

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOR, STRONSIYUM VE/VEYA MAGNEZYUM KATKILARININ
AL-Sİ ALAŞIMLARININ YAPISAL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

GİZEM AYATA

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ PAŞA HEKİMOĞLU

TEZ JÜRİLERİ

DOÇ. DR. YASİN ALEMDAĞ

DR. ÖĞR. ÜYESİ ŞENOL BAYRAKTAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

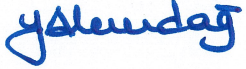
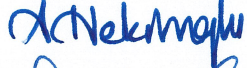

RİZE-2018

Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOR, STRONSIYUM VE/VEYA MAGNEZYUM KATKILARININ AL-Sİ
ALAŞIMLARININ YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Dr. Öğr. Üyesi Ali Paşa HEKİMOĞLU danışmanlığında Gizem AYATA tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/04/2018 tarihinde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı	İmzası
Başkan	: Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ali Paşa HEKİMOĞLU	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Şenol BAYRAKTAR	


Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

İmalat sanayinde ürün ağırlıklarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması hem imalat hem de kullanım maliyetlerini azaltma açısından büyük önem taşımaktadır. Bu durum son yüzyıldaki araştırma ve geliştirme çalışmalarında yoğunluğu daha düşük olan ancak mukavemet gereksinimlerini yeterli ölçüde sağlayan malzemeler üzerine odaklanılmasına neden olmuştur.

Al-Si esaslı alaşımlar yoğunluklarının düşük, temin edilebilirliklerinin ve imalatlarının nispeten kolay olması ve pek çok tasarım için yeterli mukavemet değerlerini sağlamaları nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmiş olup, bu alaşımlar üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Al-Si esaslı pek çok alaşım geliştirilerek standartlaştırılmıştır. Ancak hafiflik ve/veya mukavemet gereksinimlerinin gün geçtikçe artması Al-Si esaslı alaşımların mekanik özelliklerinin de sürekli geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalar arasında alaşım veya modifikasyon elementi ilavesi ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi önemli bir yer tutmuştur. Ancak bor, stronsiyum ve magnezyumun Al-Si alaşımlarının içyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin bir arada sistematik olarak incelendiği bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada farklı oranlarda silisyum içeren Al-Si alaşımları seçerek bu alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerine bor veya stronsiyum ve magnezyumun etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek Lisans Tezimde danışmanlığımı üstlenen ve çalışmalarımnda çok önemli katkılar yapan hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Paşa HEKİMOĞLU'na, Merve ÇALIŞ'a ve Arş. Gör. Murat HACIOSMANOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2016-685 nolu proje ile desteklenmiştir.

Gizem AYATA

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Bor, Stronsiyum ve/veya Magnezyum Katkılarının Al-Si Alaşımlarının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 24/04/2018


Gizem AYATA

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

BOR, STRONSIYUM VE/VEYA MAGNEZYUM KATKILARININ AL-Sİ ALAŞIMLARININ YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Gizem AYATA

**Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ali Paşa HEKİMOĞLU**

Bu çalışmada bir dizi ikili Al-Si ve farklı oranlarda silisyum, bor ve/veya stronsiyum, magnezyum içeren Al-Si esaslı üçlü ve dördü alaşım ile bir adet beşli Al-12Si-0,05B-0,1Sr-0,6Mg alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Üretilen alaşımların içyapıları standart metalografik yöntemler kullanılarak incelendi. Sertlik ve mekanik özellikleri sırasıyla Brinell sertlik ölçüm yöntemi ve universal çekme deneyi yardımıyla belirlendi. İkili Al-Si alaşımlarının içyapılarının alüminyumca zengin α dendritleri, primer silisyum ve ötektik Al-Si fazından oluştuğu görüldü. Al-Si alaşımlarına yapılan bor katkısı alüminyumca zengin α dendritlerinin küçülmesine ve ötektik fazın morfolojisinin değişmesine neden oldu. Stronsiyum içeren Al-Si esaslı üçlü alaşımların ikili Al-Si alaşımlarına göre daha ince ve küresel yapıli ötektik fazdan oluşan bir yapı sergilediği görüldü. Magnezyum Al-Si-Sr alaşımlarının dendritik yapısını ve diğler fazları belirgin bir şekilde etkilemedi, ancak dördü Al-Si-Sr-Mg alaşımların içyapısında magnezyumca zengin fazların oluşmasına neden oldu. Belirli oranlardaki bor, stronsiyum ve magnezyum katkılarının üretilen alaşımların hem sertliğini hem de çekme dayanımını artırdığı görüldü. Alaşımların sertlik ve çekme dayanımındaki artış ile kopma uzaması değerlerindeki değişimler element katkısı nedeniyle içyapılarında meydana gelen değişikliklere dayandırılarak irdelendi.

2018, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Al-Si Esaslı Alaşımlar, Al-Si-B Alaşımları, Al-Si-Sr Alaşımları, Al-Si-Sr-Mg Alaşımları, Mekanik Özellikler.

ABSTRACT

EFFECT OF ADDITION OF THE BORON, STRONTIUM AND/OR MAGNESIUM ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE AL-SI ALLOYS

Gizem AYATA

Recep Tayyip Erdoğan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Master Thesis
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU

In this study, a series binary Al-Si, ternary, and quaternary Al-Si based alloys having different rate silicon, boron and (or) strontium and magnesium and one quinary Al-12Si-0.05B-0.1Sr-0.6Mg were produced by permanent mould casting. Structural properties of the produced alloys were investigated by using standard metallographic technics. Their hardness values and mechanical properties were determined by using Brinell hardness test method and universal tensile test, respectively. The microstructure of the binary Al-Si alloys consisted of aluminum rich α dendrites, primary Si and eutectic Al-Si phase. Addition of boron to Al-Si alloys caused a decrease in the size of the aluminum rich α phase and a change in morphology of the eutectic phase. The ternary Al-Si based alloys contained strontium showed a microstructure having the refined and spheroidized eutectic phase compare to binary Al-Si alloys. Magnesium had no significant effect on the microstructures of Al-Si-Sr alloys. However, magnesium rich phases observed in the microstructure of the quaternary Al-Si-Sr-Mg alloys. Specific ratios of boron, strontium and magnesium additions caused an increament the both hardness and tensile strength of the produced alloys. Increament in the hardnes and tensile strength, and the change in elongation to fracture values of the alloys investigated were discussed in the basis on structural changes caused by element additions.

2018, 75 page

Keywords: Al-Si Based Alloys, Al-Si-B Alloys, Al-Si-Sr Alloys, Al-Si-Sr-Mg Alloys, Mechanical Properties.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLolar DİZİNİ	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti	3
1.2.1. İkili Al-Si, Al-B, Al-Sr ve Al-Mg Faz (Denge) Diyagramları	3
1.2.2. Al-Si-B, Al-Si-Sr, Al-Si-Mg ve Al-Sr-Mg Üçlü Sistemlerinin Sabit Sıcaklıktaki Kesitleri	8
1.2.3. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Sınıflandırılması ve Kimyasal Bileşimleri	11
1.2.4. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	15
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Bileşimleri	18
2.2. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	19
3. BULGULAR	21
3.1. Alaşımların Yapısal İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular	21
3.2. Mekanik DeneYlerden Elde Edilen Bulgular	45
3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	51
4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	58
5. ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	İkili Al-Si faz diyagramı	5
Şekil 2.	İkili Al-B faz diyagramı	5
Şekil 3.	İkili Al-Sr faz diyagramı	6
Şekil 4.	İkili Al-Mg faz diyagramı	6
Şekil 5.	İkili Si-B faz diyagramı	7
Şekil 6.	İkili Si-Sr faz diyagramı.....	7
Şekil 7.	İkili Mg-Si faz diyagramı.....	8
Şekil 8.	Al-Si-B üçlü sisteminin 500 °C sıcaklıktaki kesiti	9
Şekil 9.	Üçlü Al-Si-Mg sisteminin 430 °C sıcaklıktaki kesiti	9
Şekil 10.	Al-Sr-Mg üçlü sisteminin 25 °C sıcaklıktaki kesiti	10
Şekil 11.	Al-Si-Sr üçlü sisteminin sabit sıcaklıktaki kesiti	10
Şekil 12.	Mg-Si-Sr üçlü sisteminin 300 °C sıcaklıktaki kesiti.....	11
Şekil 13.	Alaşımın üretiminde kullanılan çelik kalıbın teknik resmi.....	19
Şekil 14.	Metalografi ve sertlik numunelerine ait teknik resim	20
Şekil 15.	Çekme deneyi numunelerinin teknik resmi	20
Şekil 16.	Al-9Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf	22
Şekil 17.	Al-12Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	23
Şekil 18.	Al-17Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf	24
Şekil 19.	Al-12Si-0.01B alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	25
Şekil 20.	Al-12Si-0.05B alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme	26
Şekil 21.	Al-12Si-1B alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	27
Şekil 22.	Al-12Si-0.02Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	28
Şekil 23.	Al-12Si-0.06Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	29
Şekil 24.	Al-12Si-0.1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	30
Şekil 25.	Al-12Si-1.0Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	31
Şekil 26.	Al-12Si-0.1Sr-0.2Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	32

Şekil 27. Al-12Si-0.1Sr-0.6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	33
Şekil 28. Al-12Si-0.1Sr-1.0Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	34
Şekil 29. Al-12Si-0.1Sr-0.05B-0.6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	35
Şekil 30. Al-9Si-0.1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	36
Şekil 31. Al-9Si-0.1Sr -0.6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	37
Şekil 32. Al-17Si-0.1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	38
Şekil 33. Al-17Si-0.1Sr-0.6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).....	39
Şekil 34. Al-12Si alaşımının X-ışını kırınım deseni	40
Şekil 35. Al-12Si-0.01B alaşımının X-ışını kırınım deseni	41
Şekil 36. Al-12Si-0.05B alaşımının X-ışını kırınım deseni	41
Şekil 37. Al-12Si-1B alaşımının X-ışını kırınım deseni	42
Şekil 38. Al-12Si-0.02Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni	42
Şekil 39. Al-12Si-0.1Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni	43
Şekil 40. Al-12Si-1.0Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni	43
Şekil 41. Al-12Si-0.1Sr-0.2Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni	44
Şekil 42. Al-12Si-0.1Sr-0.6Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni	44
Şekil 43. Al-12Si-0.1Sr-1.0Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni	45
Şekil 44. Al-12Si-0.1Sr-0.05B-0.6Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni	45
Şekil 45. İkili Al-(5-20)Si alaşımlarının sertlik değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	47
Şekil 46. İkili Al-(5-20)Si alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	47
Şekil 47. Üçlü Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının sertlik değerlerinin bor oranına göre değişimini gösteren eğri.....	48
Şekil 48. Üçlü Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bor oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	48
Şekil 49. Üçlü Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarının sertlik değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler	49

Şekil 50. Üçlü Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 51. Dörtlü Al-12Si-0.1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının sertlik değerlerinin magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 52. Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.....	51
Şekil 53. Al-12Si alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	52
Şekil 54. Al-12Si-0.01B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	52
Şekil 55. Al-12Si-0.05B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	53
Şekil 56. Al-12Si-1.0B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	53
Şekil 57. Al-12Si-0.02Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	54
Şekil 58. Al-12Si-0.1Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	54
Şekil 59. Al-12Si-1.0Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	55
Şekil 60. Al-12Si-0.1Sr-0.2Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	55
Şekil 61. Al-12Si-0.1Sr-0.6Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 62. Al-12Si-0.1Sr-1Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 63. Al-12Si-0.1Sr-0.05B-0.6Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	57

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bazı ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri (TS EN 1706, 2010).....	13
Tablo 2. Al-Si esaslı bazı alaşımların mekanik özellikleri	17
Tablo 3. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri	18
Tablo 4. Üretilen alaşımların sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerleri	46



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Otomotiv, savunma, uzay ve havacılık sanayilerinde yapılan imalatlarda ürün ağırlıklarının azaltılması, işgücü ve enerji verimliliğinin (yakıt ekonomisi) artırılması büyük önem taşımaktadır. Bu durum söz konusu sanayi dallarında kullanılmak üzere yeterli mukavemet değerlerine sahip ancak daha hafif malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar daha düşük yoğunluklu ve yüksek özgül mukavemetli, üstün aşınma ve korozyon direncine sahip kolay şekillendirilebilen malzemelerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır (ASM International, 1992; Shaha vd., 2015a; Jeong, 2013; Mohamed vd., 2013; Tebip vd., 2014; Vijeesh ve Prabhu, 2014; Shaha vd., 2015b; Shaha vd., 2015c; Choi vd., 2014; Ye, 2003; Li, 2015; Peijie vd., 1996).

Döküm ve işleme ve kolaylıklarının yanı sıra düşük yoğunluk değerlerine sahip oldukları için alüminyum-silisyum (Al-Si) esaslı alaşımlar üzerinde son yıllarda yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmış olup, bu çalışmalar sonucunda uygun içyapı, sertlik, mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahip olan özellikle % 5 ile 17 aralığında silisyum içeren pek çok Al-Si esaslı alaşım geliştirilmiştir (Shaha vd., 2015a; Jeong, 2013; Mohamed vd., 2013; Tebip vd., 2014; Vijeesh ve Prabhu, 2014; Shaha vd., 2015b; Shaha vd., 2015c; Choi vd., 2014; Ye, 2003; Li, 2015; Peijie vd., 1996; Hafız ve Kobayashi, 1994). Çoğu ticarileşmiş olan bu alaşımlar uygulamada içten yanmalı motorların, elektrik rotorlarının, jet motorlarının, pompa gövdelerinin, silindir kafalarının, pistonların, dişli kutularının, yüksek basınca ve korozyona dayanım gerektiren uygulamalardaki bazı parçaların, sıvı ve gaz depolama amaçlı üretilen tankların, kompresörlerin, kamyon ve otobüs şaselerinin, burçların, mil yataklarının, karterlerin, konveyörlerin imalatlarında başarı ile kullanılmaktadır (Davis, 2001).

