesine ait Şekil 5.69 'daki X500 büyütmede EDX resminde görülen ve 2 numaralı iğnemsı bölgeden alınan noktasal analize göre buranın $\text{AlSi}_6\text{Cu}_5\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Zn}_2$, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden meydana geldiği görülmektedir.



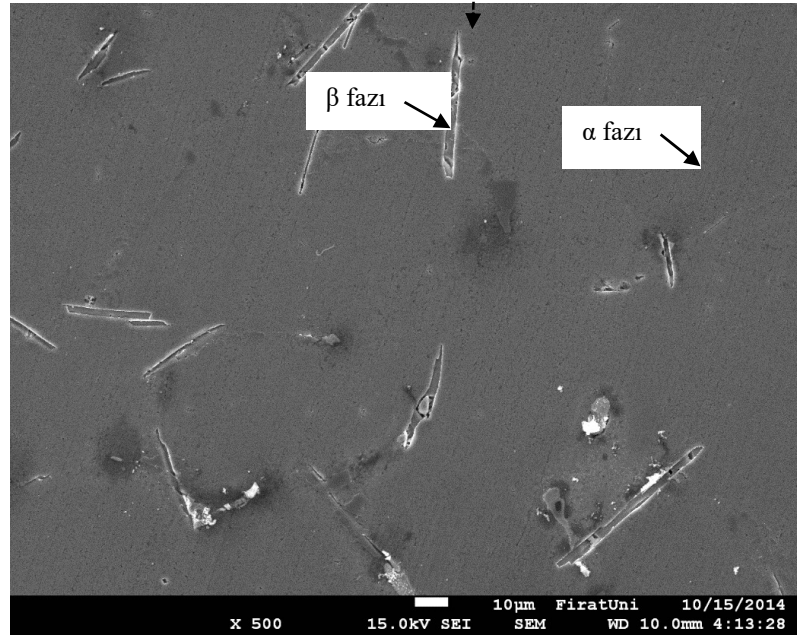
Element	Weight%	Atomic%
O K	12.31	19.75
Mg K	0.14	0.14
Al K	81.39	77.39
Si K	0.50	0.44
P K	0.26	0.22
Mn K	0.20	0.09
Ni K	0.50	0.22
Cu L	1.79	0.74
Zn L	2.22	0.87
Sn L	0.51	0.11
Sb L	0.18	0.03
Totals	100.00	

Şekil 5.70. S4 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

Şekil 5.70 'de X500 büyütmede S4 numunesine ait EDX resminde görülen ve 3 numaralı noktasal analize göre bölgenin $AlZn_2Cu_2$, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden oluştuğu görülmektedir.



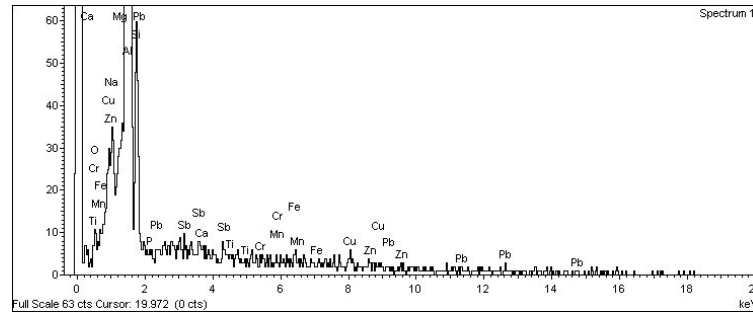
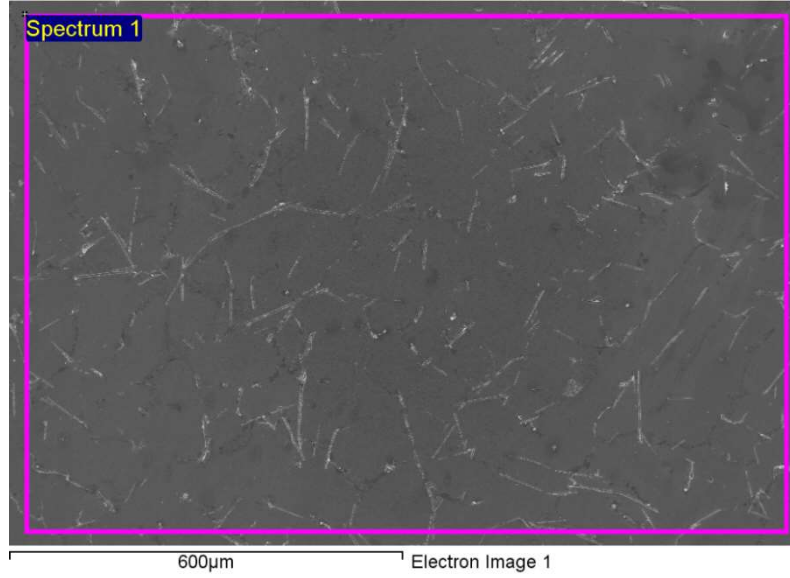
(a)



(b)

Şekil 5.71. S5 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

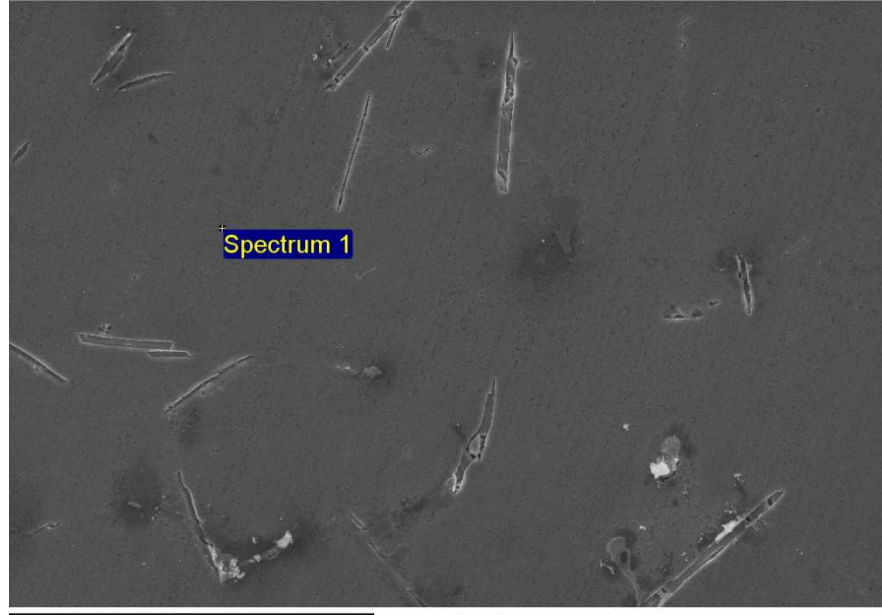
X100 ve X500 büyütme S5 numunesinin SEM görüntülerine göre, yapının α -Al + Si, tane sınırlarında Si bileşenlerinden ve intermetaliklerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca yapıda tane incelmesi görülmektedir (Uludağ, 2011).



Element	Weight%	Atomic%
O K	1.50	2.57
Na K	0.29	0.34
Mg K	0.14	0.16
Al K	88.50	89.84
Si K	5.70	5.56
P K	0.05	0.04
Ca K	0.13	0.09
Ti K	0.12	0.07
Cr K	0.15	0.08
Mn K	0.07	0.03
Fe K	0.38	0.18
Cu K	1.17	0.50
Zn K	0.81	0.34
Sb L	0.52	0.12
Pb M	0.48	0.06
Totals	100.00	

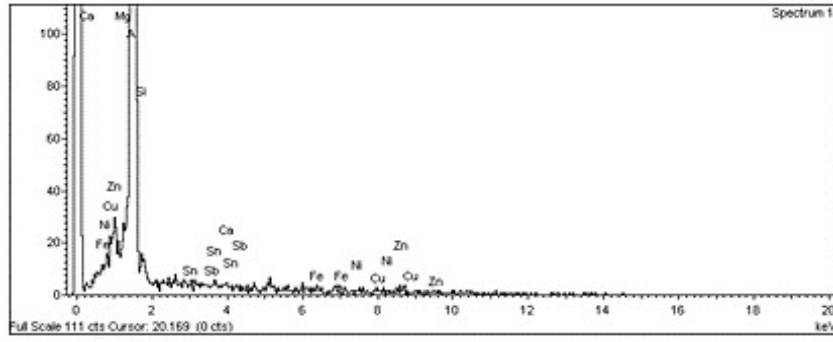
Şekil 5.72. S5 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

Şekil 5.72 'de X100 büyütme S5 numunesinin EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunun AlSi6Cu, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden oluştuğu belirlenmiştir.



100µm

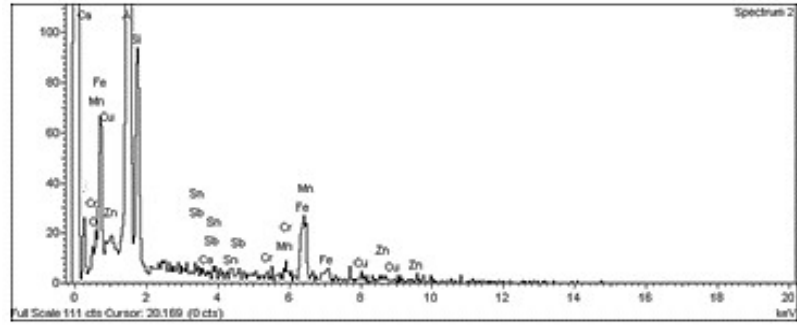
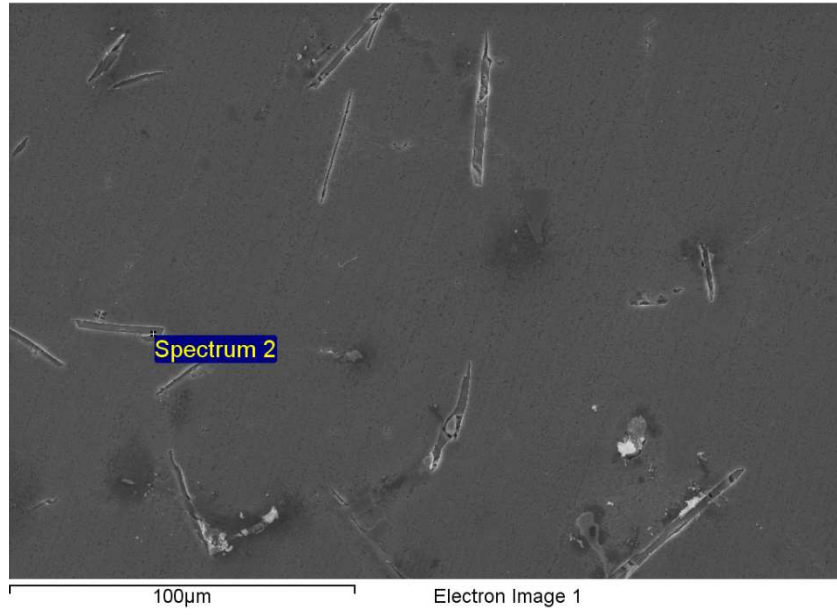
Electron Image 1



Element	Weight%	Atomic%
Mg K	0.29	0.32
Al K	95.39	97.18
Si K	1.04	1.03
Ca K	0.33	0.22
Fe K	0.69	0.34
Ni K	0.65	0.31
Cu L	0.25	0.10
Zn L	0.99	0.42
Sn L	0.15	0.03
Sb L	0.22	0.05
Totals	100.00	

Şekil 5.73. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

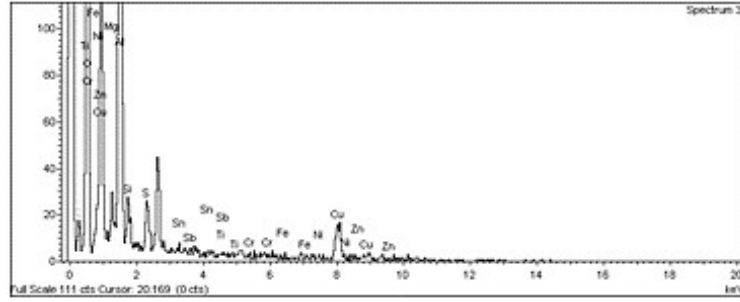
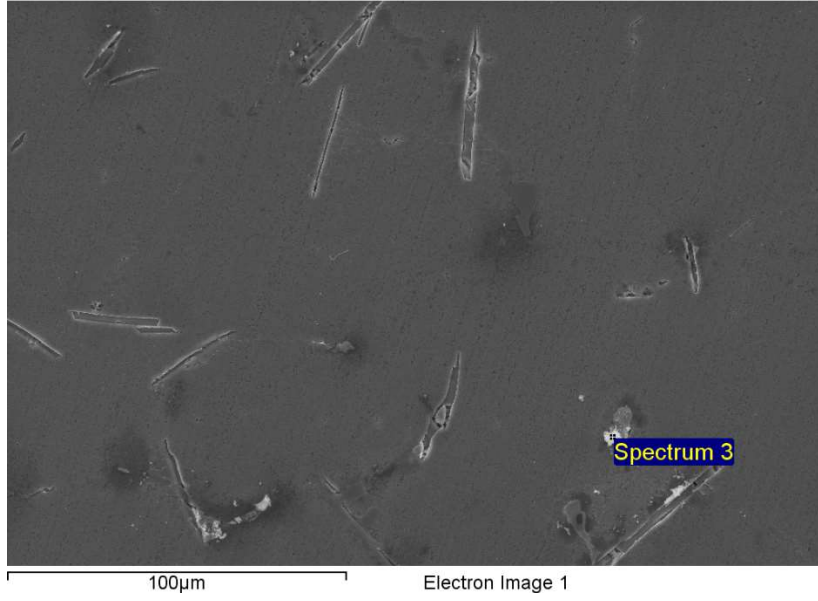
Şekil 5.73 'de S5 numunesinin X500 büyütmede EDX resminde görülen 1 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin α -Al + Si 'den oluştuğu görülmektedir. Kolemanit miktarının artmasıyla Ca oranı da yükselmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	2.50	4.59
Al K	70.74	76.83
Si K	9.42	9.83
Ca K	0.17	0.13
Cr K	0.24	0.13
Mn K	1.55	0.83
Fe K	13.20	6.92
Cu L	0.59	0.27
Zn L	0.45	0.19
Sn L	0.45	0.11
Sb L	0.69	0.17
Totals	100.00	

Şekil 5.74. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

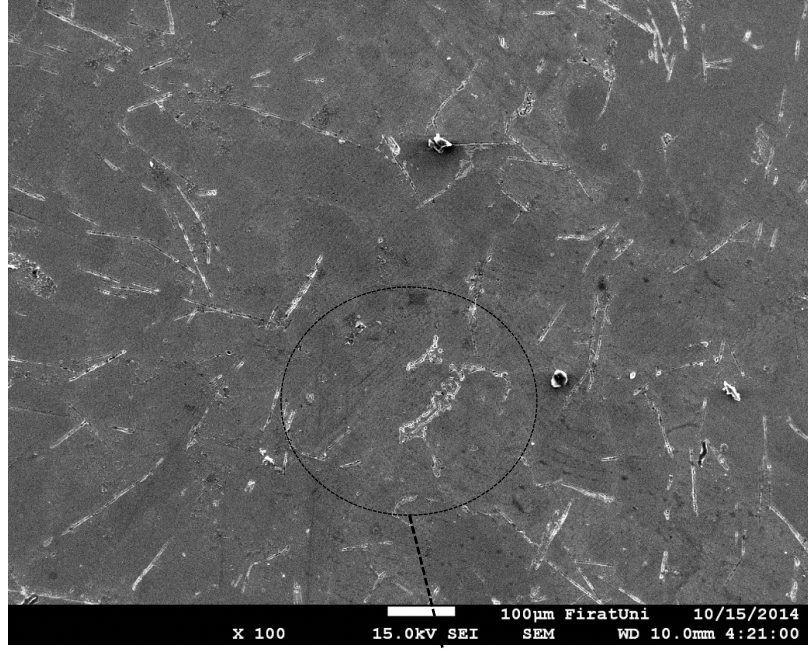
X500 büyütmede S5 numunesinin Şekil 5.74 ‘deki EDX resminde görülen 2 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin demirce zengin $\text{AlFe}_{13}\text{Si}_{10}\text{Mn}$ intermetaliklerinden oluştuğu görülmektedir.



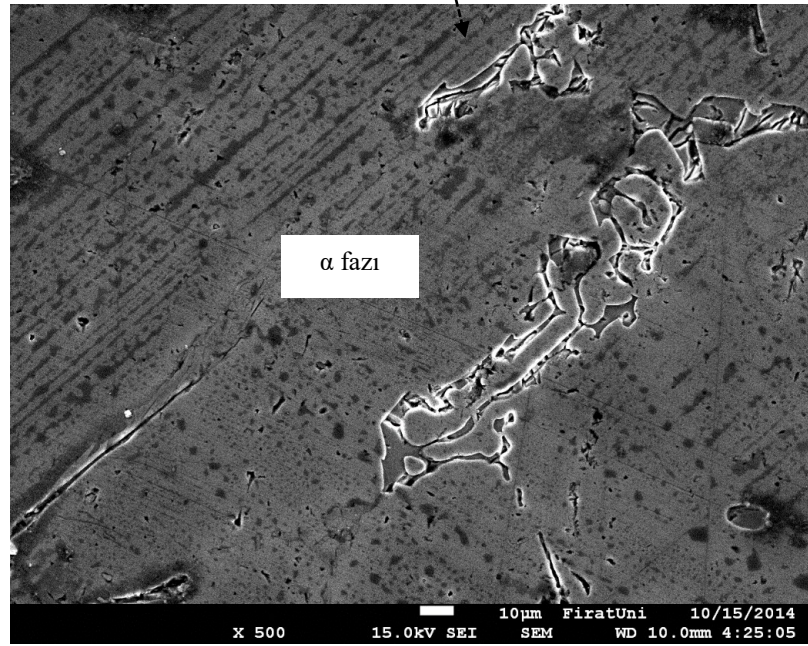
Element	Weight%	Atomic%
O K	44.81	65.16
Mg K	1.20	1.15
Al K	25.30	21.82
Si K	1.56	1.29
S K	1.93	1.40
Ti K	0.08	0.04
Cr K	0.09	0.04
Fe K	0.35	0.15
Ni K	0.13	0.05
Cu L	23.11	8.47
Zn L	0.92	0.33
Sn L	0.28	0.05
Sb L	0.24	0.05
Totals	100.00	

Şekil 5.75. S5 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

S5 numunesine ait Şekil 5.75 'deki X500 büyütmede EDX resminde 3 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin, yapıdaki elementlerin oksitlerle oluşturduğu metalik bileşiklerden ve AlCu24SSiMg bileşiminden oluştuğu düşünülmektedir.



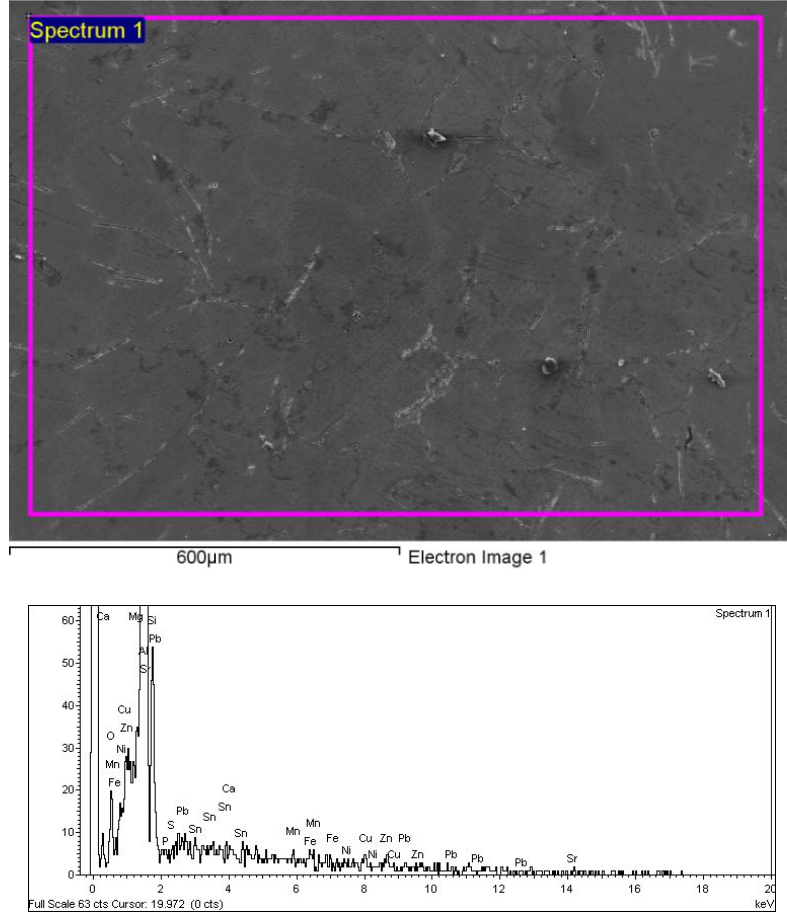
(a)



(b)

Şekil 5.76. S6 numunesinin SEM görüntüleri, (a) X 100 ve (b) X 500

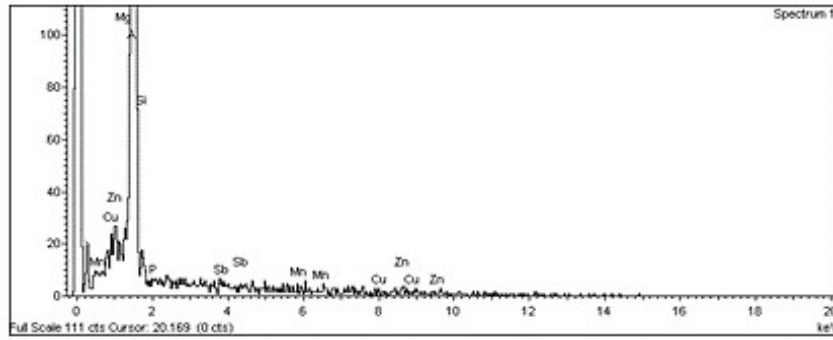
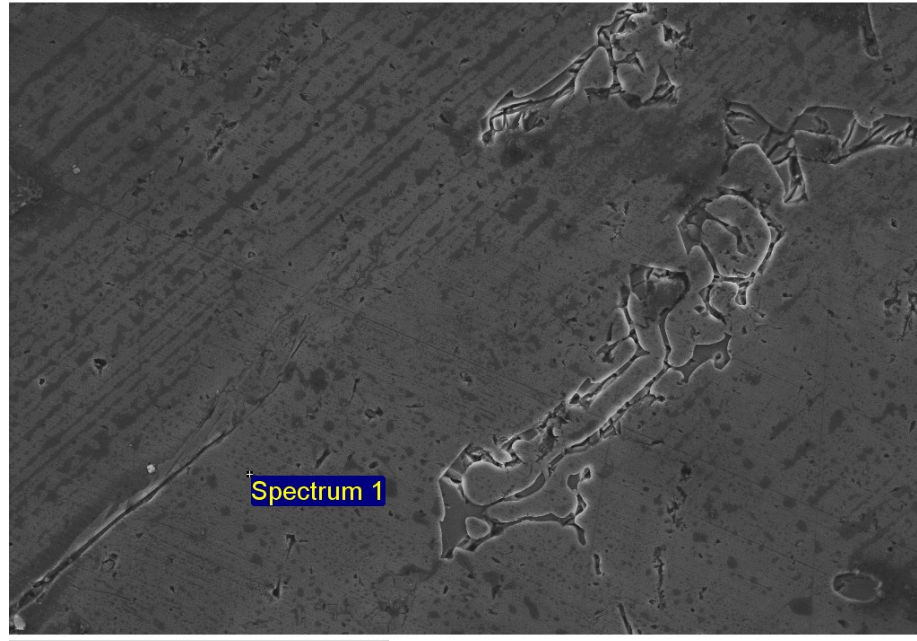
S6 numunesinin X100 ve X500 büyütmeli SEM görüntülerine göre, yapının α -Al + Si ve bu yapı içerisine dağılmış intermetalikler bileşikler ve yine tane sınırlarında Si bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
O K	2.98	5.03
Mg K	0.17	0.19
Al K	87.87	88.04
Si K	5.43	5.23
P K	0.05	0.04
S K	0.05	0.04
Ca K	0.13	0.09
Mn K	0.17	0.08
Fe K	0.58	0.28
Ni K	0.15	0.07
Cu K	0.91	0.39
Zn K	0.77	0.32
Sr L	0.55	0.17
Sn L	0.04	0.01
Pb M	0.16	0.02
Totals	100.00	

Şekil 5.77. S6 numunesinin EDX bölgesel analiz sonuçları

Şekil 5.77 'de X100 büyütme S6 numunesinin EDX resminde görülen ve tüm alanı kapsayan yüzeyin bölgesel analiz sonucunda matris kompozisyonunun AlSi5Cu, metal ve ametal oksitler ve diğer elementlerden oluştuğu bir gerçektir.