Al-Si esaslı alaşımlar dünyanın çeşitli bölgelerinde farklı şekillerde sınıflandırılmakla birlikte ülkemizdeki sınıflandırmaları Avrupa Birliği mevzuatından uyarlanan TS EN 1706:2010-07 standardına göre yapılmaktadır. Bu standarda (TS EN 1706, 2010) göre söz konusu alaşımlar AlSi, AlSiMgTi, AlSi7Mg, AlSi10Mg, AlSi5Cu,

AlSi9Cu, AlSi(Cu), AlSiCuNiMg, AlMg, AlZnSiMg ana alaşım grupları altında kimyasal bileşimleri, uygulanan ısıl işlem ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca Al-Si alaşımları içerdikleri silisyum miktarına göre ötektik bileşim oranı olan %12,6'dan az miktarda silisyum içeriyorsa ötektik altı, çok miktarda silisyum içeriyorsa ötektik üstü, %12 civarında silisyum içeriyorsa ötektik veya yakın ötektik bileşim esaslı alaşım olarak da sınıflandırılmaktadır (Davis, 2001; Gao vd., 2012; Peijie, 1996). Bu alaşımların sertlikleri ve mekanik özellikleri kimyasal bileşimlerine, üretim yöntemlerine ve uygulanan ısıl işleme göre farklılık göstermektedir (TS EN 1706, 2010; ASM Handbook Committee, 1990; Davis, 2001).

Günümüzde Al-Si alaşımları üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları bu alaşımların yapısal özellikleri ile birlikte sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinin daha da geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış olup, çeşitli alaşım elementi katkıları, ısıl işlem ve/veya üretim teknikleriyle söz konusu özelliklerinin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir (Mohamed vd., 2013; Tebib vd., 2014; Shaha vd., 2015a; Shaha vd., 2015b; Choi, vd., 2014; Ye, 2003; Peijie vd., 1996; Shin vd., 2011; Nakayama vd., 1998; Sui vd., 2015; Nogita vd., 2013; Hwang vd., 2008; Shabestari ve Moemeni, 2004; Liang vd., 2013; Gao vd., 2012; Yue vd., 1995; Li, 2014; Gholizadeh ve Shabestari, 2011). Bu çalışmalarda özellikle bakır, nikel, çinko, vanadyum, demir ve zirkonyum gibi alaşım elementlerinin Al-Si alaşımlarının sertlik ve mukavemetlerini artırdığı grlmştr. Ancak, yoğunlukları alüminyum ve silisyumun yoğunluğundan çok fazla olan bu alaşım elementleri Al-Si alaşımlarında yoğunluk artışına sebep olmakta ve dolayısıyla özgül mukavemetlerini olumsuz etkilemektedir. Döküm sonrası ısıl işlem uygulama yoluyla da Al-Si esaslı alaşımlarının sertlik, mukavemet ve süneklik değerleri belirli oranlarda iyileştirilebilmekte, ancak bu yöntem hem ek bir maliyete hem de zaman kaybına yol açmaktadır (Davis, 2001; Ding, 2015; Li, 2006; Li, 2015; Li, 2016; Jung, 2009; Nakayama vd., 1998; Tavitas-Medrano, 2010). Dkmlerinde çekirdeklenmeyi artırıcı, tane küçültücü, dendirit kol mesafesini azaltıcı veya ötektik silisyum parçacıklarının Őekillerini veya dağılımlarını değiştirecek etkiye yol açan elementler kullanma veya dökümlerinden sonra hızlı soğutmayla da Al-Si esaslı alaşımlarında daha üstün yapısal veya mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Choi vd., 2014; Davis, 2001; Hafiz ve Kobayashi, 1994; Nogita vd., 2013; Yue, 1995; Zhao, 2001; Wang, 2001). Bu konuda yapılan çalışmalar sodyum, stronsiyum, fosfor, kükürt, molibden, niobiyum, titanyum,

bor, vanadyum ve zirkonyum gibi elementlerin bazı Al-Si alaşımlarında modifiye edici ve tane inceltici dolayısıyla yapısal ve mekanik özellikleri iyileştirici etkiye sahip elementlerin başında geldiğini göstermiştir (Chen vd.,2015; Jones ve Pearson, 1976; Wu vd., 2016; Guangyuan vd., 2016; Birol, 2013; Davis, 2001). Söz konusu alaşımların döküm sonrası hızlı soğutulmaları bir başka deyişle hızlı bir şekilde katılaştırılmalarının ise içyapılarındaki primer silisyum parçacıklarının boyutlarını küçülterek Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirdiği görölmüştür (Yamagata vd., 2008a ve 2008b).

Al-Si esaslı alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konusunda pek çok araştırma çalışması yapılmasına rağmen, tane inceltici etkiye sahip borun, özellikle ötektik silisyum parçacıklarını modifiye eden stronsiyumun ve alüminyum içerisinde çözünen magnezyumun ötektik, ötektik altı ve üstü bileşim esaslı Al-Si alaşımlarının içyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin bir arada sistematik olarak incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yakın ötektik, ötektik altı ve ötektik üstü bileşime sahip bir Al-Si alaşımı seçerek bu alaşımın yapısal ve mekanik özelliklerine bor veya stronsiyum ve magnezyumun etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

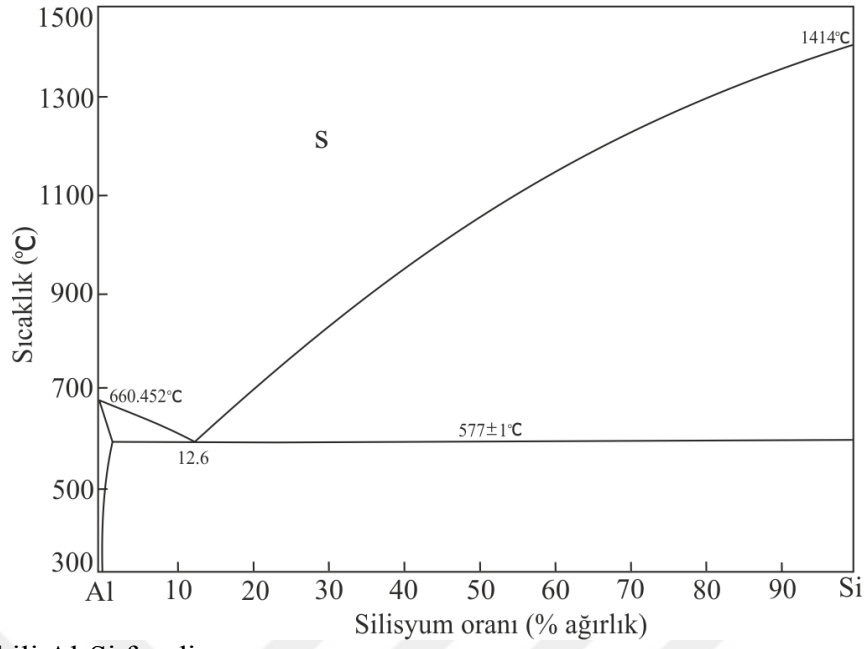
1.2. Literatür Özeti

1.2.1. İkili Al-Si, Al-B, Al-Sr ve Al-Mg Faz (Denge) Diyagramları

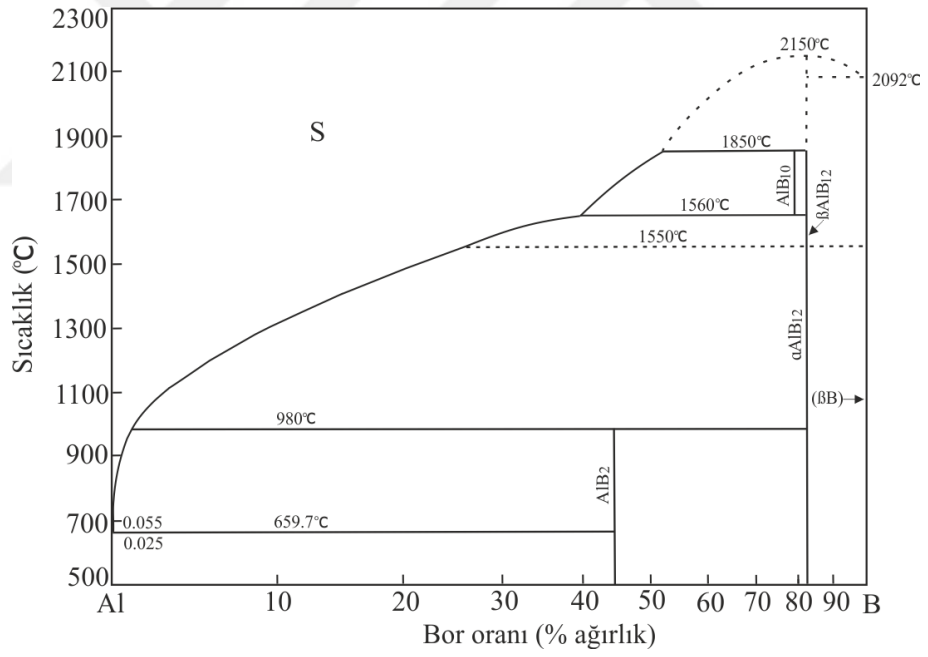
İkili Al-Si faz (denge) diyagramı (ASM Handbook Committee, 1990) şekil 1’de verilmiştir. Bu diyagramda silisyumun alüminyum içerisinde oda sıcaklığındaki çözünebilirliğinin çok düşük olduğu, ancak artan sıcaklıkla bu çözünebilirliğin artarak 577 °C’de yaklaşık %2 seviyelerine kadar ulaştığı görölmektedir. Bu diyagram ayrıca sıvı durumda birbiri içerisinde tamamen çözünmüş durumda bulunan alüminyum ve silisyumun %12,6 silisyum oranında ve 577 °C sıcaklıkta ötektik dönüşüm ile katılaştığını göstermektedir. Al-B, Al-Sr, Al-Mg, Si-B, Si-Sr ve Mg-Si denge diyagramları (ASM Handbook Committee, 1990; M. Medraj vd., 2007; Okamoto, 1993) sırasıyla şekil 2, 3, 4, 5 ve 7’de verilmiştir. Bu diyagramlardan sıvı durumda alüminyum ile bor, stronsiyum ve magnezyumun, silisyum ile bor ve stronsiyumun

birbiri içerisinde tamamen çözüldüğü anlaşılmaktadır, Şekil 2-6. Katı durumda ise oda sıcaklığında hem bor ve stronsiyumun alüminyum içerisinde hem de alüminyumun bor ve stronsiyum içerisinde çözünmediği görülmektedir (Şekil 3). Alüminyum ve magnezyum ise bir birleri içerisinde %1 oranına kadar çözünebilmektedir, Şekil 4. Magnezyumun alüminyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü 450 °C'de %17, alüminyumun magnezyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü ise 437 °C'de %13 olmaktadır. Silisyum ile borun katı durumda bir biri içerisinde çözünmediği, silisyumun içerisinde stronsiyum çözünmez iken, stronsiyum içerisinde ise azda olsa silisyum çözünebildiği görülmektedir (Şekil 5 ve 6).

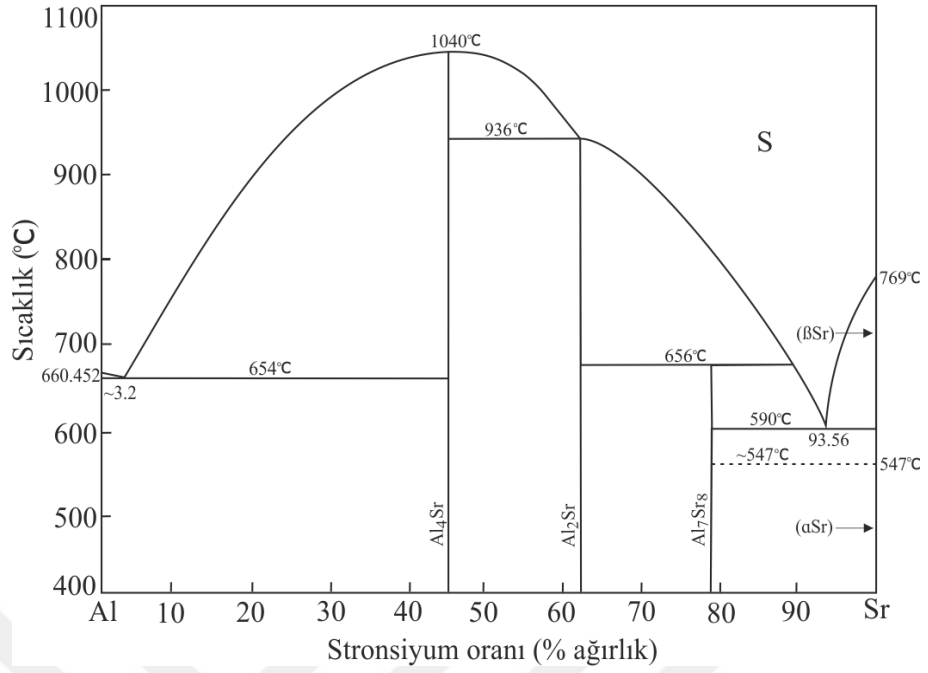
İkili denge diyagramlarına göre bor, stronsiyum ve magnezyum elementlerinin üçünün de alüminyum ile bileşik oluşturduğu görülmektedir, Şekil 2-4. Şöyle ki; bor %67 ve 92 oranlarında sırasıyla AlB_2 ve AlB_{12} bileşiklerini, stronsiyum yaklaşık olarak %45, 62 ve 79 oranlarında sırasıyla Al_4Sr , Al_2Sr ve Al_7Sr_8 bileşiklerini, magnezyum ise yaklaşık olarak %36-38 ve %58 oranlarında sırasıyla Al_3Mg_3 ve $Al_{12}Mg_{17}$ arafaz veya bileşiklerini oluşturmaktadır. Diğer taraftan denge şartları altında soğuma durumunda silisyumun bor ve stronsiyum ile SiB_3 , SiB_6 , SiB_n , Si_2Sr , $SiSr$ ve $SiSr_2$ bileşiklerini oluşturabildiği görülmektedir (Şekil 5 ve 6). İkili Mg-Si faz diyagramında bu iki elementin sıvı durumda birbiri içerisinde tamamen çözüldüğü ve bu sıvı fazın 637,5 °C sıcaklık ve %1,34 silisyum oranında ötektik dönüşüm ile magnezyum ve Mg_2Si fazına, 945,6 °C sıcaklık ve %57 silisyum oranında ise yine ötektik dönüşüm ile Mg_2Si ve Si fazlarına dönüştüğü görülmektedir, Şekil 7.