Element	Weight%	Atomic%
Mg K	0.14	0.15
Al K	95.42	97.29
Si K	1.22	1.21
P K	0.04	0.03
Mn K	0.15	0.08
Cu L	1.09	0.48
Zn L	1.67	0.71
Sb L	0.23	0.05
Totals	100.00	

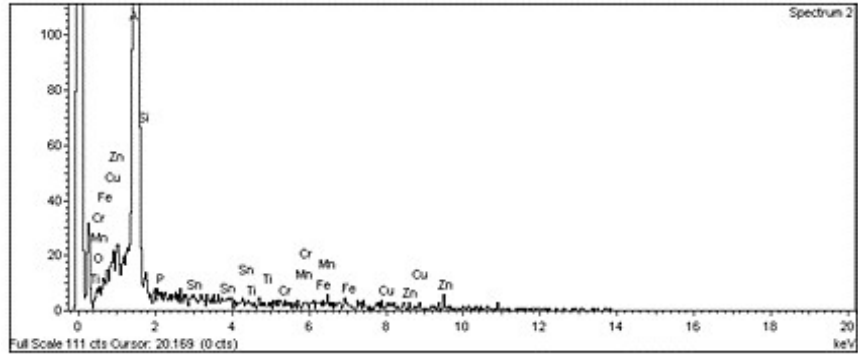
Şekil 5.78. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

S6 numunesinin X500 büyütmede Şekil 5.78 ‘deki EDX resminde görülen 1 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin α -Al + Si ve bu yapı içerisine dağılmış AlZnSiCu bileşimlerinden oluştuğu tespit edilmiştir.



100µm

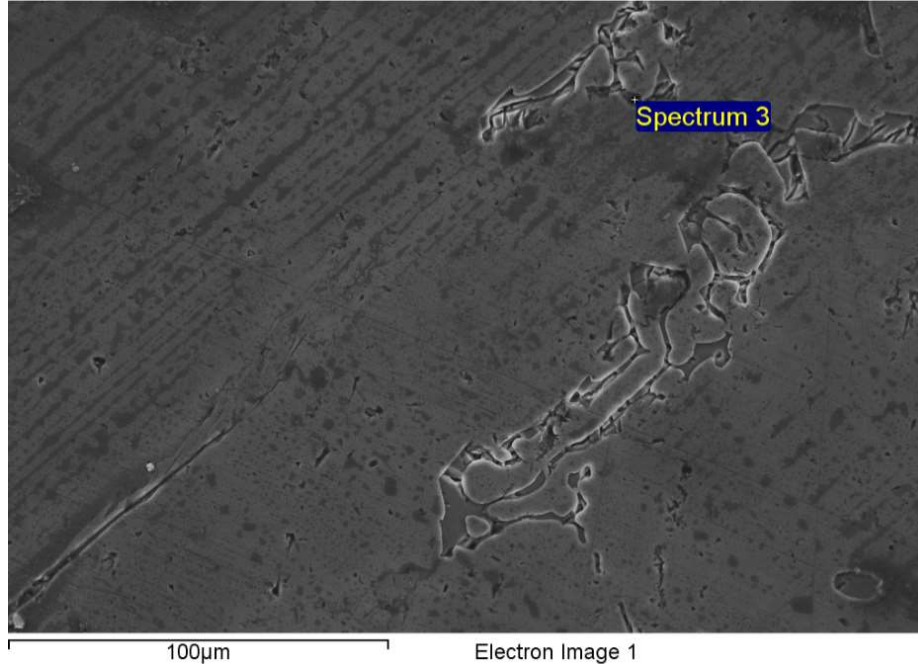
Electron Image 1



Element	Weight%	Atomic%
O K	0.56	0.95
Al K	95.45	96.79
Si K	0.84	0.82
P K	0.17	0.16
Ti K	0.00	0.00
Cr K	0.23	0.12
Mn K	0.36	0.17
Fe K	0.03	0.02
Cu L	0.69	0.30
Zn L	1.55	0.64
Sn L	0.12	0.03
Totals	100.00	

Şekil 5.79. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

Şekil 5.79 'da S6 numunesinin X500 büyütmedeki EDX resminde görülen 2 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin yine aynı şekilde α -Al + Si ve içerisine dağılmış AlZn₂ bileşiminden, diğer element ve bileşikler oluştuğu görülmektedir (ASM).



Element	Weight%	Atomic%
O K	18.41	28.59
Mg K	0.16	0.16
Al K	72.44	66.69
Si K	1.62	1.44
P K	0.24	0.19
Ca K	0.24	0.16
Ti K	0.29	0.16
Mn K	0.08	0.03
Fe K	0.57	0.25
Ni K	0.31	0.13
Cu L	4.48	1.76
Zn L	1.16	0.44
Totals	100.00	

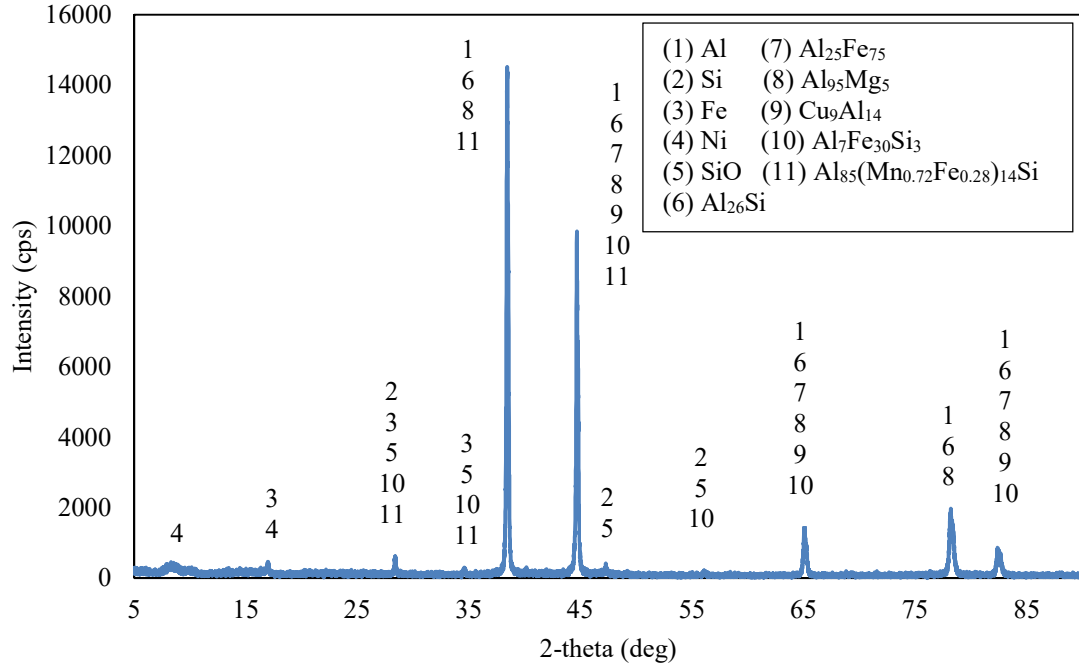
Şekil 5.80. S6 numunesinin EDX noktasal analiz sonuçları

S6 numunesinin X500 büyütmede Şekil 5.80 ‘deki EDX resminde görülen 3 numaralı noktasal analiz sonucunda bölgenin α -Al + Si ’den ve bunun içerisinde AlCu₅SiZn bileşiminden, metal ve ametal oksit bileşiklerden oluştuğu tespit edilmiştir.

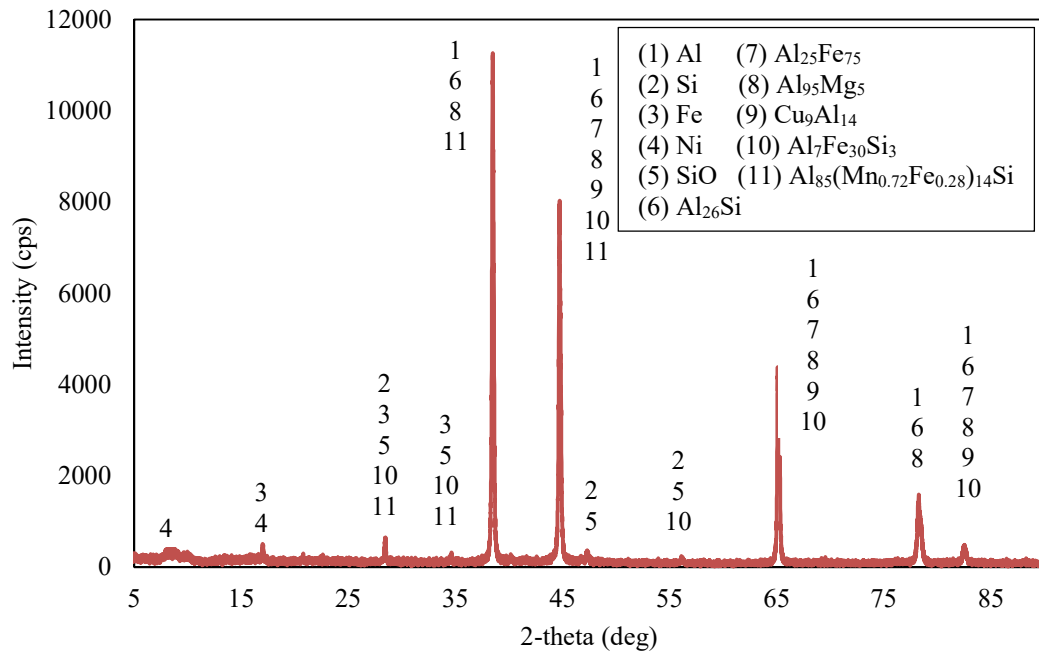
Matrisi oluşturan Al, Si, Cu, Fe, Zn, Mg, Mn, Ni, Sn, Ti, Cr, Sb, P ve kolemanit katkısıyla Ca, Sr, S, Na elementlerinin homojen bir dağılım gösterdiği SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Matris malzemesine ilave edilen kolemanit miktarının artmasıyla mikroyapı analizlerinde istenilen sonuçlara ulaşıldığı düşünülmektedir.