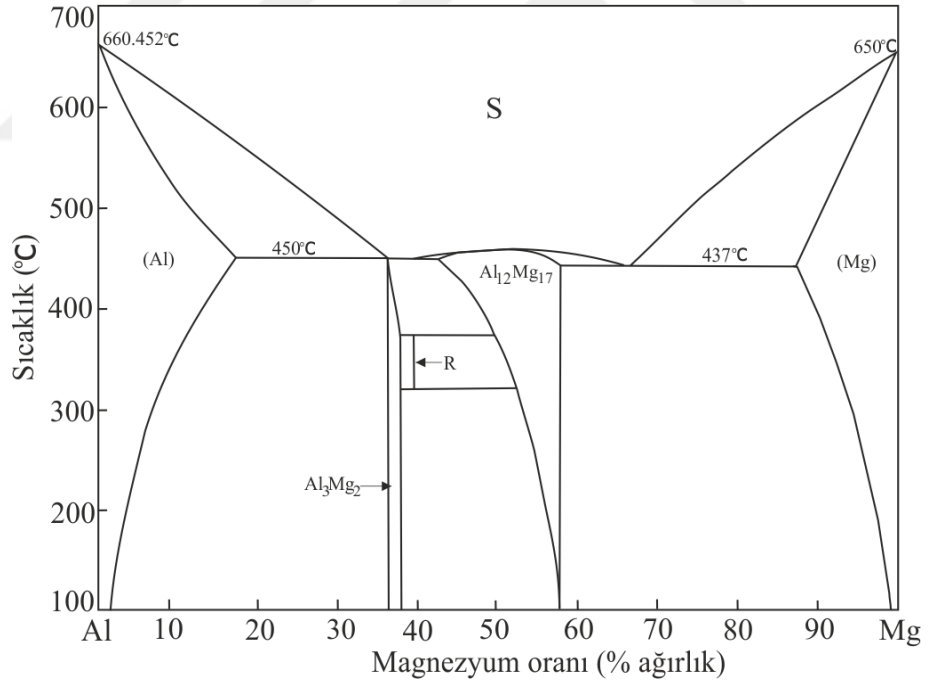
Şekil 1. İkili Al-Si faz diyagramı.



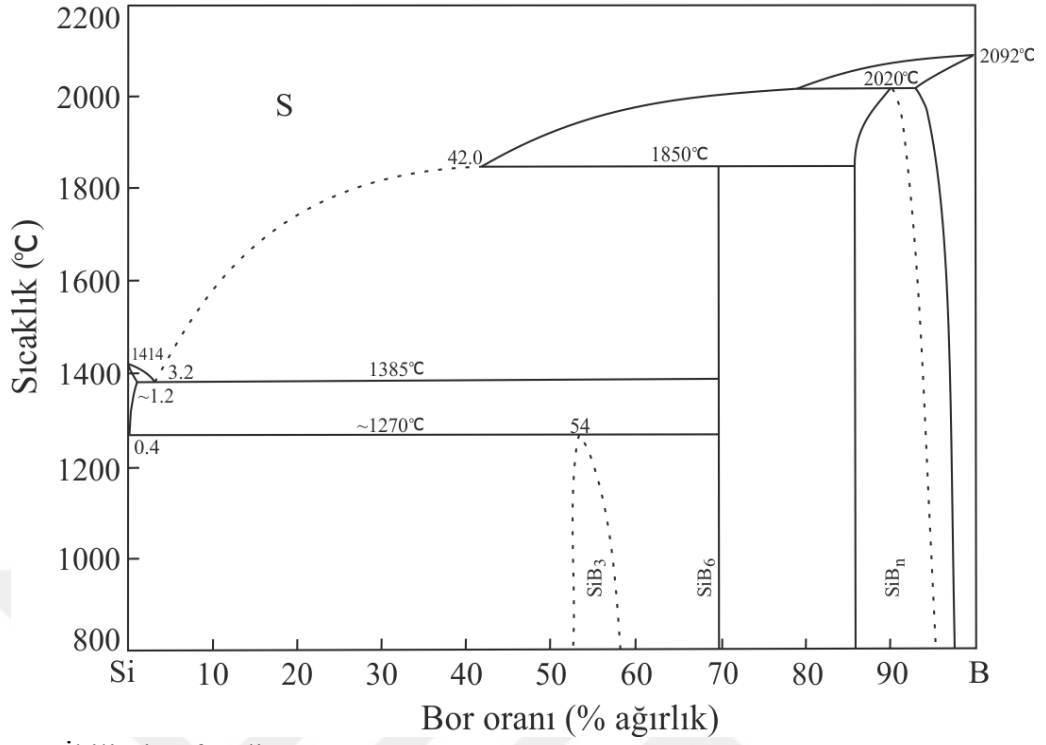
Şekil 2. İkili Al-B faz diyagramı.



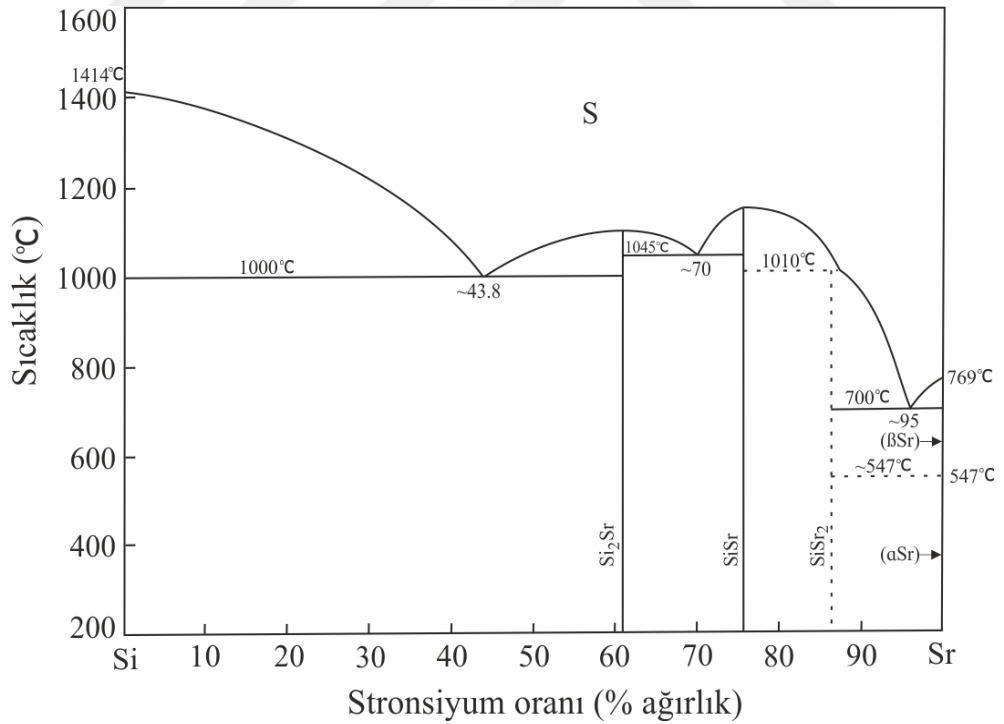
Şekil 3. İkili Al-Sr faz diyagramı.



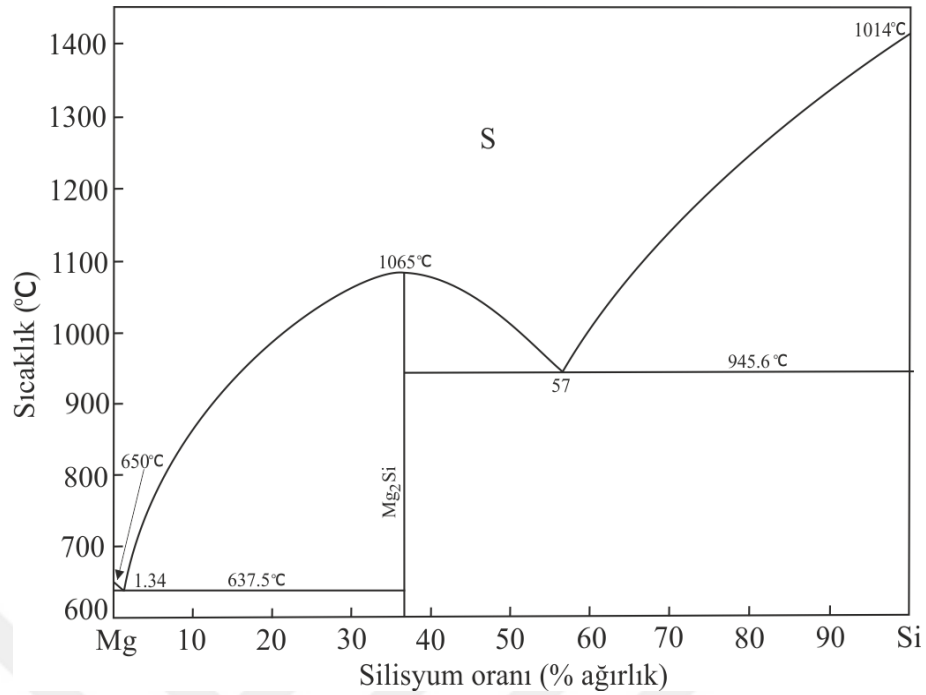
Şekil 4. İkili Al-Mg faz diyagramı.



Şekil 5. İkili Si-B faz diyagramı.



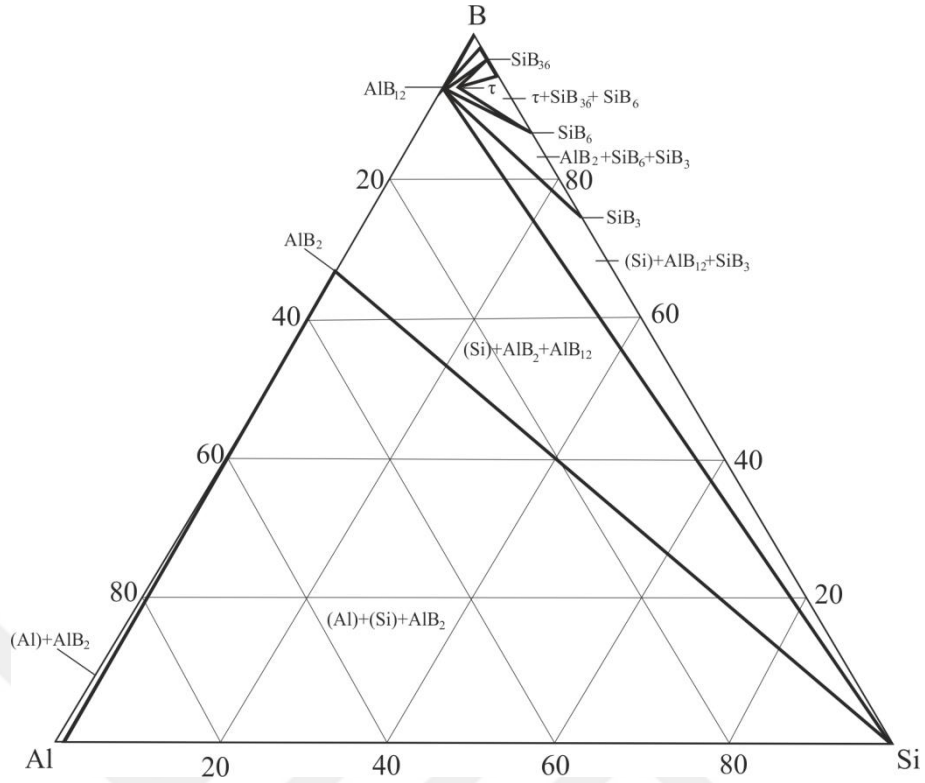
Şekil 6. İkili Si-Sr faz diyagramı.



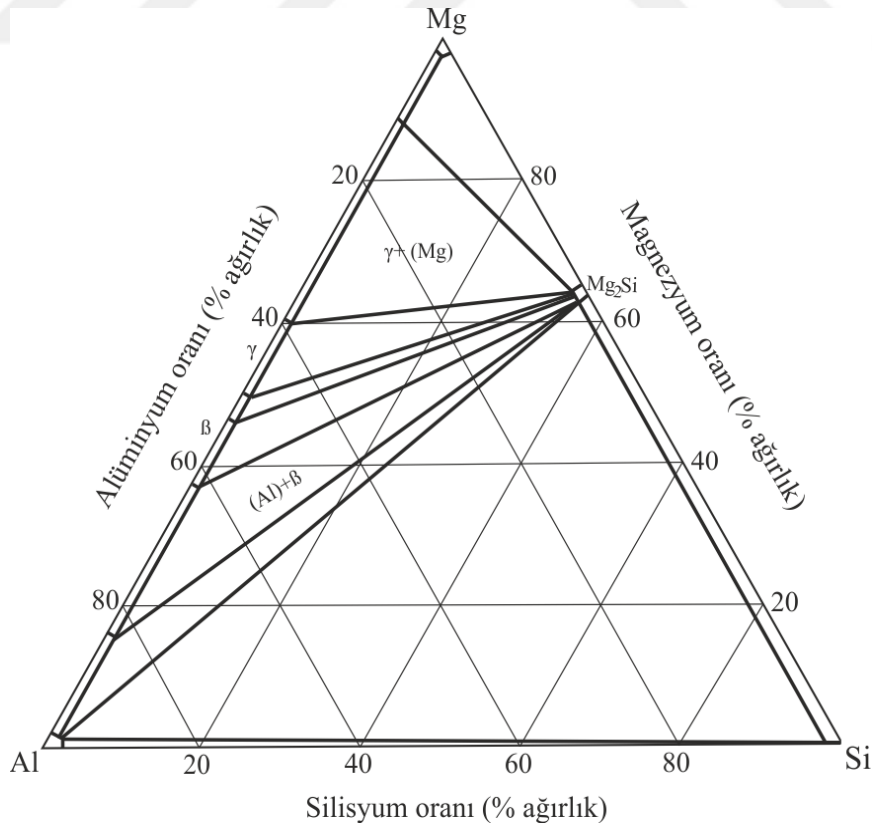
Şekil 7. İkili Mg-Si faz diyagramı.

1.2.2. Al-Si-B, Al-Si-Sr, Al-Si-Mg ve Al-Sr-Mg Üçlü Sistemlerinin Sabit Sıcaklıktaki Kesitleri

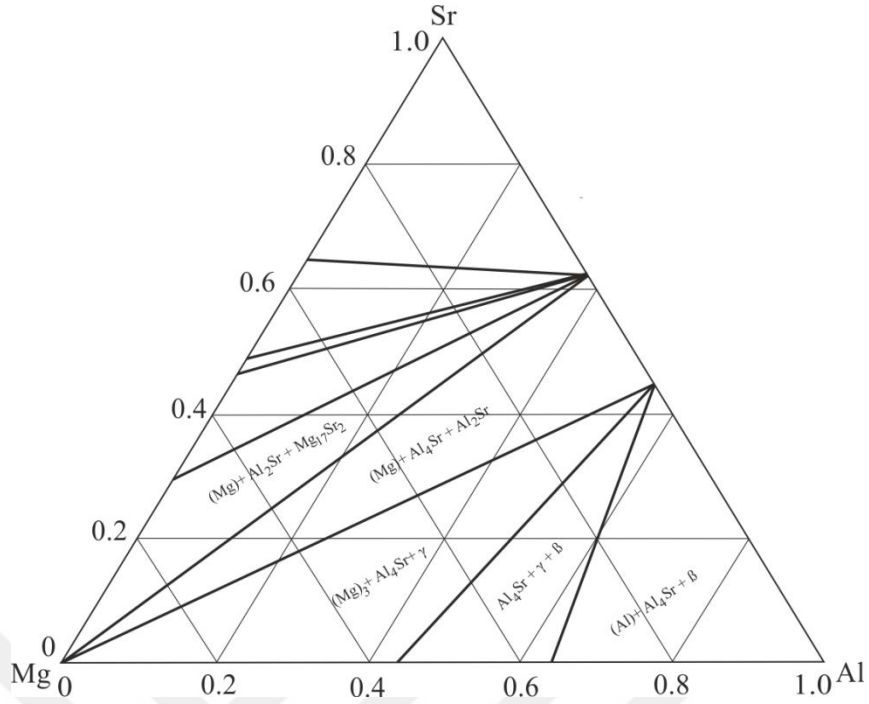
Üçlü Al-Si-B, Al-Sr-Mg, Al-Si-Mg, Al-Si-Sr ve Si-Mg-Sr sistemlerine ait faz diyagramları henüz tam olarak ortaya koyulamamıştır. Ancak bu sistemlerin bazı araştırmacılar (Effenberg ve Ilyenko, 2009; Garay-Tapia vd., 2012; ASM, 1990; Medraj vd., 2007) tarafından ortaya koyulan belli sıcaklıklardaki kesitleri sırasıyla Şekil 8-12'de verilmektedir. Al-Si-Sr üçlü sistemi hariç olmak üzere diğer kesitlerde Al, Si, B, Sr ve Mg elementleri arasında üçlü veya daha çoklu her hangi bir bileşiğin oluşmadığı, ancak ikili faz diyagramlarında olduğu görülen bileşiklerin söz konusu elementler ile birlikte yer aldığı çoklu faz bölgelerinin olduğu görülmektedir (Şekil 8-10). Al-Si-Sr sisteminde ise ikili faz diyagramlarında görülen faz bölgeleri ve/veya bileşiklere ilave olarak üçlü Al-Si-Sr bileşikleri yer almaktadır (Şekil 11). Üçlü Si-Mg-Sr sistemi incelendiğinde ise magnezyumun stronsiyum ve silisyum ile ikili ve üçlü farklı bileşikler oluşturabildiği ve bu bileşiklerin biri veya bir kaçını birden içeren faz bölgelerinin oluşabildiği görülmektedir, (Şekil 12).



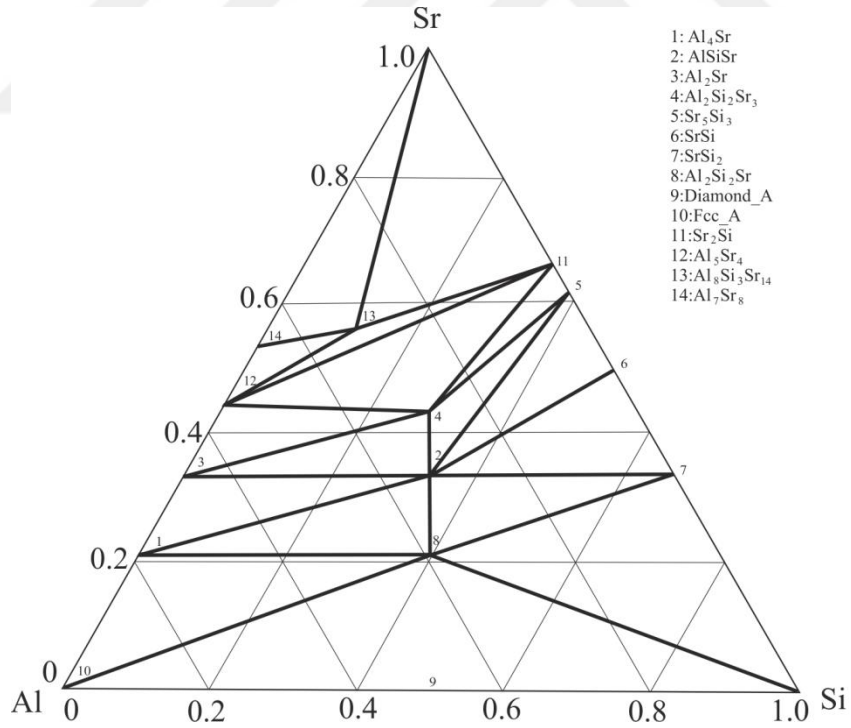
Şekil 8. Al-Si-B üçlü sisteminin 500 °C sıcaklıktaki kesiti (Effenberg ve Ilyenko, 2009).



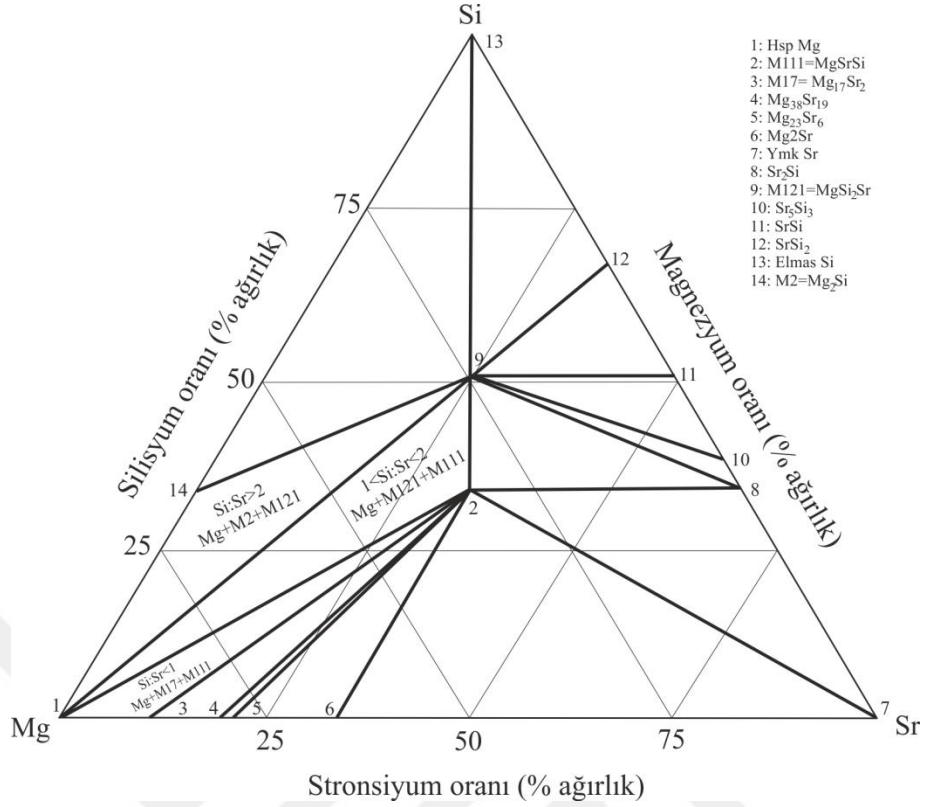
Şekil 9. Üçlü Al-Si-Mg sisteminin 430 °C sıcaklıktaki kesiti (ASM International, 1990).



Şekil 10. Al-Sr-Mg üçlü sisteminin 25 °C sıcaklıktaki kesiti (Medraj vd., 2007).



Şekil 11. Al-Si-Sr üçlü sisteminin sabit sıcaklıktaki kesiti (Garay-Tapia vd., 2012).



Şekil 12. Mg-Si-Sr üçlü sisteminin 300 °C sıcaklıktaki kesiti (ASM International, 1990).

1.2.3. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Sınıflandırılması ve Kimyasal Bileşimleri

Yaygın olarak kullanılan ve ticarileşmiş alüminyum-silisyum döküm alaşımlarının TS EN 1706 standardına göre sınıflandırılması ve kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu sınıflandırmada söz konusu alaşımlar AlSiMgTi, AlSi7Mg, AlSi10Mg, AlSi, AlSi5Cu, AlSi9Cu, AlSi(Cu), AlSiCuNiMg ve AlMg esaslı alaşımlar gruplandırılmış olup, bu gruplar altında kimyasal bileşimlerine göre ayrı ayrı isimlendirilmektedirler, (Tablo 1). Söz konusu tabloda her bir elementin sembolünün önünde yer alan sayı o elementin alaşım içerisindeki ağırlıkça yüzde oranını belirtmektedir. Al-Si esaslı alaşımlar bilimsel olarak ikili Al-Si faz diyagramındaki ötektik bileşim oranına (ağırlıkça % 87,4 alüminyum, %12,6 silisyum) göre ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü bileşim esaslı olarak da sınıflandırılabilirler (Davis, 2001; Gao vd., 2012; Peijie, 1996). Standartlaştırılmış alaşımların hepsinde düşük oranlarda da olsa demir (Fe), bakır (Cu), mangan (Mn), magnezyum (Mg), çinko (Zn) ve titanyum (Ti) olduğu görülmektedir. Tablo 1’de verilen alaşımlardan sadece AlSi6Cu4 ve

AlSi12(Cu) aşımalarının krom (Cr) içerdığı görülmektedir. Nikel (Ni), kurşun (Pb), kalay (Sn) elementleri AlSi9Cu grubunda yer alan aşımaların tümünde bulunurken, diğer grupların altında yer alan aşımaların bazılarında veya hiçbirinde bulunmamaktadır.

Standartlaşma süreci henüz tamamlanmamış ancak üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmaları yoğun bir şekilde devam eden bazı alüminyum-silisyum aşımalarına belli oranlarda vanadyum, zirkonyum, sodyum, stronsiyum, fosfor, kükürt, molibden, niobyum, bor ve vanadyum gibi elementlerin modifiye edici ve/veya tane inceltici olarak ilave edildiği bilinmektedir (Chen vd.,2015; Jones ve Pearson, 1976; Wu vd., 2016; Guangyuan vd., 2016; Birol, 2013; Davis, 2001).

Alüminyum-silisyum aşımalarının kimyasal bileşimleri her katkı elementinin farklı kabiliyetler kazandırması nedeniyle, özellikle gerek duyulan yapısal özellikler, sertlik ve mukavemet özellikleri, ısıl işlem durumu, süneklik özellikleri ve tribolojik özelliklere göre tasarlanmaktadır.

Tablo 1. Bazı ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri (TS EN 1706, 2010).

Alaşım grubu	Kimyasal gösterim	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Diğerleri		Alüminyum
													Herbiri	Toplam	
AlSiMgTi	AlSi2MgTi	1,6-2,4	0,60 (0,50)	0,10 (0,08)	0,30-0,50	0,45-0,65 (0,50-0,65)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05-0,20 (0,07-0,15)	0,05	0,15	Kalan
AlSi7Mg	AlSi7Mg	6,5-7,5	0,55 (0,45)	0,20 (0,15)	0,35	0,20-0,65 (0,25-0,65)	-	0,15	0,15	0,15	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Kalan
	AlSi7Mg0,3	6,5-7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25-0,45 (0,30-0,45)	-	-	0,07	-	-	0,25 (0,18)	0,03	0,10	Kalan
	AlSi7Mg0,6	6,5-7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45-0,70 (0,50-0,70)	-	-	0,07	-	-	0,25 (0,18)	0,03	0,10	Kalan
AlSi10Mg	AlSi10Mg	9,0-11,0	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	0,20-0,45 (0,25-0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Kalan
	AlSi10Mg	9,0-11,0	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	0,20-0,45 (0,25-0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Kalan
	AlSi10Mg(Cu)	9,0-11,0	0,65 (0,55)	0,35 (0,30)	0,55	0,20-0,45 (0,25-0,45)	-	0,15	0,35	0,10	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Kalan
AlSi	AlSi9Mg	9,0-10,0	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25-0,45 (0,30-0,45)	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,10	Kalan
	AlSi11	10,0-11,8	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,10	Kalan
	AlSi12	10,5-13,5	0,65 (0,55)	0,15 (0,10)	0,55	0,10	-	0,10	0,15	0,10	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Kalan
	AlSi12	10,5-13,5	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,35	-	-	-	0,10	-	-	0,15	0,05	0,15	Kalan
	AlSi9	8,0-11,0	0,65 (0,55)	0,10 (0,08)	0,50	0,10	-	0,05	0,15	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Kalan

Tablo 1 (Devam) Bazı ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri (TS EN 1706, 2010).