5.7. X-Işını Kırınımı (XRD) Sonuçları

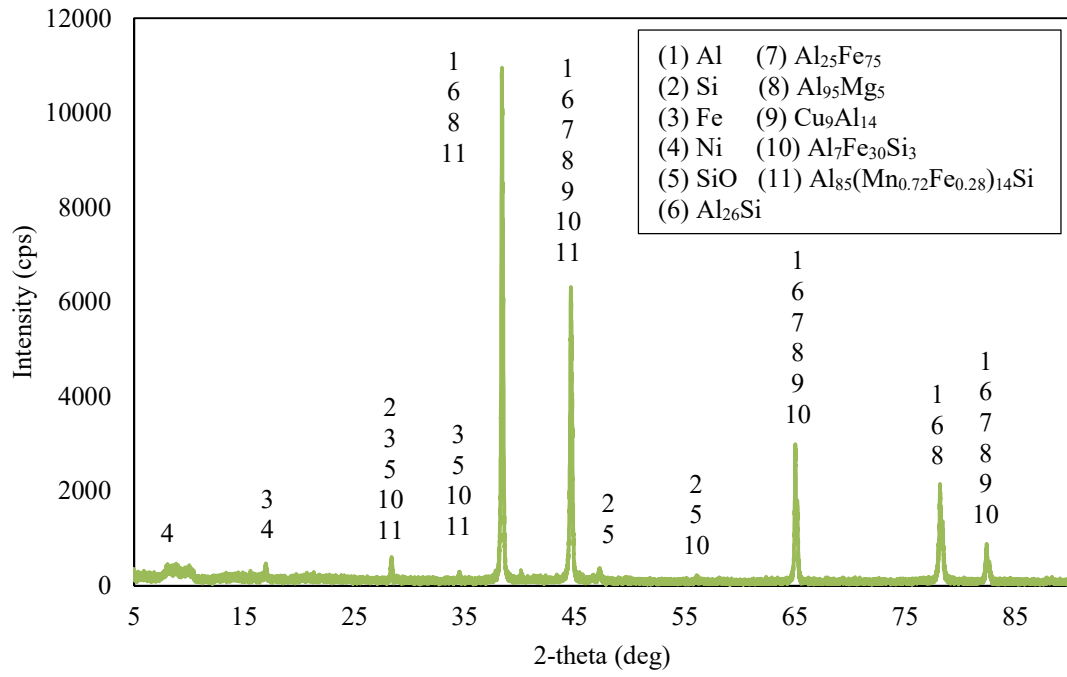
Şekil 5.81 – Şekil 5.87 'de kolemanit oranları farklı olarak üretilen deney numunelerinden elde edilen X-Işını kırınımı (XRD) sonuçları verilmiştir.



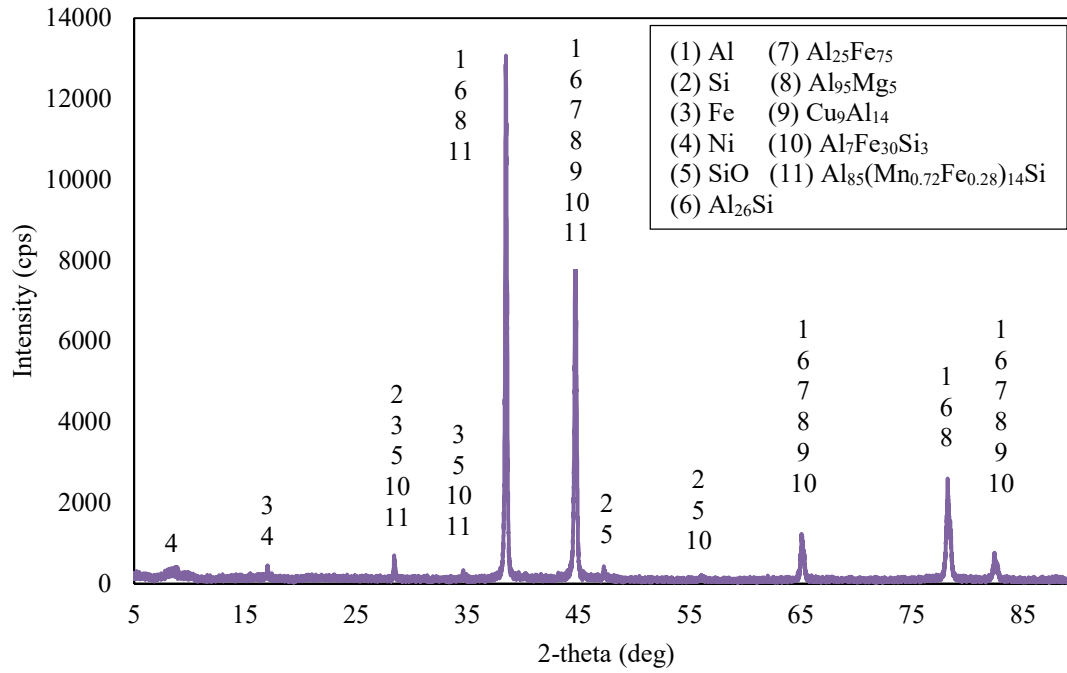
Şekil 5.81. SR numunesinin XRD analizi



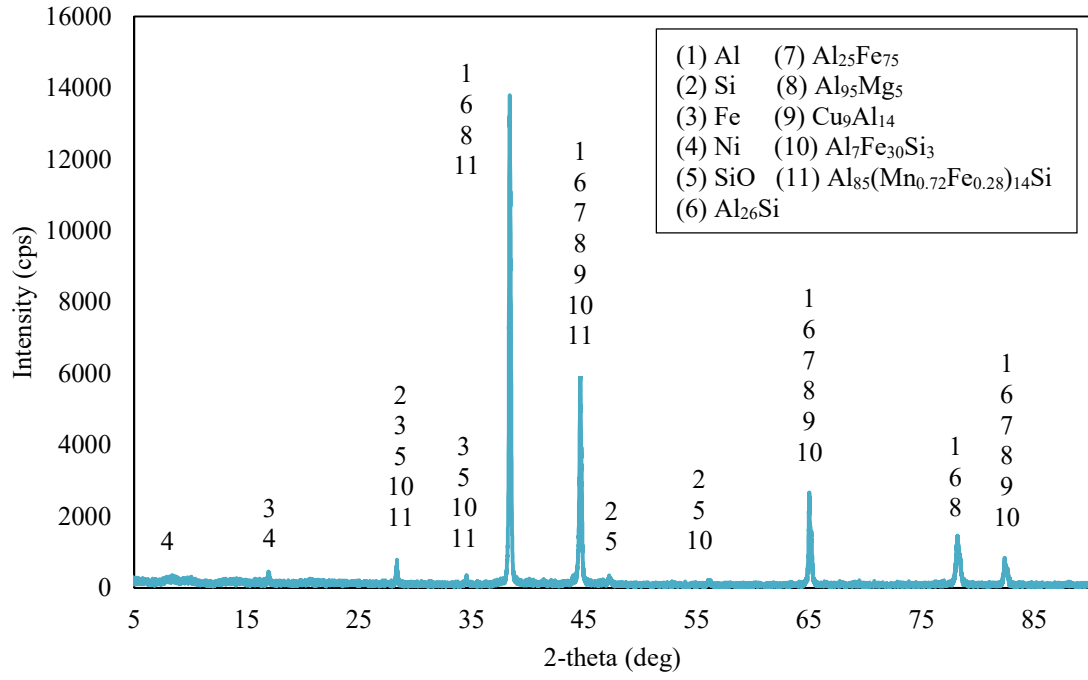
Şekil 5.82. S1 numunesinin XRD analizi



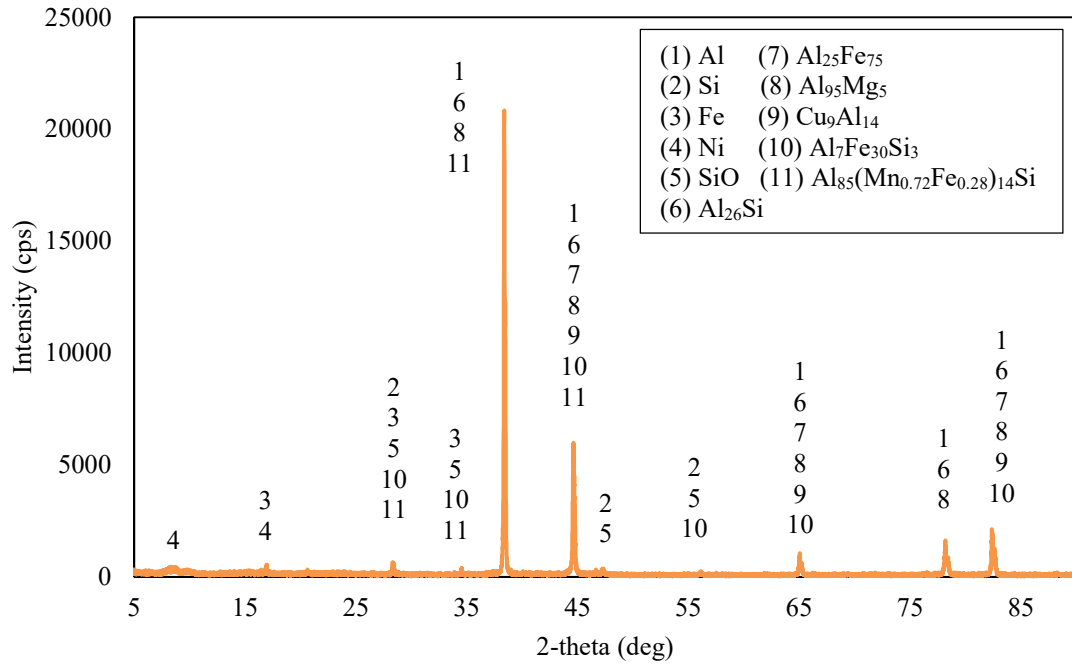
Şekil 5.83. S2 numunesinin XRD analizi



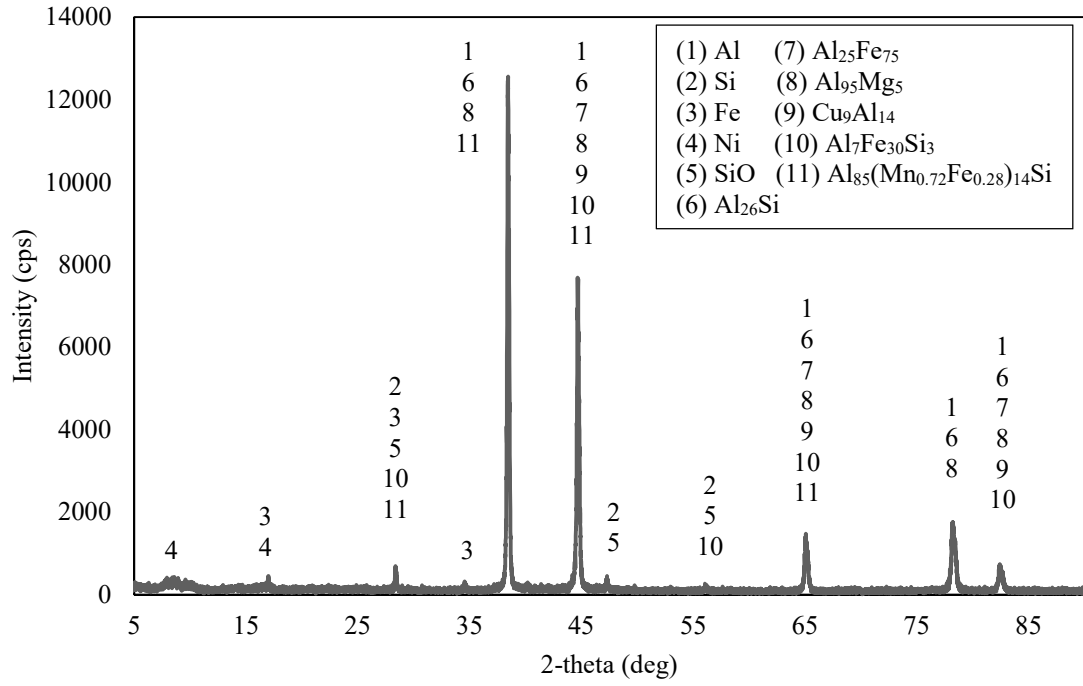
Şekil 5.84. S3 numunesinin XRD analizi



Şekil 5.85. S4 numunesinin XRD analizi

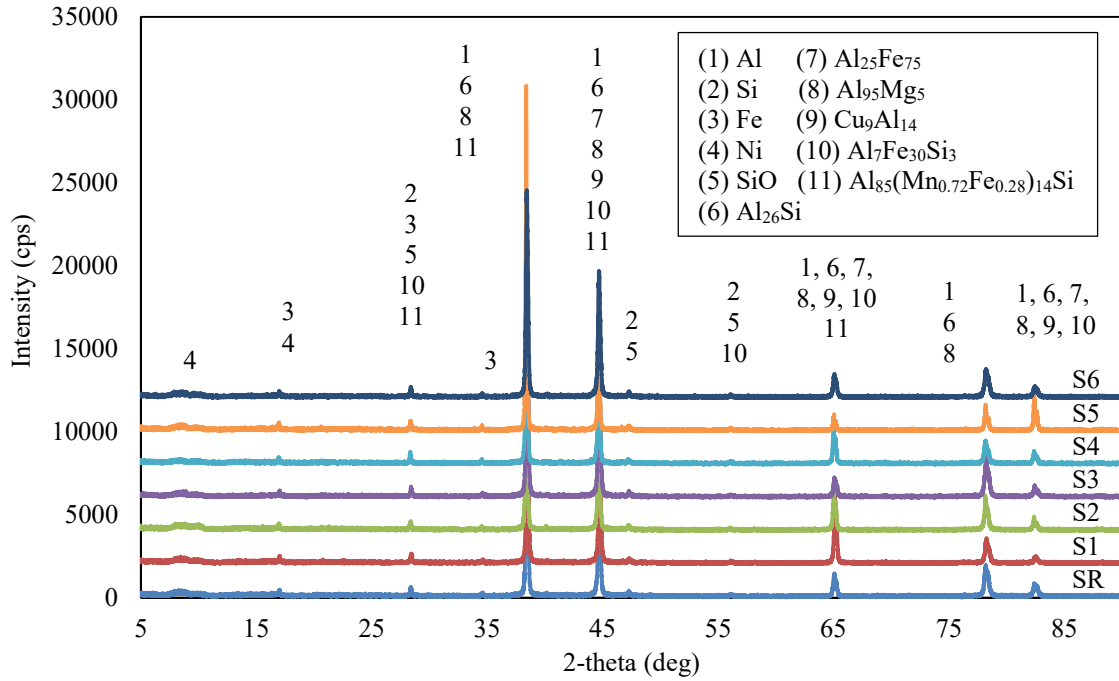


Şekil 5.86. S5 numunesinin XRD analizi



Şekil 5.87. S6 numunesinin XRD analizi

Tüm numunelerin X-Işını kırınımı (XRD) analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve kolemanit etkisinin anlaşılması amacıyla Şekil 5.88 'de tek bir grafikte verilmiştir.



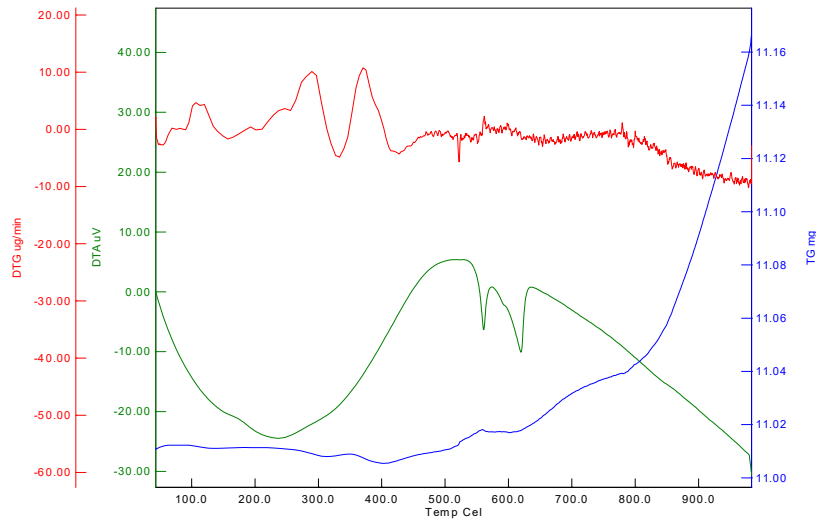
Şekil 5.88. Deney numunelerinin XRD analizleri

XRD incelemeleri sonucunda deney numunelerinde matrisin alüminyumdan meydana geldiği için aynı 2θ açılarında Al piki en yüksek değeri vermiştir. Daha sonra malzemede kütlece fazla olan silisyum, demir ve nikel pikleri görülmektedir. Deney numunelerindeki diğer elementlerin oranı çok düşük olduğundan keskin bir pik görülememektedir. EDX analizleriyle belirlenen Sr, Sb, Ti, Zn, P, S, Ca ve metal ve ametal oksitler kolemanit katkılı deney numunelerinin XRD incelemelerinde (testlerinde) ekstra bir element, faz veya bileşik olarak tespit edilememiştir.

Ancak tespit edilen element ve intermetalik bileşiklerin görülme oranları dikkate alındığında yüksek miktarda bulunan (Al, Si) elementler ile düşük miktarda bulunan (Fe, Ni vb.) element ve intermetalik bileşiklerin aynı 2θ açılarında çakıştığı görülmektedir. Yapılan XRD incelemelerinde kütlece düşük oranda bulunan elementler ve intermetalikler (Cu_9Al_4 , $\text{Al}_{25}\text{Fe}_{75}$, $\text{Al}_7\text{Fe}_{30}\text{Si}_3$, $\text{Al}_{95}\text{Mg}_5$, $\text{Al}_{85}(\text{Mn}_{0.72}\text{Fe}_{0.28})_{14}\text{Si}$) olarak belirlenmiş ve ilgili pikler üzerine yazılmıştır.

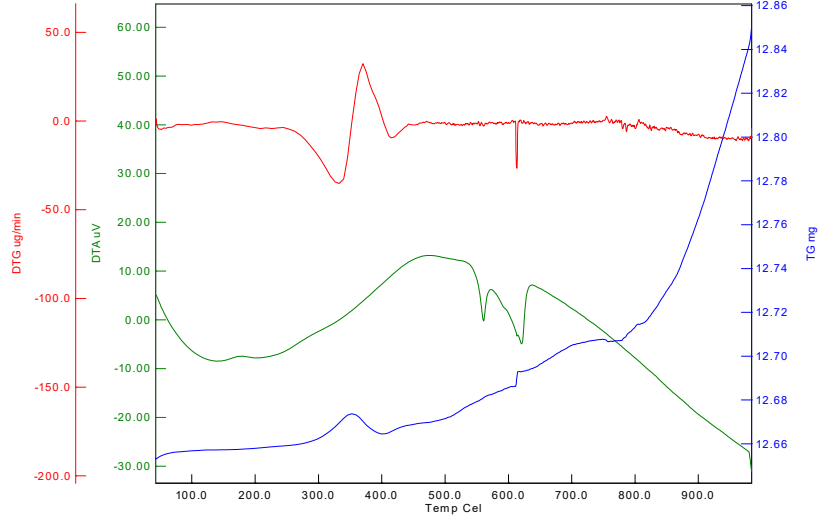
5.8. Termal Analiz (TA) İnceleme Sonuçları

SR, S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 numunelerinin termal analiz inceleme sonuçları Şekil 5.89 – Şekil 5.95 ‘de verilmiştir. Burada DTG, DTA ve TG/TGA eğrilerinin sıcaklığa bağlı termogram sonuçları görülmektedir.



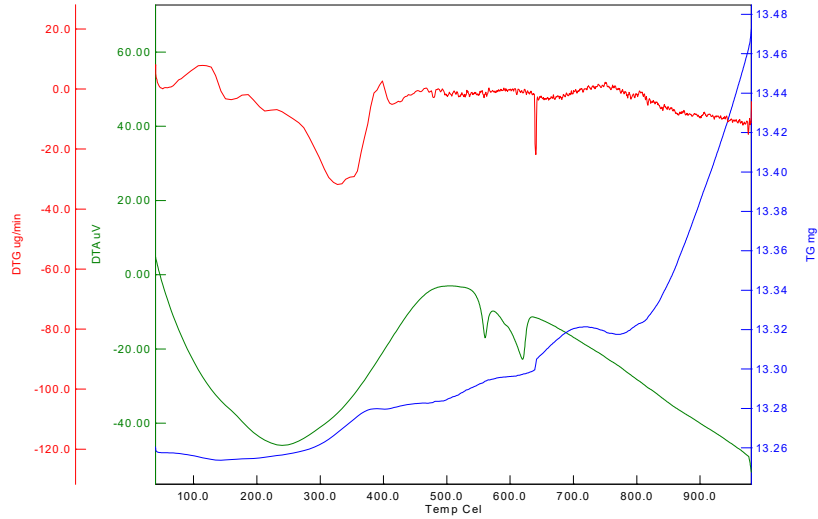
Şekil 5.89. SR numunesinin TG/DTA analizi

Şekil 5.89 ‘da SR numunesine ait TA sonuçları verilmiştir. Burada DTG, DTA ve TG/TGA termogramlarının sıcaklığa bağlı değişimleri görülmektedir.



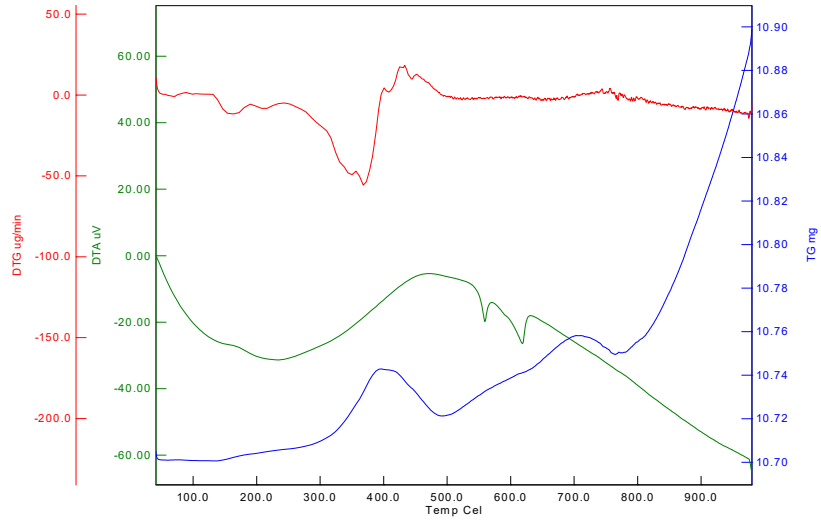
Şekil 5.90. S1 numunesinin TG/DTA analizi

S1 numunesine ait TA sonuçları Şekil 5.90 ‘da görülmektedir. DTG, DTA ve TG/TGA incelemelerinin sıcaklığa bağlı termogramları verilmiştir. 650 °C dolaylarında endotermik bir reaksiyon veya kararsızlık söz konusudur.



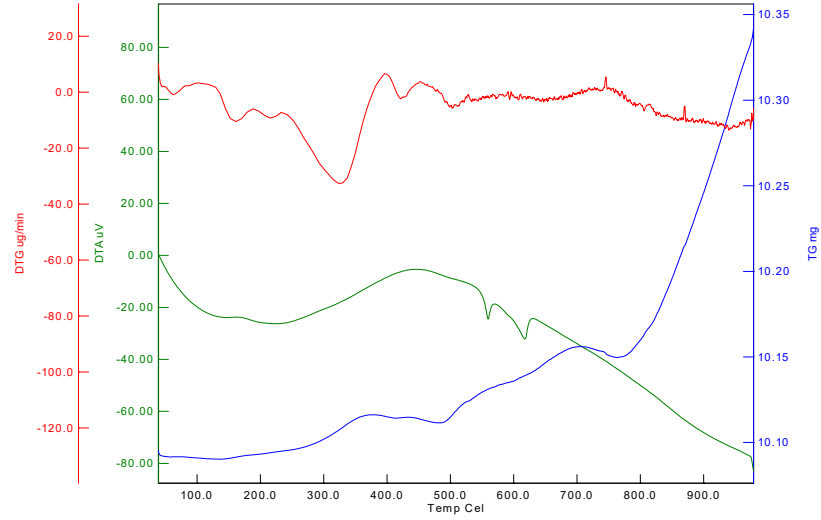
Şekil 5.91. S2 numunesinin TG/DTA analizi

Şekil 5.91‘de S2 numunesine ait TA sonuçları verilmiştir. DTG, DTA ve TG/TGA termogramlarının sıcaklığa bağlı değişimleri görülmektedir. 650 °C dolaylarında endotermik bir reaksiyon veya kararsızlık söz konusudur.