Alaşım grubu	Kimyasal gösterim	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Diğerleri		Alüminyum
													Herbiri	Toplam	
AlSi5Cu	AlSi6Cu4	5,0-7,0	1,0 (0,9)	3,0 - 5,0	0,20-0,65	0,55	0,15	0,45	2,0	0,30	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,35	Kalan
	AlSi5Cu1Mg	4,5-5,5	0,65 (0,55)	1,0 - 1,5	0,55	0,35-0,65 (0,40-0,65)	-	0,25	0,15	0,15	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Kalan
	AlSi7Cu0,5Mg	6,5-7,5	0,25	0,2 - 0,7	0,15	0,20-0,45 (0,25-0,45)	-	-	0,07	-	-	0,20	0,03	0,10	Kalan
AlSi9Cu	AlSi8Cu3	7,5-9,5	0,8 (0,7)	2,0 - 3,5	0,15-0,65	0,05-0,55 (0,15-0,55)	-	0,35	1,2	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Kalan
	AlSi9Cu1Mg	8,3-9,7	0,8 (0,7)	0,8 - 1,3	0,15-0,55	0,25-0,65 (0,30-0,65)	-	0,20	0,8	0,10	0,10	0,20 (0,18)	0,05	0,25	Kalan
	AlSi7Cu2	6,0-8,0	0,8 (0,7)	1,5 - 2,5	0,15-0,65	0,35	-	0,35	1,0	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Kalan
AlSi(Cu)	AlSi12(Cu)	10,5-13,5	0,8 (0,7)	1,0 (0,9)	0,05-0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Kalan
14 AlSiCuNiMg	AlSi12CuNiMg	10,5-13,5	0,7 (0,6)	0,8 - 1,5	0,35	0,8-1,5 (0,9-1,5)	-	0,7 - 1,3	0,35	-	-	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Kalan
	AlSi17Cu4Mg	16,0-18,0	1,3 (1,0)	4,0 - 5,0	0,50	0,25-0,65 (0,45-0,65)	-	0,3	1,5	-	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Kalan
AlMg	AlMg3	0,55 (0,45)	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	2,5-3,5 (2,7-3,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Kalan
	AlMg5	0,55 (0,35)	0,55 (0,45)	0,10 (0,05)	0,45	4,5-6,5 (4,8-6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Kalan
	AlMg5(Si)	1,5 (1,3)	0,55 (0,45)	0,05 (0,03)	0,45	4,5-6,5 (4,8-6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Kalan

Not: Aralık verilmeyen değerler maksimum miktarı belirtmektedir.

1.2.4. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Bazı ticari Al-Si alaşımlarının kimyasal bileşimlerine göre dökülmüş ve ısıl işlem uygulanmış durumdaki sertlik, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu tablodan, alüminyum-silisyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerinin başta silisyum olmak üzere alaşım elementlerinin oranına, üretimlerinde kullanılan yöntem ve uygulanan ısıl işleme göre farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu alaşımların mekanik özelliklerinin dökümlerinden sonraki katılaşma şartlarına da bağlı olduğu bilinmektedir (Li vd., 2002; Sui vd., 2015; Cai vd., 2015; Drar ve Svensson, 2006; Xu vd., 2006). Al-Si alaşımlarında silisyum oranı arttıkça sertlik artmakta kopma uzaması ise azalmaktadır (TS EN 1706, 2010). Söz konusu alaşımların çekme dayanımı değerleri ise %9 silisyum oranına kadar artmakta bu orandan sonra ise azalmaktadır (TS EN 1706, 2010). Bileşimindeki silisyum oranına bağlı olarak ikili Al-Si alaşımlarına düşük oranlarda (%0,01-5) yapılan demir, bakır, magnezyum, bor, stronsiyum, titanyum, vanadyum, neodmiyum, çinko, mangan, krom, zirkonyum ve bizmut gibi alaşım elementi ilavelerinin ikili bu alaşımların sertlik ve/veya mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Davis, 2001; Dong vd., 1999; Huter vd., 2016; Huter vd., 2016; Caceres vd., 1999; Chen vd., 2012; Wang vd., 2016; Oh vd., 2010; Meng vd., 2013; Shi vd., 2010; Alemdağ ve Beder, 2014; Farahany vd., 2015). Bu alaşım elementlerinden demir, bakır, vanadyum, magnezyum, mangan, krom, zirkonyum ve çinko katı çözelti sertleşmesi, ikincil faz çökmesi ve/veya pekleşme yoluyla mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadır (Dong vd., 1999; Huter vd., 2016; Meng vd., 2013; Caceres vd., 1999; Alemdağ ve Beder, 2014; Davis, 2001). Bor, titanyum, stronsiyum, antimon, sodyum, kalsiyum, bizmut ve neodmiyum ise tek başına veya birlikte %1’den çok daha düşük oranlarda Al-Si alaşımlarına katıldıklarında söz konusu alaşımların içyapısında bulunan fazlarda tane incelmeye ve modifikasyona yol açarak suretiyle mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadır (Chen vd., 2012; Oh vd., 2010; Wang vd., 2016; Farahany vd., 2015; Shi vd., 2010; Davis, 2001). Al-Si esaslı alaşımların mekanik özellikleri döküm yöntemi ve dökümden sonraki katılaşma şartlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şöyle ki; kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilen veya döküm sonrası hızlı soğutulan Al-Si alaşımları kum kalıba döküm yöntemiyle üretilenlere ve döküm sonrası normal şartlarda soğutulanlara göre daha

yüksek akma ve çekme mukavemeti sergilemektedir (Davis, 2001; TS EN 1706, 2010; Sui, 2015; Timelli vd., 2014; Cai vd., 2015; Li vd., 2002; Drar ve Svensson, 2006; Xu vd., 2006; Kaygısız ve Maraşlı, 2015). Bu durum hızlı soğuma nedeniyle katılaştırmanın daha fazla çekirdek etrafında gerçekleşmesine ve tane boyutlarının veya dendirit kol mesafelerinin daha düşük olmasına dayandırılarak açıklanmaktadır (Davis, 2001; TS EN 1706, 2010; Sui, 2015; Timelli vd., 2014; Cai vd., 2015; Li vd., 2002; Drar ve Svensson, 2006; Xu vd., 2006; Kaygısız ve Maraşlı, 2015; Aguilera-Luna vd., 2014). Al-Si esaslı alaşımların sertlik, mukavemet ve süneklikleri ısıtma işlemi uygulanmasıyla geliştirilebilmektedir (ASM Handbook Committee, 2016; Davis, 2001; TS EN 1706, 2010). Söz konusu ısıtma işlemlerinin standartlaşmış olanları veya en yaygın olanları, tavlama, dökümden sonra kontrollü soğutma ve doğal yaşlandırma (T1), çözündürme ve doğal yaşlandırma (T4), dökümden sonra kontrollü soğutma ve yapay aşırı yaşlandırma (T5), çözündürme ve yapay yaşlandırma (T6) ve çözündürme ve aşırı yaşlandırma (T7) ısıtma işlemleridir (ASM Handbook Committee, 2016; Davis, 2001; TS EN 1706, 2010). Bu ısıtma işlemlerinden özellikle T4, T5 ve T6 özellikle sertlik ve mukavemeti artırma amaçlı uygulanırken, diğerleri ise daha kararlı içyapı elde etme ve sünekliği artırma amaçlı uygulanmaktadır (ASM Handbook Committee, 2016; Davis, 2001; TS EN 1706, 2010). Ancak, sertlik ve mukavemetin artmasını sağlayan döküm sonrası hızlı soğutma (katılaştırma) ve ısıtma işlemleri Al-Si alaşımlarının yapısal kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, Al-Si esaslı alaşımların mekanik özelliklerini geliştirme konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar tane inceltme veya modifikasyon ve katı çözümleri sertleşmesi mekanizmaları yoluyla mukavemet artırma üzerinde yoğunlaşmıştır (Alipour vd., 2012; Caceres vd., 1999; Choi vd., 2014; Davis, 2001; Kori vd., 2000; Liao vd., 2002; Alemdağ ve Beder, 2014; Timpel vd., 2012; Guzowski vd., 1987; Darlapudi vd., 2016; Salleh vd., 2015). Söz konusu çalışmalarda Al-Si alaşımlarının yoğunluğunu olumsuz etkilemeyen bor, stronsiyum ve magnezyumun gibi bazı elementlerin Al-Si alaşımlarının sertlik ve mukavemetini bu mekanizmalar yoluyla önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Alipour vd., 2012; Caceres vd., 1999; Choi vd., 2014; Davis, 2001; Kori vd., 2000; Liao vd., 2002; Timpel vd., 2012; Guzowski vd., 1987; Darlapudi vd., 2016; Salleh vd., 2015). Ancak ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü Al-Si alaşımlarının hem yapısal hem de mekanik özelliklerine bor veya stronsiyum ile magnezyumun etkilerinin sistematik olarak incelenip ortaya koyulduğu bir çalışma

bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü Al-Si alaşımlarının hem yapısal hem de mekanik özelliklerine bor veya stronsiyum ile magnezyumun etkilerinin sistematik olarak incelenip ortaya koyulması amaçlanmıştır.

Tablo 2. Al-Si esaslı bazı alaşımların mekanik özellikleri (TS EN 1706, 2010).

Alaşım grubu	Kimyasal gösterim	Isıl işlem	Çekme dayanımı (MPa, min.)		Akma dayanımı (MPa, min.)		Kopma uzaması (% , min.)		Brinell sertlik değeri (BSD, min.)		
			Kum döküm	Kokil döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Kum döküm	Kokil döküm	
AlSiMgTi	Al Si2MgTi	D	140	170	70	70	3	5	50	50	
		T6	240	260	180	180	3	5	85	85	
AlSi7Mg	Al Si7Mg	D	140	170	80	90	2	2,5	50	55	
		T6	220	260	180	220	1	1	75	90	
		T6	230	290	190	210	2	4	75	90	
AlSi10Mg	Al Si7Mg0,3	T6	250	320	210	240	1	3	85	100	
		T6	250	320	210	240	1	3	85	100	
	Al Si10Mg(a)	D	150	180	80	90	2	2,5	50	55	
		T6	220	260	180	220	1	1	75	90	
Al Si10Mg(b)	Al Si10Mg(b)	D	150	180	80	90	2	2,5	50	55	
		T6	220	260	180	220	1	1	75	90	
	Al Si10Mg(Cu)	D	160	180	80	90	1	1	50	55	
		T6	220	240	180	200	1	1	75	80	
AlSi	Al Si9Mg	T6	230	290	190	210	2	4	75	90	
		Al Si11	D	150	170	70	80	6	7	45	45
			D	150	170	70	80	4	5	50	55
			D	150	170	70	80	5	6	50	55
AlSi5Cu	Al Si9	D	170	180	80	90	4	5	50	55	
		Al Si6Cu4	D	150	170	90	100	1	1	60	75
			T4	170	230	120	140	2	3	80	85
		T6	230	280	200	210	< 1	< 1	100	110	
AlSi9Cu	Al Si7Cu0,5Mg	T6	250	320	190	240	1	4	85	100	
		Al Si8Cu3	D	150	170	90	100	1	1	60	75
			D	135	170	90	100	1	1	60	75
			D	150	170	90	100	1	1	60	75
AlSi(Cu)	Al Si7Cu2	D	150	170	90	100	1	1	60	75	
		D	150	170	90	100	1	2	50	55	
AlMg	Al Si12(Cu)	D	150	170	80	90	1	2	50	55	
		Al Mg3	D	140	150	70	70	3	5	50	50
			D	160	180	90	100	3	4	55	60
D	160	180	100	110	3	3	60	65			

D: Dökülmüş durumda.

T4: Çözündürme ve doğal yaşlandırma uygulanmış.

T6: Çözündürme ve yapay yaşlandırma uygulanmış.

a: Modifiye edici element içermemektedir.

b: Mg oranı $\geq 3\%$ olması durumunda Be maksimum % 0,005 olabilir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

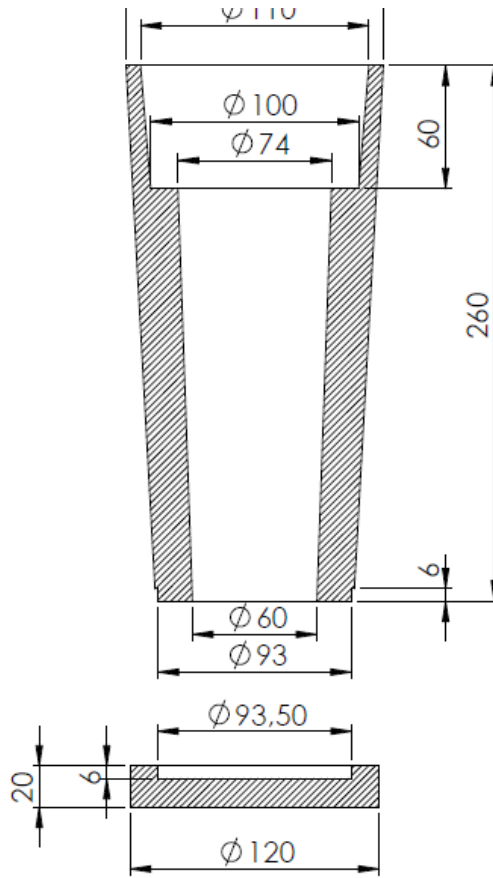
2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Bileşimleri

Bu çalışmada üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 3. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri.