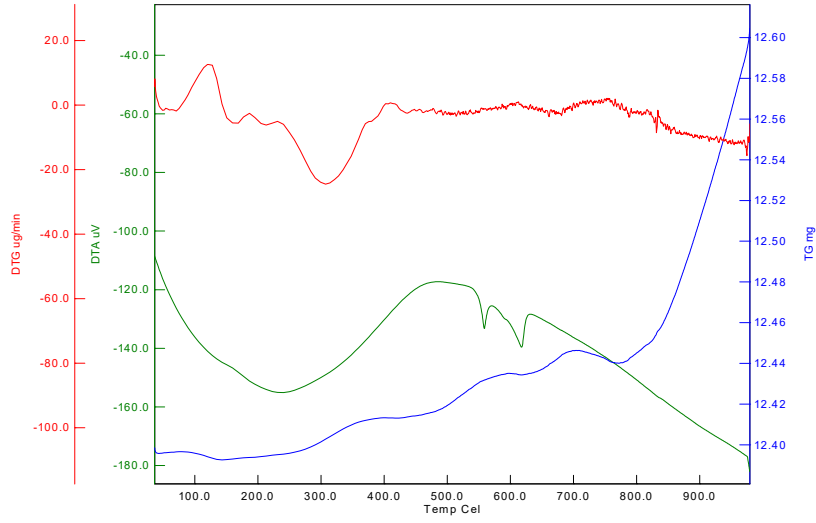
Şekil 5.92. S3 numunesinin TG/DTA analizi

S3 numunesine ait TA sonuçları Şekil 5.90 'de görülmektedir. DTG, DTA ve TG/TGA analizlerinin sıcaklığa bağlı termogramları verilmiştir. Özellikle bu numunenin DTG grafiğinde 500 - 1000 °C arası işlemlerinde dikkate değer bir termal kararlılık görülmektedir.



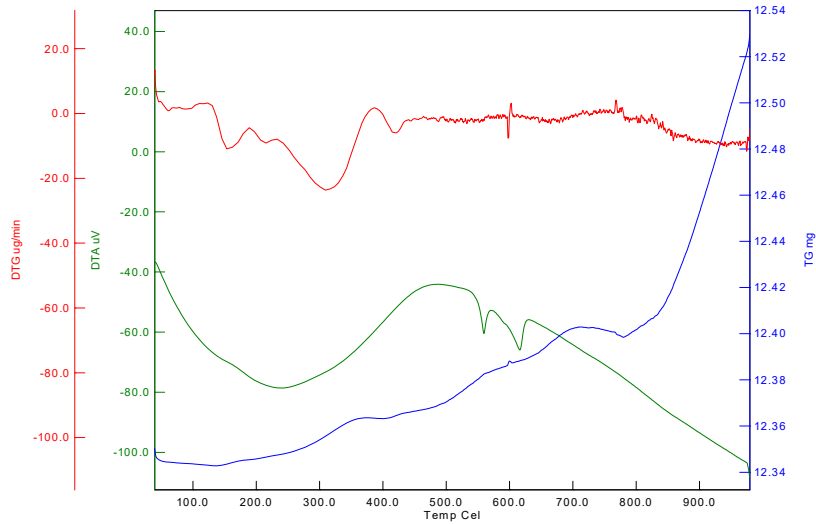
Şekil 5.93. S4 numunesinin TG/DTA analizi

Şekil 5.93 'de S4 numunesine ait TA sonuçları verilmiştir. DTG, DTA ve TG/TGA eğrilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.94. S5 numunesinin TG/DTA analizi

S5 numunesine ait TA sonuçları Şekil 5.94 'de görülmektedir. DTG, DTA ve TG/TGA eğrilerinin sıcaklığa bağlı termogramları verilmiştir. Sonuç olarak 5-10-15 ppm kolemanit minareli katkılı S3, S4 ve S5 numunelerinde 500 – 1000 °C arası termal kararlılık göstermiş olmaları önemlidir.



Şekil 5.95. S6 numunesinin TG/DTA analizi

Şekil 5.95 'de S6 numunesine ait TA sonuçları verilmiştir. DTG, DTA ve TG/TGA eğrilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri görülmektedir.

Deney numunelerinin yapılan termal analiz sonuçlarına (DTG, DTA ve TG/TGA) göre termogramlar incelendiğinde; referans numuneye göre S1 numunesinin oksitlenme sıcaklığında 100 °C 'lık bir artış meydana gelmiştir. Aynı şekilde S2 numunesinin oksitlenme şiddetinde de S1 numunesine kıyasla yaklaşık 50 °C 'lık bir yükselme olmuştur. S3, S4 ve S5 deney numunelerinde oksitlenme etkisi azalmış ve oksitlenme sıcaklığı 750 – 850 °C civarına yükselmiş ve aynı zamanda bu numunelerde termal kararlılık görülmüştür. Son olarak S6 numunesinin faz dönüşüm sıcaklıkları önceki numunelerde olduğu gibi değişmemiştir. Yine bu numunede diğer numunelere benzer şekilde 0 – 800 °C arası daha düşük oranda bir oksitlenme izlenirken, 800 – 1000 °C arası bu oran artmıştır. Ancak 580 °C civarında bir termal kararsızlık da izlenmektedir.

Genel olarak, sıcaklığa bağlı oksitlenme etkisi açısından referans numuneye göre S1 ve S2 numunelerinde artan oksitlenme ile numune ağırlığında artışlar söz konusudur. S3, S4, S5 ve S6 numunelerinde ise artan sıcaklıkla malzemenin oksitlenmesi ve buna bağlı olarak ağırlık artışı S1 ve S2 numunelerine göre daha az gelişmiştir. Başka bir ifadeyle oksitlenme etkisi açısından S1 ve S2 numunelerine göre S3, S4, S5 ve S6 numunelerinin oksitlenme sıcaklığı ve oksitlenme miktarı artmıştır.

Özellikle referans numune de dahil tüm numunelerde 0 – 850 °C arası düşük, 850 °C 'den sonra daha hızlı bir oksitlenme izlenmiştir (Şekil 5.87 – Şekil 5.93). Sonuç olarak referans numuneye göre S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 numunelerini karşılaştırsak artan sıcaklıkla oluşan oksitlenme açısından, oksitlenme şiddeti ve sıcaklığında artışlar gözlenmiştir.

Kolemanit katkısının faz dönüşümüne ve faz dönüşüm sıcaklığına etkisini incelemek amacıyla aynı test cihazında DTA incelemeleri de yapılmıştır. Yapılan DTA incelemeleri sonucunda kolemanit etkisiyle ilave bir faz dönüşümü olmadığı gibi Al-Si katı-sıvı faz dönüşüm sıcaklığında da net bir değişiklik söz konusu değildir. Başka bir ifadeyle artan kolemanit etkisiyle deney numunelerinin faz dönüşüm sıcaklıklarında dikkate değer bir değişiklik olmadığı DTA analizi sonuçlarından anlaşılmaktadır. Esas itibarıyla referans malzemesinin katı-sıvı faz dönüşümü sıcaklığı ile kolemanit katkılı S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 numunelerinin faz dönüşüm sıcaklıkları arasında da önemli bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

TG/TGA incelemeleri sonucunda deney malzemelerinde artan sıcaklıkla oluşan oksitlenme % artış miktarları Tablo 5.2 'de verilmiştir.

Tablo 5.2. TG/TGA analiz sonuçları

Numune no	Numune ağırlığı (mg)	Son ağırlık (mg)	Oksitlenme miktarı (mg)	% Oksitlenme
SR	11,011	11,167	0,156	14
S1	12,653	12,850	0,197	16
S2	13,260	13,437	0,213	16
S3	10,705	10,899	0,194	18
S4	10,096	10,342	0,246	24
S5	12,399	12,605	0,206	17
S6	12,350	12,530	0,180	15

TG/TGA analiz sonuçları ve Tablo 5.2 ‘de verilen değerler incelendiğinde kolemanit katkısına bağlı olarak referans numuneye göre; S1 % 2, S2 % 2, S3 % 4, S4 % 10, S5 % 3 ve S6 % 1 daha fazla oksitlenme meydana gelmiştir. Burada artan metal oksitlerin, sertlik artışına ve özellikle S4 numunesinin mikro sertlik değerinin en yüksek olmasına neden olduğu düşünülmektedir. TG/TGA sonuçları ile aşınma direnci ve mikro sertlik değerleri karşılaştırıldığında özellikle S4 numunesinin diğer numunelere göre mikro sertlik değerinin yüksek olduğu ve aynı şekilde bu numunenin oksitlenme derecesinin ve aşınma direncinin de arttığı gözlenmiştir.

Özellikle S1 ve S2 numunelerinde kolemanit katkısının alaşımın katı-sıvı faz dönüşümü esnasında ani bir oksitlenmeye ve ağırlık artışına neden olduğu termogramlardan görülmektedir. Başka bir ifadeyle S3, S4, S5 ve S6 numunelerinde artan sıcaklıkla oksitlenmenin de arttığı yani ağırlık artışı olduğu ancak bu artışların ani veya keskin bir şekilde olmadığı gözlemlenmiştir.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Alüminyum Silisyum Alaşımı Bir Yatak Malzemesinin Aşınma Performansına Kolemanit İlavesinin Etkisinin İncelenmesi” isimli çalışmada kum kalıba döküm yöntemiyle üretilen kaymalı yatak malzemesi üzerinde yapılan bilimsel araştırmalarda aşağıdaki bilgi, bulgu ve sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Kolemanit katkı oranının artışı ile AlSi6ZnCuFe alaşımının sertliğinin arttığı ve en yüksek sertliğin % 34 ‘lük bir artış ile 15 ppm kolemanit içeren S5 numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu gelişmenin kolemanit katkısıyla, tane incelmesi ve tane sınırı çökmesi etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Bu alaşımda 10 ppm kolemanit katkılı S4 numunesi en yüksek mikro sertlik değerini sağlamıştır.
3. Araştırmamıza konu olan kaymalı yatak malzemesinin aşınma testlerinden; artan kolemanit ilavesi ile aşınma direncinin genel olarak arttığı sonucuna varılmıştır. Metal-metal sürtünmesi neticesinde; yüzeyde oluklar meydana getiren abrasiv aşınma, kraterler ve yüzeye sıvanmış parçacıklar şeklinde kendini gösteren adhesiv aşınma mekanizmaları görülmektedir.
4. Kolemanit ilavesinin kaymalı yatak malzemesinin asidik korozyon (H_2SO_4) direncine olumsuz etki yaptığı ve kolemanit katkısı ile deney malzemelerinin korozyon direncinin azaldığı anlaşılmıştır.
5. Optik mikroskop incelemelerinden, kolemanit katkısıyla boşlukların azaldığı ve tanelerin daha incelerek matriste daha iyi dağıldığı gözlenmiştir.
6. SEM incelemeleri ve EDX analiz sonuçlarına göre kolemanit katkısıyla alaşımın matrisinde intermetalik bileşikler ile metal ve ametal oksitlerin miktarının arttığı gözlenmiştir.

7. SEM incelemelerinde matris yapısının, α -Al + Si veya α -Al + Si + Zn , α -Al + Si + Zn + Cu bileşenlerinden ve tane sınırlarında silisyum bileşenli yapılardan ve demirce zengin intermetaliklerden oluşmaktadır. Ayrıca yine matris ve tane sınırlarında Si, Zn ve Cu elementlerinin homojen bir dağılım gösterdiği düşünülmektedir.
8. XRD incelemeleriyle başta Al piki olmak üzere silisyum, demir ve nikel pikleri belirgin şekilde görülmüştür. EDX analizleriyle belirlenen Sr, Sb, Ti, Zn, P, S, Ca ve metal ve ametal oksitlerden başka, kolemanit katkılı deney numunelerinin XRD incelemelerinde (testlerinde) farklı bir element, faz veya bileşik tespit edilememiştir.
9. Termal analiz incelemelerinde referans numuneye göre, 1-3 ppm arası kolemanit katkılarının, alaşımda ani bir oksitlenme ve ağırlık artışına neden olmuştur. Buna karşılık 5-20 ppm arası kolemanit ilaveleri ve artan sıcaklıkla oksitlenme yani ağırlık artışı olduğu ancak bu artışların ani veya keskin bir şekilde olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca yine termal analiz incelemelerinden 5-15 ppm kolemanit katkıları AlSi6ZnCuFe yatak alaşımına 550 - 1000 °C arası bir termal kararlılık kazandırmıştır.
10. AlSi6ZnCuFe yatak alaşımının sertliğinin ve aşınma direncinin kolemanit katkılarıyla geliştirilebileceğinin mümkün olacağı kanaatine varılmıştır.
11. Genel sonuç olarak 5 ppm'den daha fazla kolemanit ilavesi matris malzemesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve özellikle 10-15 ppm katkılı AlSi6ZnCuFe yatak alaşımının servis şartları için en uygun malzemeler olduğu düşünülmektedir.
12. Yapılan deneysel çalışmalarda AlSi6ZnCuFe yatak alaşımının kuru sürtünme ortamı aşınma davranışları incelenmiş ve kolemanit katkısının etkileri tespit edilmiştir. Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda yağlı ortam aşınma davranışına kolemanit ilavesinin etkisinin araştırılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

13. Kolemanit minareli katkılı AlSi6ZnCuFe yatak alaşıımı ile borik asit katkılı alaşıımın DTA, DSC ve TG/TGA analiz sonuçlarının karşılaştırılmalı olarak incelenmesi bu konudaki çalışmaları daha da aydınlatacaktır.
14. Kolemanit minareli katkılı AlSi6ZnCuFe yatak alaşıımı ile borik asit katkılı alaşıımın asidik (H_2SO_4) korozyon araştırma sonuçlarının incelenmesi bu konudaki çalışmalara katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, S.**, 1990. Poliasetalin kuru ve su ile yağlama koşullarında sürtünme katsayısı ve aşınma bakımından incelenmesi, *4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 585-594.
- Akkurt M.**, 1992. Makine elemanları, İ.T.Ü., İstanbul.
- Akkurt, M.**, 1997. Makine elemanları, Birsen Yayınevi, Cilt: 1, İstanbul.
- Alshmri, F., Atkinson, H. V., Hainsworth, S. V., Haidon, C. and Lawes, S. D. A.**, 2014. Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys, *Wear*, **313(1)**, 106-116.
- Arıkan, R.**, 1988. MOS₂ ilaveli çinko-alüminyum esaslı kompozitlerin yapısı ve aşınma özellikleri, *3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 537-547.
- ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.
- Ashtari, P., Tezuka, H. and Sato, T.** 2003. Influence of Sr and Mn additions on intermetallic compound morphologies in Al-Si-Cu-Fe cast alloys. *Materials Transactions*, **44(12)**, 2611-2616.
- Aytaç, A.**, 2007. A356 alüminyum alaşımlarının yarı katı işleme üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Z.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Baradeswaran, A. and Perumal, A. E.**, 2014. Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites, *Composites Part B: Engineering*, **56**, 472-476.
- Baysal, G.**, 2010. İyonik sıvılarla modifiye edilmiş montmorillonit polimer nanokompozitlerin hazırlanması, *Doktora Tezi*, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Bican, O.**, 2010. Bakır ve silisyum içeren Al-25Zn esaslı alaşımların dökülmüş ve ısıtılma işlem görmüş durumlardaki yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bican, O.**, 2014. Microstructural, mechanical and dry sliding wear properties of the MgO reinforced aluminium matrix composites produced by vacuum infiltration, *Kovove Mater.*, **52**, 77-83.

- Bingöl, M.S.,** 2012. Basınç altında CO₂ ile kolemanitten H₃BO₃ üretiminin optimum şartlarının belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Buytoz, S. ve Eren, H.,** 2007. Al Metal Matris Kompozitlerin Abrasiv Aşınma Performansına Takviye Elemanlarının Etkisi. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, **19 (2)**, 209-216.
- Büyükdoğan, S.,** 2011. Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımasının aşınma davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Can, İ.,** 2005. Kurşun esaslı krank mili kaymalı yatak malzemesinin aşınma davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Chunfu, G., Xueqing, B. and Shiju, E.,** 2007. Wear Experiments of Glass Ceramics and Bearing Steel. *Journal of Rare Earths*, **25**, 327-329.
- Cöcen N., Belevi M. ve Önel K.,** 1997. Tane silisyum karbür katkılı alüminyum alaşım bazlı kompozitlerin aşınma davranışları, *D.E.Ü. Mühendislik*, **14(2)**, 473-485.
- Çalın, R.,** 2006. Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çerik, H.V.,** 1986. Makine Bilgisi ve Makine Elemanları.
- Çetin, E.,** 2007. Anilin ve poli (etilen teraftalat) kullanarak kimyasal polimerizasyon yöntemi ile iletken kompozit lif hazırlanması ve karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çinkı, M.,** 2001. Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği ATO Yayınları, Ankara.
- Çuvalcı, H.,** 2001. Çinko-Alüminyum esaslı ticari ZA-27 kaymalı yatağının sürtünme davranışının incelenmesi, *Türk J Engin Environ Sci*, **25**, 199-204.
- Dæhlen, E. S.,** 2013. The Effect of Vanadium on AlFeSi-Intermetallic Phases in a Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloy.
- Das, S., Das, S., and Das, K.,** 2007. Abrasive wear of zircon sand and alumina reinforced Al-4.5 wt% Cu alloy matrix composites—A comparative study. *Composites Science and Technology*, **67(3)**, 746-751.
- Demir, E.,** 2008. Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Demir, İ.**, 2011. Safır alttaşı üzerine büyütülen gan epitaksiyel tek kristal ince filmlerin Xrd yöntemi ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Demirezen, B.**, 2014. Polimerik azometin bileşikleri ve geçiş metal komplekslerinin xrf ve Xrd ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Dhiman, M., Dwivedi, D. K., Sehgal, R. and Bhat, I. K.**, 2014. Effect of iron on wear behavior of as-cast and heat-treated hypereutectic Al-18Si-4Cu-0.5 Mg alloy: A Taguchi approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, **228(1)**, 2-16.
- Dobrzanski, L.A., Włodarczyk, A. and Adamiak, M.**, 2005. Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al₂O₃ ceramic particles, *Journal of Materials Processing Technology*, **162-163**, 27-32.
- Doğru, B.**, 2007. Alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasının borik asit sülfürik asit anodizing yöntemiyle geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dönük, Ç.**, 2012. CoNiCu ince film alaşımlarının xrd ve xrf ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Duman, M. S.**, 2002. Dinamik yük altında çalışan teflon-bronz tabakalı kaymalı yataklarda gerilme analizi ve yüzey yorulmasının incelenmesi, *Doktora Tezi*, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ertürk, F.**, 2010. Direnç elemanlı hidrostatik eksenel kaymalı yatakların optimum tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Fang, C.-K., Huang, C.C. and Chuang, T.H.**, 1999. Synergistic effects of wear and corrosion for Al₂O₃ particulate-reinforced 6061 aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **30A**, 643-651.
- Feyzullahoğlu, E. and Şakiroğlu N.**, 2011. The tribological behaviours of aluminium-based materials under dry sliding. *Industrial Lubrication and Tribology*, **63(5)**, 350-358.
- Feyzullahoğlu, E., Ertürk, A.T. and Güven, E.A.**, 2013. Influence of forging and heat treatment on wear properties of Al-Si and Al-Pb bearing alloys in oil lubricated conditions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **23(12)**, 3575-3583.

- Gençalp, S., Aksoy, U., ve Ersenbil, E.,** 2011. A360 alüminyum alaşımına Mg ilavesinin malzeme yapısındaki sertlik dağılımına etkisinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **Cilt 2- Sayı 2**, 87-93.
- Gümüş, H.,** 2010. Ham ve ön-işlem görmüş sepiyolit numunelerinin Cu(II) ve Pb(II) alıkoyma davranışlarının XRD, XRF, FTIR, Termik Analiz (TG-DTA), Atomik Absorpsiyon teknikleriyle incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Goudar, D. M., Raju, K., Srivastava, V. C. and Rudrakshi, G. B.,** 2013. Effect of copper and iron on the wear properties of spray formed Al-28Si alloy, *Materials & Design*, **51**, 383-390.
- Gökler, E.,** 2012. Yeni bir non-newtonyen akışkan modelinin kaymalı yatak içerisindeki akışının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Görener, A.,** 2007. Al-Si matrisli kompozit malzemelerin korozyon davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gözkaman Ç.,** 2008. Kolemanit flotasyonunun kimyasal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güç, E.,** 2010. Kolemanit içeriğindeki arseniğin biyoliç ile uzaklaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Güler, C.,** 2012. Alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Gülgönül, İ.,** 1990. Bor minerallerinin flotasyonuna şlam etki mekanizması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürleyik M. Y.,** 1986. Makine mühendisliğinde aşınma olayları, *Mühendis ve Makina*, **27(14)**, 3-14.
- Güzel, G.** 2006. Lityum ve borca zengin bazı kimyasal bileşiklerin sentezi ve yapısal özelliklerinin Xrd ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Grün, F., Gódor, I. and Eichlseder, W.,** 2009. Fundamentals of optimizing aluminium-based journal bearing materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **223(5)**, 777-785.
- Habig, K. H.,** 1980, Verschleiß UND Härte von Werkstoffen, Hanser- Verlag, München-Wien, Germany, 547-554.

- Hekmat-Ardakan, A., Liu, X., Ajersch, F. and Chen, X. G.,** 2010. Wear behaviour of hypereutectic Al–Si–Cu–Mg casting alloys with variable Mg contents. *Wear*, **269(9)**, 684-692.
- Helvacı, C.,** 2003. Türkiye borat yatakları: Jeolojik konumu, ekonomik önemi ve bor politikası, *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Hurricks, P. L.,** 1973. Some Metallurgical Factor Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels a Review, *Wear*, **26**, 285 – 304.
- Iwai, Y., Honda, T., Miyajima, T., Iwasaki, Y., Surappa, M. K. and Xu, J. F.,** 2000. Dry sliding wear behavior of Al₂O₃ fiber reinforced aluminum composites. *Composites science and technology*, **60(9)**, 1781-1789.
- İpek R.,** 1987. Tren fren pabuçlarının aşınmasının deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- İpek, R.,** 1992. AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 40-52.
- İzciler, M. ve Öcal. İ.,** 2001. Yüzey topografyasına bağlı olarak aşınmanın ölçümü, *I. Demir-Çelik Sempozyumu Bildirileri*, TMMOB, Erdemir, Ereğli-Zonguldak.
- Jaafar, S.,** 2013. Kontrollü katılaştırılmış Al-Co ve Sn-Zn ötektik alaşımlarının ötektik mesafe, mikrosertlik ve elektriksel özdirenç değerlerinin büyütme hızına bağlılığının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Ji, S., Yang, W., Gao, F., Watson, D. and Fan, Z.,** 2013. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al–Mg–Si–Mn and Al–Mg–Si diecast alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **564**, 130-139.
- Kaplan, M., Ileriturk, M. and Balalan, Z.,** 2008. Relationship between microstructure, hardness, XRD, TGDTA analysis, and wear performance of a cast ZA alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, **23(4)**, 400-406.
- Karakoç, P.,** 2014. Farklı ışık kaynakları ve ışık uygulama tekniklerinin kompozitlerin mikrosertlik değerleri üzerine etkisi, *Doktora Tezi*, İ.Ü. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karamış, M.B.,** 1986. Abrasiv aşınma mekanizmasında yüzey basıncının aşınmaya etkisi, 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 493-500.
- Kayadeniz İ., Gülensoy H. ve Yusufoglu İ.,** 1979. Arsenikli kolemanit cevherlerindeki arseniğin vakum kalsinasyon yöntemi ile giderilmesi, *TÜBİTAK, Mühendislik Araştırma Grubu*, Proje No. 198, İstanbul.