Alaşım	Ağırlıkça element oranı (%)				Alüminyum
	Silyum	Bor	Stronsiyum	Magnezyum	
Al-5Si	5	-	-	-	Kalan
Al-7Si	7	-	-	-	Kalan
Al-9Si	9	-	-	-	Kalan
Al-12Si	12	-	-	-	Kalan
Al-15Si	15	-	-	-	Kalan
Al-17Si	17	-	-	-	Kalan
Al-20Si	20	-	-	-	Kalan
Al-12Si-0,01B	12	0,01	-	-	Kalan
Al-12Si-0,05B	12	0,05	-	-	Kalan
Al-12Si-0,10B	12	0,10	-	-	Kalan
Al-12Si-0,25B	12	0,25	-	-	Kalan
Al-12Si-0,50B	12	0,50	-	-	Kalan
Al-12Si-1,0B	12	1,00	-	-	Kalan
Al-12Si-0,02Sr	12	-	0,02	-	Kalan
Al-12Si-0,04Sr	12	-	0,04	-	Kalan
Al-12Si-0,06Sr	12	-	0,06	-	Kalan
Al-12Si-0,08Sr	12	-	0,08	-	Kalan
Al-12Si-0,1Sr	12	-	0,1	-	Kalan
Al-12Si-0,2Sr	12	-	0,2	-	Kalan
Al-12Si-0,5Sr	12	-	0,5	-	Kalan
Al-12Si-1,0Sr	12	-	1,0	-	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,2Mg	12	-	0,1	0,2	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,3Mg	12	-	0,1	0,3	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,4Mg	12	-	0,1	0,4	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg	12	-	0,1	0,6	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,8Mg	12	-	0,1	0,8	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-1,0Mg	12	-	0,1	1,8	Kalan
Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg	12	0,05	0,1	0,6	Kalan
Al-9Si-0,1Sr	9	-	0,1	-	Kalan
Al-17Si-0,1Sr	17	-	0,1	-	Kalan
Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg	9	-	0,1	0,6	Kalan
Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg	17	-	0,1	0,6	Kalan

İncelenen alaşımların üretiminde uygun kimyasal bileşimi (ağırlıkça) verecek oranda alüminyum (Al: %99,80), silisyum (%99,9), magnezyum (%99,9) ile Al-8B ve Al-15Sr alaşımları kullanıldı. Alaşımların üretilmesi için belirlenen miktarlardaki alaşım elementleri bir indüksiyonlu ergitme ocağında ergitilerek karıştırıldı. Sıvı durumdaki alaşımlar kimyasal bileşimlerine göre belirlenen uygun döküm sıcaklıklarından (650-750°C), oda sıcaklığında tutulan ve teknik resmi Şekil 13’de verilen SAE 8620 çeliğinden üretilmiş olan bir kalıba dökülerek katılaştırıldı.

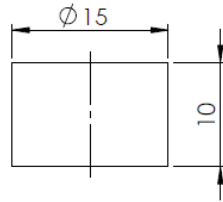


Şekil 13. Alaşımların üretiminde kullanılan çelik kalıbın teknik resmi.

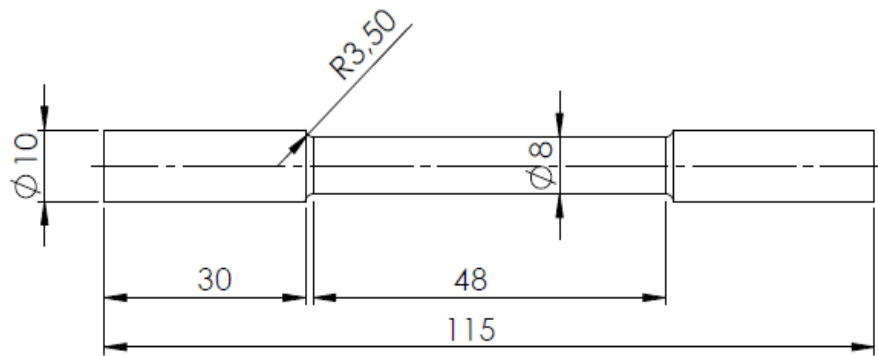
2.2. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

İçyapı incelemeleri için üretilen alaşımlardan Şekil 14’de teknik resmi verilen numuneler hazırlandı ve bunlar standart metalografik yöntemleri ile hazırlandı.

Hazırlanan numuneler önce ışık mikroskobunda daha sonra da taramalı elektron mikroskobunda incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar (mikrograf) çekildi. Alaşımların içyapısını oluşturan fazların analizi X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile yapıldı. XRD çalışmaları yassı numuneler üzerinde 3 derece/dakika'lık tarama hızında ve dalga boyu $1,54059 \text{ \AA}$ olan Cu-K α radyasyon kaynağı kullanılarak $20^\circ - 90^\circ$ derece tarama aralığında gerçekleştirildi. Sertlik ölçümleri Şekil 14'te teknik resmi verilen alaşım numuneleri üzerinde Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile 62,5 kgf yük altında ve 2,5 mm çapında bilye kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir alaşımın sertliği en az on ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Çekme deneylerinde ise teknik resmi Şekil 15'te verilen ve talaşlı imalat yöntemiyle 8 x 40 TS 138 standartlarına uygun olarak hazırlanan numuneler kullanıldı. Bu numuneler 10^{-3} s^{-1} 'lik ortalama deformasyon hızında deneye tabi tutuldu. Her bir alaşım için en az 6 adet çekme deneyi yapıldı ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri belirlendi.



Şekil 14. Metalografi ve sertlik numunelerine ait teknik resim.



Şekil 15. Çekme deneyi numunelerinin teknik resmi.

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Yapısal İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

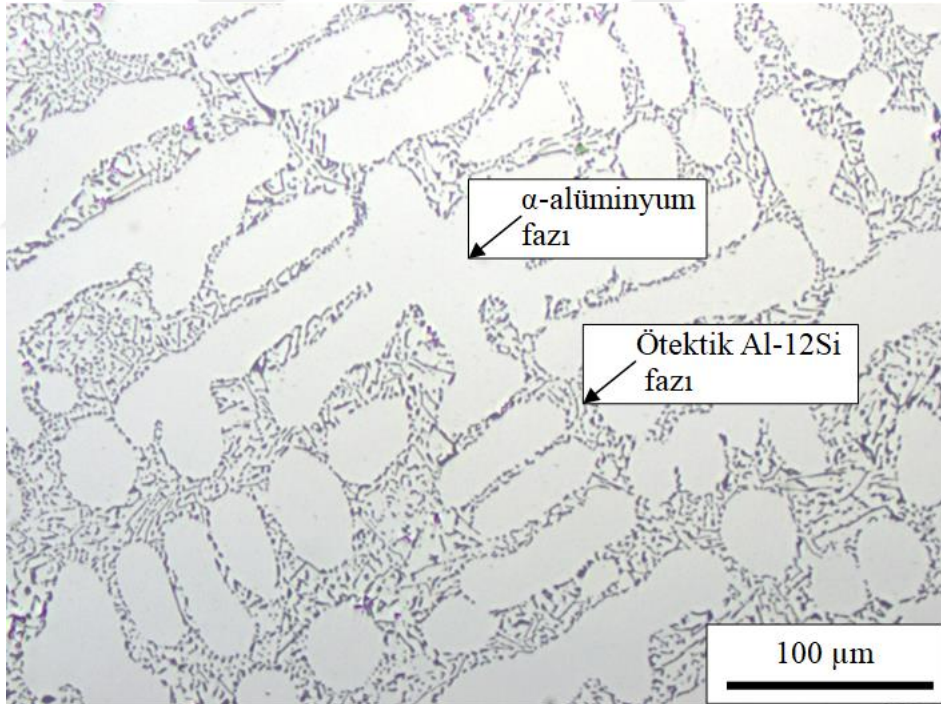
İkili Al-9Si, Al-12Si ve Al-17Si alaşımlarının içyapısını gösteren fotoğraflar Şekil 16, 17 ve 18'de verilmiştir. Bu alaşımların içyapılarının alüminyumca çok zengin α dendritleri, ötektik silisyum fazı ve primer silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmektedir. İkili Al-12Si alaşımına Al-8B alaşımı katılarak elde edilen üçlü Al-12Si-(0,01-1)B alaşımlarının içyapısını gösteren fotoğraflar ise Şekil 19, 20 ve 21'de verilmektedir. Bu fotoğraflar üçlü Al-12Si-(0,01-1)B alaşımlarının içyapılarının ikili Al-12Si alaşımının içyapısına benzer şekilde α dendritlerinden, primer silisyum ve ötektik alüminyum silisyum parçacıklarından oluştuğunu göstermektedir. Ancak, üçlü Al-12Si-B alaşımlarındaki α dendritlerinin boyutlarının Al-12Si alaşımına göre az da olsa küçüldüğü, ötektik silisyum parçacıklarının ise hem daha ince ve uzun bir yapıya dönüştüğü hem de bor oranı arttıkça daha sıkı dizildiği görülmektedir, (Şekil 19, 20 ve 21).

Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımların içyapı incelemelerinden elde edilen fotoğraflar Şekil 22-25'te verilmiştir. Bu fotoğraflar Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımının içyapısının α dendritleri, ötektik faz (Al-12Si), primer silisyum parçacıkları ve $Al_xSi_ySr_z$ fazından oluştuğunu, stronsiyum oranının %0,1'i aşması durumunda bu fazlara ilave olarak yapıda Al_4Sr fazının oluştuğunu göstermektedir, (Şekil 25). Bu fotoğraflardan ayrıca stronsiyum ilavesi ile Al-12Si alaşımında dendrit oluşma eğiliminin arttığı, ötektik silisyum parçacıklarının parçalanarak veya küçülerek küreselleştiği, nispeten ince ve uzun bir yapıya sahip olan $Al_xSi_ySr_z$ fazının oluştuğu gözlenmektedir, (Şekil 22-25). Ayrıca, artan stronsiyum oranı ile özellikle %0,1 Sr oranına kadar ötektik fazın tane boyutunun küçülerek miktarının ve küreselliğinin nispeten arttığı görülmektedir, (Şekil 22-25).

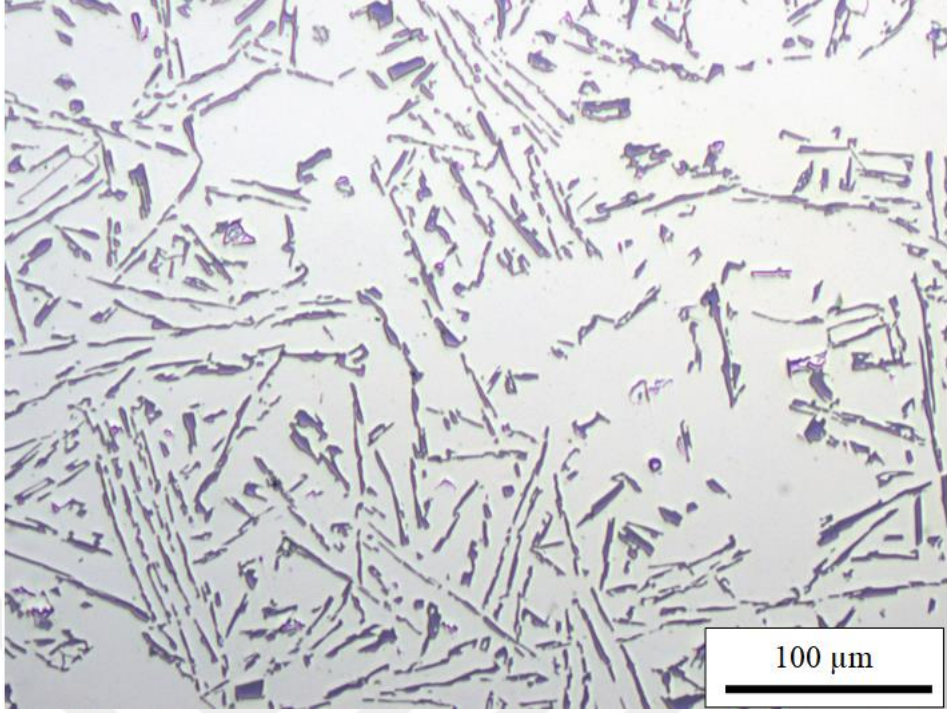
Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-Mg alaşımları üçlü alaşımlara benzer olarak alüminyumca zengin α dendritleri, primer silisyum parçacıkları, küresel şekilli ötektik Al-Si fazı,

$Al_xSi_ySr_z$ bileşiminden oluşmaktadır, Şekil 26-28. Ancak, magnezyum oranının % 0,6'ya aşması durumunda içyapılarında Mg_2Si fazının oluştuğu görülmektedir, Şekil 27 ve 28.

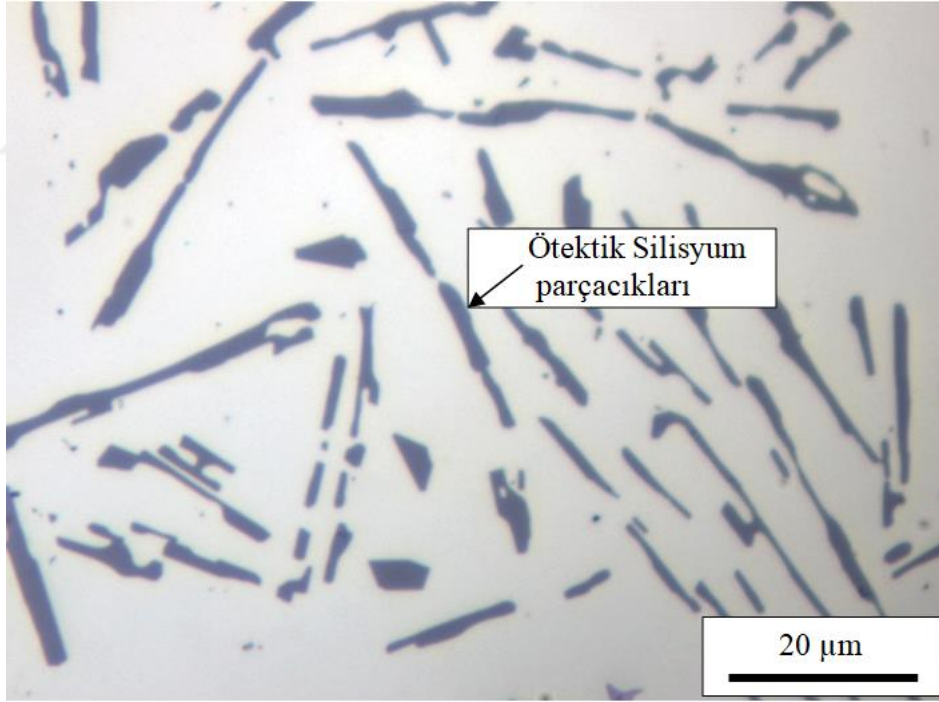
Beşli $Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg-0,05B$ alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf Şekil 29'da, $Al-9Si$ ve $Al-17Si$ ikili alaşımlarına stronsiyum ve stronsiyum ile magnezyum birlikte katılarak elde edilen üçlü ve dörtlü alaşımların içyapısını gösteren fotoğraflar Şekil 30-33'te verilmektedir. Beşli $Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg-0,05B$ alaşımının içyapısında dörtlü $Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg$ alaşımındakilerden farklı bir faza rastlanmadığı gibi, var olan fazların morfolojilerinde de belirgin bir değişime rastlanmamıştır, (Şekil 29). $Al-9Si$ ve $Al-17Si$ alaşımlarına yapılan stronsiyum katkılarının ikili $Al-12Si$ alaşımında olduğu gibi bu alaşımlarda da ince uzun şekilli ötektik silisyum parçacıklarının nispeten küresel formlarda parçalanarak küçülmesine yol açtığı, magnezyum katkılarının ise belirgin bir yapısal değişime yol açmadığı görüldü, (Şekil 33-37).



Şekil 16. $Al-9Si$ alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf.

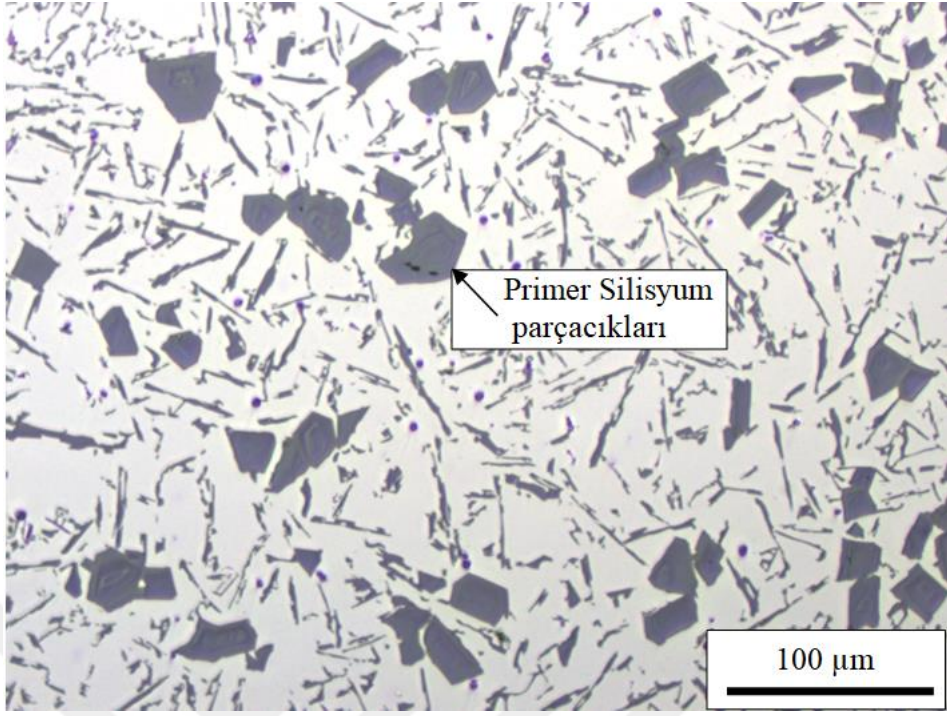


(a)

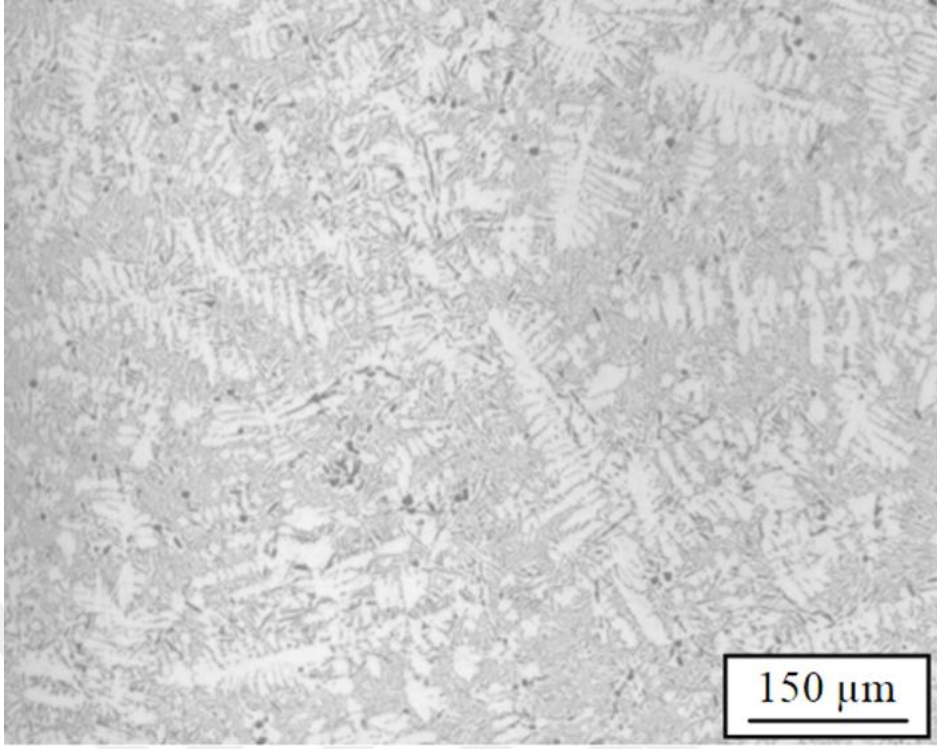


(b)

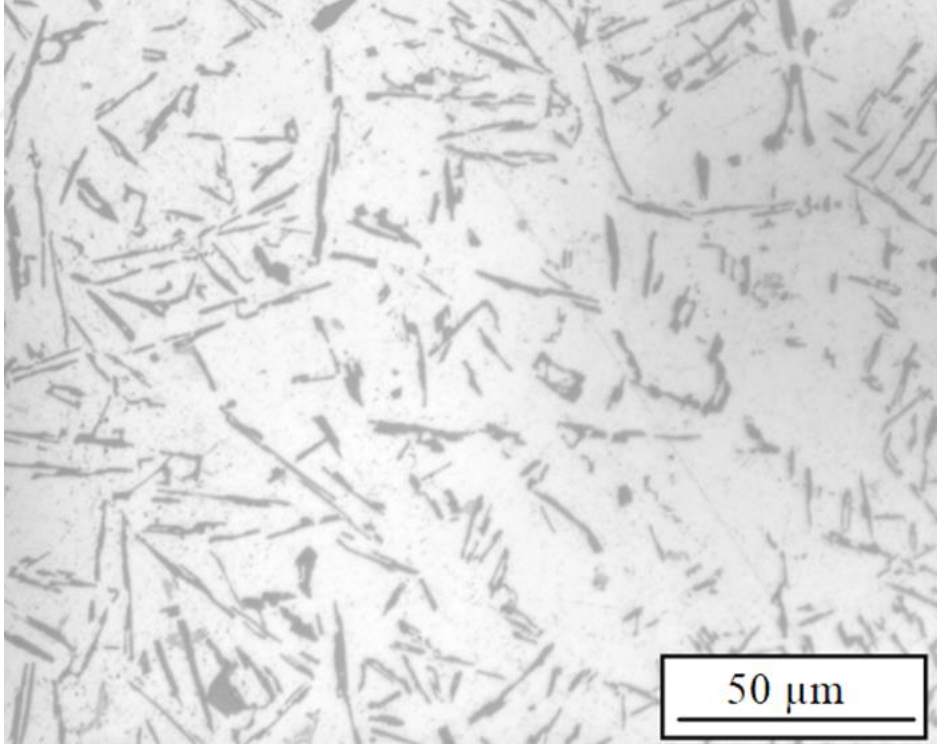
Şekil 17. Al-12Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).



Şekil 18. Al-17Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf.

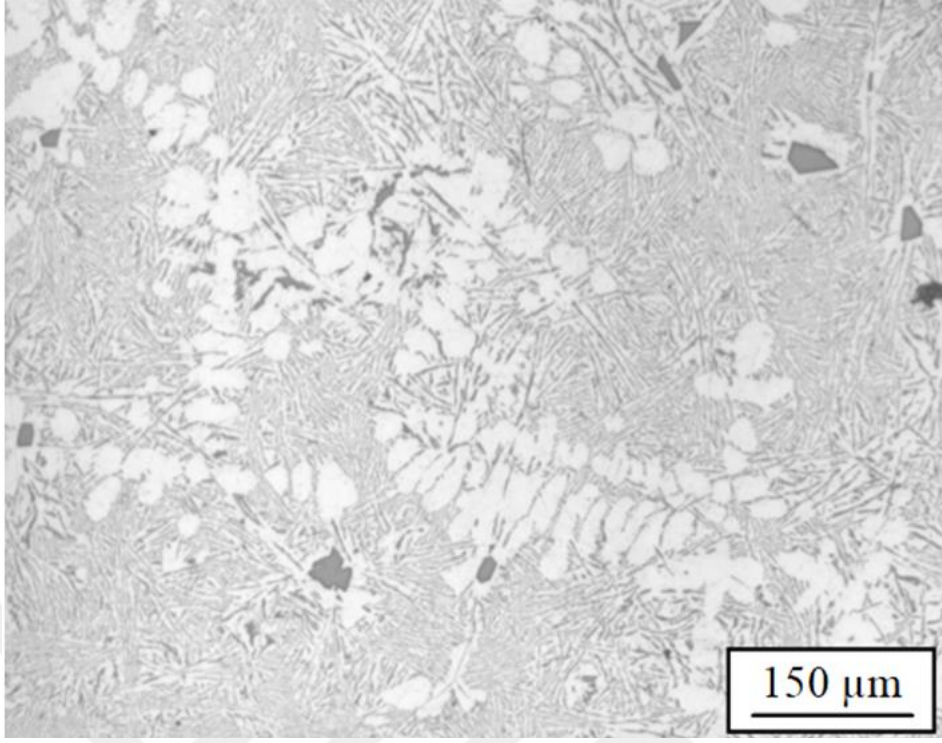


(a)

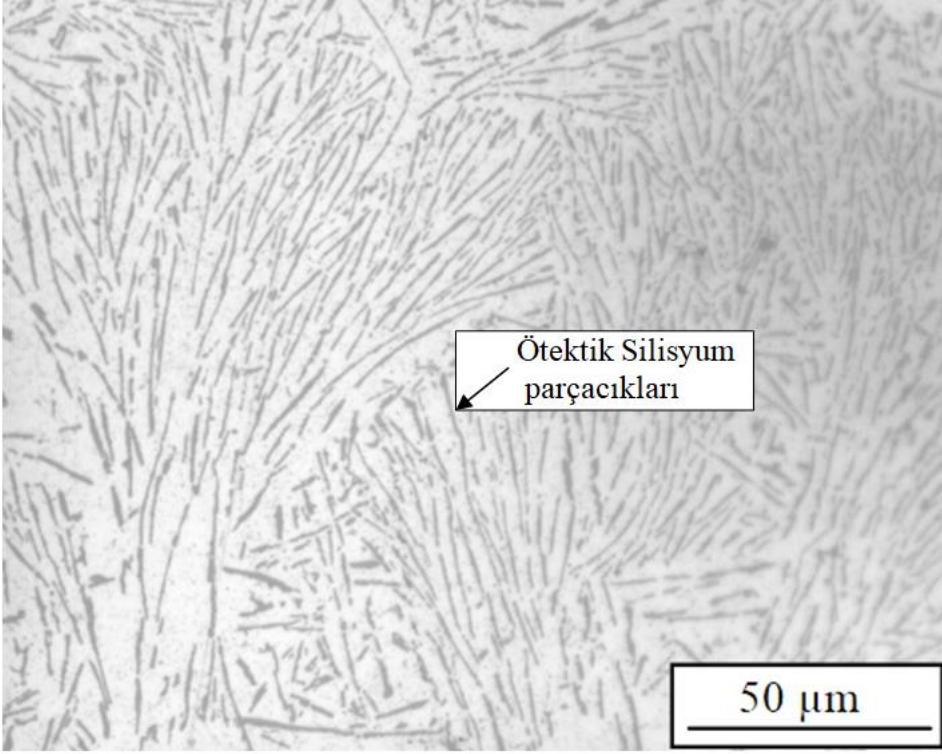


(b)

Şekil 19. Al-12Si-0,01B alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

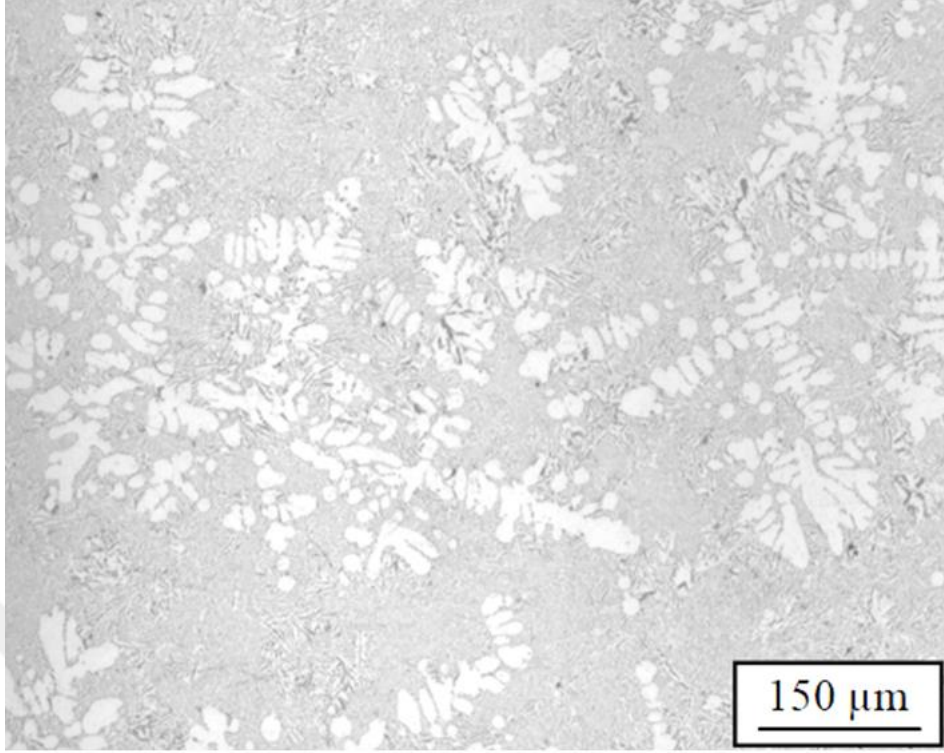


(a)