- Kayalı, E.S., Ensari, C. ve Dikeç, F.,** 1981. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri.
- Keleştimur, M.H.,** 1989. Makine yapı çeliklerinde abrasif aşınma direncine yüzey sertliğine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Koç, R.,** 2004. Vagon boji bagalarına alternatif polimer malzemelerin deneysel incelenmesi, *Doktora Tezi*, S.A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kori, S. A., Murty, B. S. and Chakraborty, M.,** 2000. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. *Materials Science and Engineering: A*, **283(1)**, 94-104.
- Kori, S.A. and Chandrashekharaiyah, T.M.,** 2007. Studies on the dry sliding wear behaviour of hypoeutectic and eutectic Al-Si alloys. *Wear*, **263(1)**, 745-755.
- Kori, S. A. and Prabhudev, M. S.,** 2011. Sliding wear characteristics of Al-7Si-0.3 Mg alloy with minor additions of copper at elevated temperature. *Wear*, **271(5)**, 680-688.
- Kumar, S., Chakraborty, M., Sarma, V. S. and Murty, B. S.,** 2008. Tensile and wear behaviour of in situ Al-7Si/TiB 2 particulate composites. *Wear*, **265(1)**, 134-142.
- Kurt, H.,** 2010. Al-Al₂O₃ kompozit malzeme üretiminde karıştırma tekniğinin kompozitin aşınma davranışı üzerine etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Lasa, L. and Rodriguez-Ibabe J.M.,** 2002. Effect of composition and processing route on the wear behaviour of AlSi alloys. *Scripta Materialia*, **46**, 477-481.
- Lülsdorf, P.,** 1978. Verschleißprobleme mit Zylinder und Schnecke beim Extrudieren, VDI - Bildungswerk, BW 3019, *Traisdorf*, 140-152.
- McDonald, S. D., Nogita, K. and Dahle, A. K.,** 2004. Eutectic nucleation in Al-Si alloys. *Acta Materialia*, **52(14)**, 4273-4280.
- Odabaş D.,** 1991. Kuru sürtünme şartlarında termo mekanik faktörlerin AISI 3315 çeliğinin aşınma davranışına olan etkilerin teorik ve deneysel araştırılması, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Oğuz, B.,** 1990. Demir Dışı Metallerin Kaynağı, Oerlikon Yayınları, İstanbul.
- Onaran, K.,** 1985. Malzeme Bilgisi, İstanbul: Çağlayan Basımevi, 87-95.
- Öksüz, C.,** 1996, Yüksek mukavemetli (2024,6061,7075) alüminyum alaşımlarının jominy yöntemi ile su verme duyarlılığı., *Yüksek Lisans Tezi*, İT.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önen F.,** 2012. Bor Çelikleri, Ankara.

- Özgür, I.**, 2008. Nanotüp ve nanotel yapılarının xrd ile karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özsarac, U., Findik, F. and Durman, M.**, 2007. The wear behaviour investigation of sliding bearings with a designed testing machine. *Materials & design*, **28(1)**, 345-350.
- Öztan Peker, O.**, 2009. Tam seramik materyallerin tekrarlanan fırınlamalar sonrası renk, kırılgenlık, opasite ve mikrosertlik değışimleri, *Doktora Tezi*, Yeditepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Palta, A.**, 2009. Yerinde oluşturulmuş magnezyum silisit partikül takviyeli alüminyum-magnezyum-silisyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerine mangan ve kurşunun etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Portakal, A.**, 1974. Kaymalı düz yataklarda yüzey pürüzlülüğü ve aşınma hızı, *Mühendis ve Makine*, **Cilt 19**, 400-408.
- Pürçek, G., Savaşkan T., Küçükömeroğlu, T. and Murphy, S.**, 2002. Dry sliding friction and wear properties of zinc-based alloys, *Wear*, **252**, 894–901.
- Prakash, A. N., Gnanamoorthy, R. and Kamaraj, M.**, 2010. Dry sliding wear behaviour of oil jet peened aluminium alloy, AA6063-T6. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **224(11)**, 1189-1196.
- Prasad, S.V. and Asthana, R.**, 2004. Aluminum metal–matrix composites for automotive applications: tribological considerations, *Tribology Letters*, **17(3)**, 445-453.
- Raju, K., Harsha, A. P. and Ojha, S. N.**, 2011. Microstructural Features, Wear, and Corrosion Behaviour of Spray Cast Al—Si Alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **225(3)**, 151-160.
- Rana, R.S, Purohit, R. and Das, S.**, 2012. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. *International Journal of Scientific and Research Publication*, **2(6)**, 1-7.
- Ranganath, G., Sharma, S. C. and Krishna, M.**, 2001. Dry sliding wear of garnet reinforced zinc/aluminium metal matrix composites. *Wear*, **251(1)**, 1408-1413.
- Rao, A. P., Das, K., Murty, B. S. and Chakraborty, M.**, 2006. Microstructural and wear behavior of hypoeutectic Al–Si alloy (LM25) grain refined and modified with Al–Ti–C–Sr master alloy. *Wear*, **261(2)**, 133-139.

- Rosenberger, M.R., Schvezov, C.E. and Forlerer, E.,** 2005. Wear of different aluminum matrix composites under conditions that generate a mechanically mixed layer, *Wear*, **259**, 590–601.
- Sadık, E.,** 2011. Mr uygulamalarının dental amalgamdaki faz değişiklikleri ve cıva buharlaşması üzerine etkilerinin xrd ve xps yöntemleri ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Savaşkan, T., Pürçek, G. and Murphy,** 2002. Sliding wear of cast zinc-based alloy bearings under static and dynamic loading conditions, *Wear*, **252**, 693-703.
- Savaşkan T. and Bican, O.,** 2005. Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn–40Al–2Cu–(0–5)Si alloys, *Materials Science and Engineering A*, **404**, 259–269.
- Savaşkan, T. and Alemdağ, Y.,** 2008. Effects of pressure and sliding speed on the friction and wear properties of Al–40Zn–3Cu–2Si alloy: A comparative study with SAE 65 bronze, *Materials Science and Engineering A*, **496**, 517–523.
- Savaşkan, T.,** 2009. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Celepler Matbaacılık, Trabzon.
- Savaşkan T. and Bican, O.,** 2010. Dry sliding friction and wear properties of Al–25Zn–3Cu–3Si alloy, *Tribology International*, **43**, 1346–1352.
- Seifeddine, S., Johansson, S. and Svensson, I. L.,** 2008. The influence of cooling rate and manganese content on the β -Al₅FeSi phase formation and mechanical properties of Al–Si-based alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **490(1)**, 385-390.
- Shreir, L.,** 1994. Corrosion Vol. 1, Butterworth-Heinemann, London.
- Sivakumar, S., Padmanaban, K. P. and Uthayakumar, M.,** 2014. Wear behavior of the Al (LM24)–garnet particulate composites under dry sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **228(12)**, 1410-1420.
- Soy, U.,** 2009. SiC/B4C takviyeli metal matriks kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Soy, U.,** 2014. 1000 Soruda Malzeme Bilimi, Melisa Matbaası, İstanbul.
- Sreeja Kumari, S.S., Pillai, R.M., Rajan T.P.D. and Pai, B.C.,** 2007. Effects of individual and combined additions of Be, Mn, Ca and Sr on the solidification behaviour, structure and mechanical properties of Al–7Si–0.3Mg–0.8Fe alloy, *Materials Science and Engineering A*, **460-461**, 561-573.

- Tandler, M., Sustarsic, B., Vehovar, L. and Torkar, M.,** 2000. Corrosion of Al/SiC Metal-Matrix Composites, *Materiali in Tehnologije*, **34(6)**, 353-358.
- Tekin, E.,** 1986. Madencilikte kullanılan aşınma dayanımlı demir alaşımları, 2 Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 401-409.
- Tevrüz, T.,** 1997. Kuru sürtünme ile çalışan bronzlu dolgulu tetrafloroetilen (PTFE) radyal yataklarının tribolojik davranışları, 7. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, 2-4 Nisan.
- Toptan, F.,** 2011. Alüminyum matrisli b4c partikül takviyeli aşınma direnci yüksek kompozit malzeme üretimi,
- Uçbeyiay Şahinkaya, H.,** 2010. Kolemanit içeren ince boyutlu bor cevheri ve artığının zenginleştirilmesi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Uludağ, M.,** 2011. Farklı şartlarda dökülmüş modifiyeli Al-12Si alaşımlarında yapı ve özellikler, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Uludağ, M., Çetin, R., Bingöl, M., Ortaç Ö. ve Dişpinar, D.,** 2014. Al-7Si-0,3Mg alaşımında Sr modifikasyonunun Si morfolojisine ve porozite üzerine etkisi", 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye, 17-19 Haziran, 1534-1540
- Ünlü, B. S.,** 2004. Kaymalı yataklarda tribolojik özelliklerin ve borlanmış demir esaslı malzemelerin yatak olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Ünlü, B.S., Atik, E. ve Meriç, C.,** 2005. CuSn10 yatakların tribolojik özelliklerinin belirlenmesi, *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **1.1**, 45-51.
- Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. ve Kurgan, N.,** 2009. Bronz-demir, T/M-döküm yatakların mikroyapı, aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Weissbach, W.,** 1977. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. (Çev: S. Anık), Kurtuluş Matbaası, İstanbul.
- Yaşar N.,** 2009. Xrd analiz yöntemleriyle Bi-2223 süperiletken seramik yapıların faz değişimlerinin katkı atomları ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yıldırım, M.,** 2012. Al-Si-Mg alaşımlarında mg oranının malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- Yılmaz F.**, 1997. Sürtünme ve aşınma, 9. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 229-247.
- Yılmaz, B.**, 2002, Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Zeren, M., Karakulak, E., Gümüş, S.**, 2011. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 1698-1702.
- Zhang, Z.F., Zhang, L.C. and Mai, Y.-W.**, 1995. Particle effects on friction and wear of aluminium matrix composites, *Journal of Materials Science*, **30**, 5999-6004.
- Zhu, M., Zeng, M. Q., Gao, Y., Ouyang, L.Z. and Li B. L.**, 2002. Microstructure and wear properties of Al-Pb-Cu alloys prepared by mechanical alloying. *Wear*, **253**, 832-838.
- MEGEP, Metal Teknolojisi, Sertlik Ölçme Yöntemleri, Ankara, 2006.
- MEGEP, Makine Teknolojisi, Yataklar, Yayın No: 521MMI182, Ankara, 2011.
- MEGEP, Uçak Bakım, Korozyon, Yayın No: 525MT0002, Ankara, 2012.
- URL-1, <http://www2.aku.edu.tr/~abaydir/dosyalar/motortasarimi/MotorTasarimiSelim-Cetinkaya.pdf>, 12 Haziran 2014.
- URL-2, http://hilmi.trakya.edu.tr/ders_notlari/Motorlar/index.htm, 05 Eylül 2014.
- URL-3, <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/23.pdf>, 15 Eylül 2014.
- URL-4, <http://metalurji.kocaeli.edu.tr/mmt419-04.php>, 25 Eylül 2014.
- URL-5, <http://www.etimaden.gov.tr/tr/product/bor-kimyasal-esdegerleri-ogutulmus-kolemanit>, 09 Aralık 2015.
- URL-6, <http://www.kimyamuhendisi.com/index.php/makaleler/958-polimerlerde-alev-geciktiricilik-ii>, 09 Aralık 2015.
- URL-7, <http://www.degerlitaslar.gen.tr/mohs-sertlik-skalasi.html>, 10 Kasım 2015.
- URL-8, <http://metalurji.kocaeli.edu.tr/files/DUY-073.pdf>, 9 Kasım 2015.
- URL-9, <http://www.an-ka.com/KMDefault.aspx?cntid=1118>, 10 Aralık 2015.
- URL-10, www2.aku.edu.tr/hitit/DERSLER/BAHAR/MALZEME%20KARAKTERIZASYON%20TEKNIKLERI/TERMAL%20ANALIZ.pdf, 10 Aralık 2015.

ÖZGEÇMİŞ

15.11.1977 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ'da ve lise öğrenimini 1994 yılında aynı şehirde tamamladı. 1997 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Makine Programın da önlisans eğitimine başladı. 1999 yılında önlisans diploması almaya hak kazanarak bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2001 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi bölümü Talaşlı Üretim Öğretmenliği Anabilim Dalında lisans eğitimine başladı. 2004 yılında bu bölümden yine bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2004-2005 yılları arasında askerlik görevini tamamladı. 2008-2009 eğitim-öğretim yılı güz döneminde Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek Lisans öğrenimini 2010 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalında tamamladı. Haziran 2010'da Gümüşhane Üniversitesi Gümüşhane Meslek Yüksekokulu'na Öğretim Görevlisi olarak atandı. Selahattin BUDAK evli ve İngilizce bilmektedir.