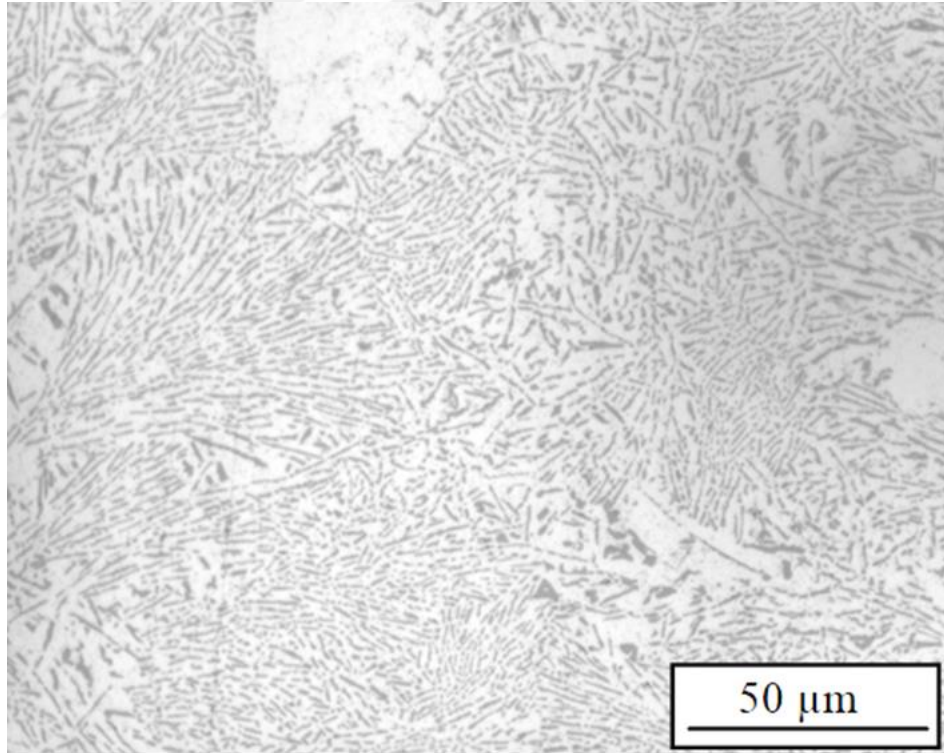


(b)

Şekil 20. Al-12Si-0,05B alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

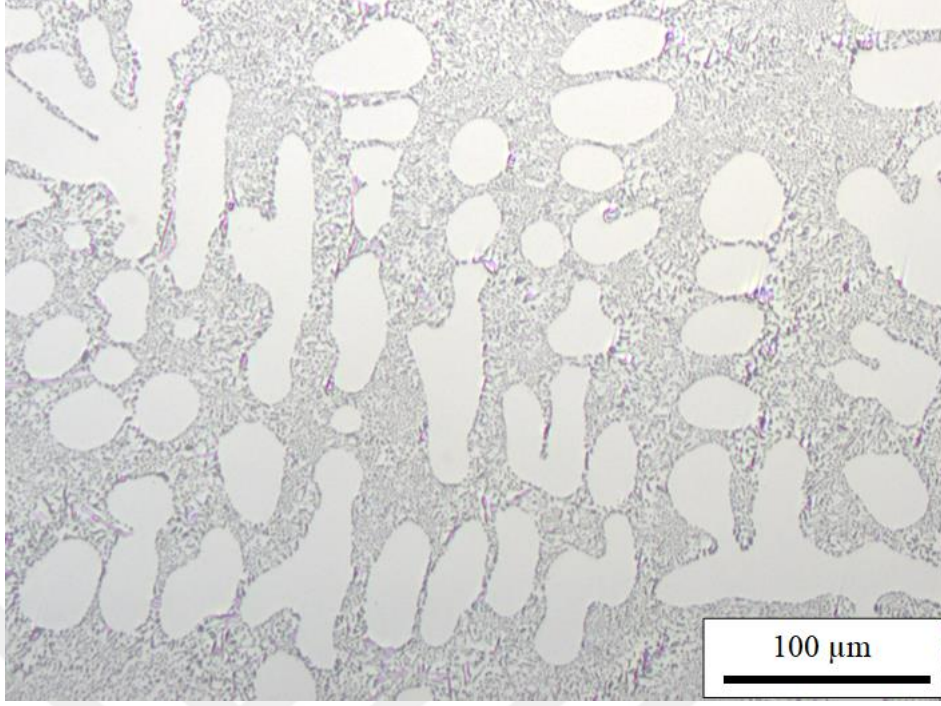


(a)

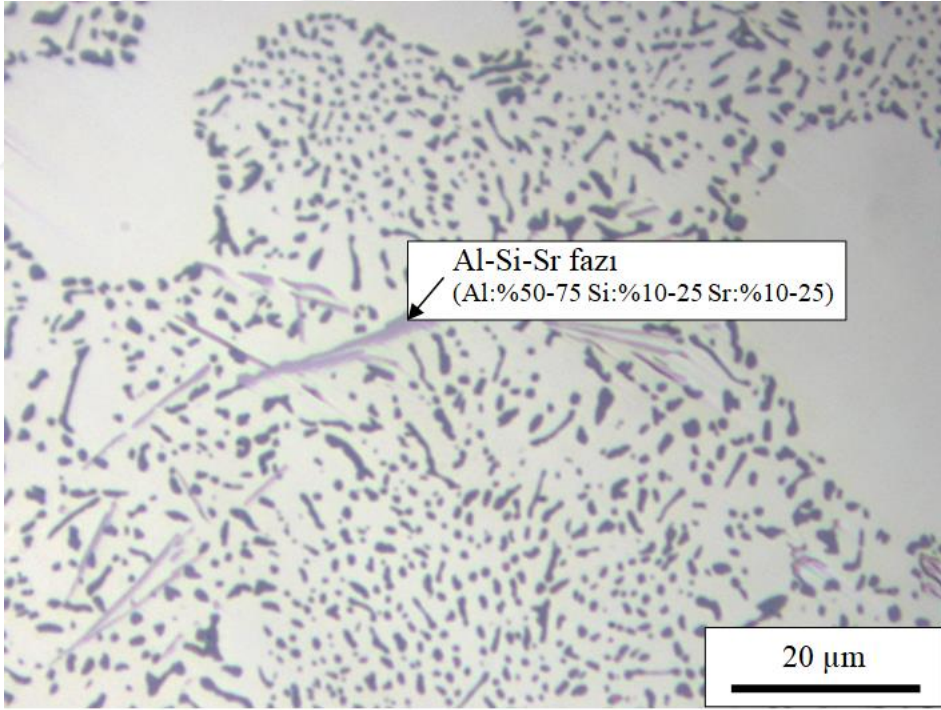


(b)

Şekil 21. Al-12Si-1B alaşımasının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

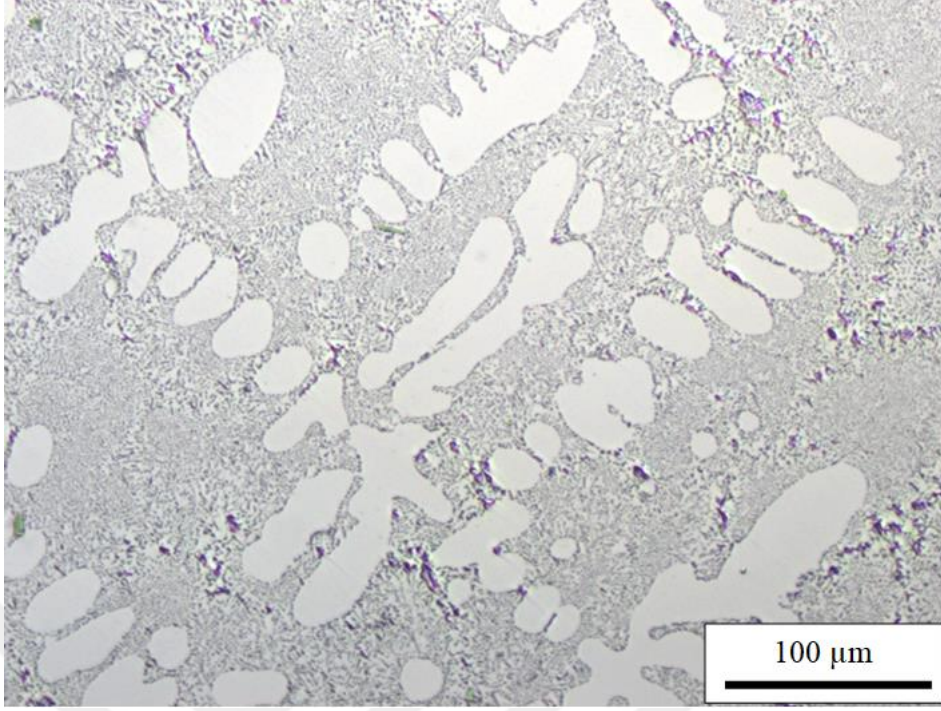


(a)

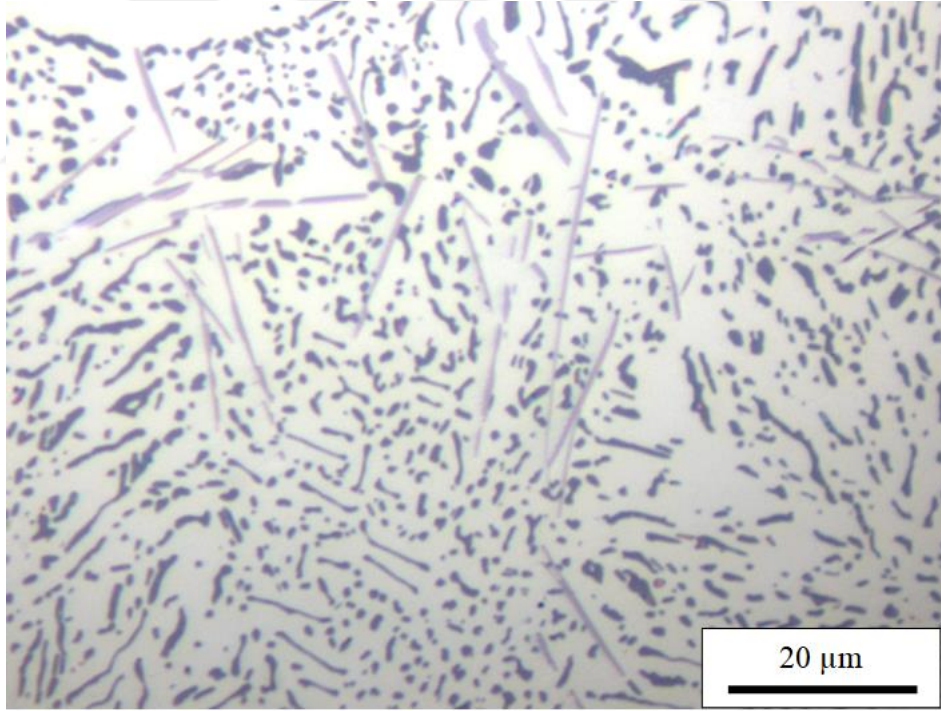


(b)

Şekil 22. Al-12Si-0,02Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

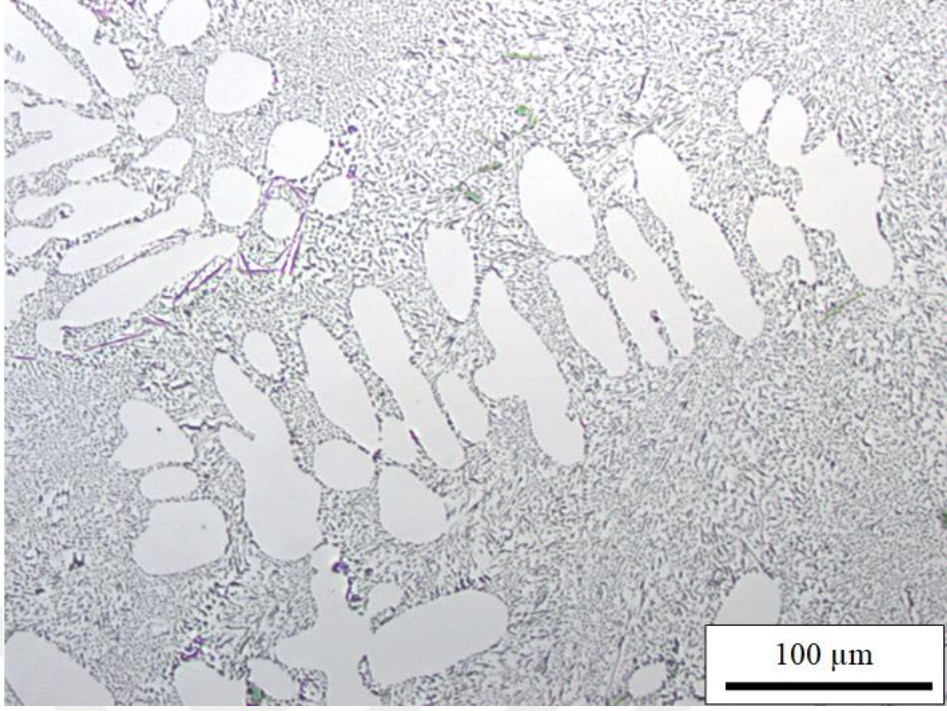


(a)

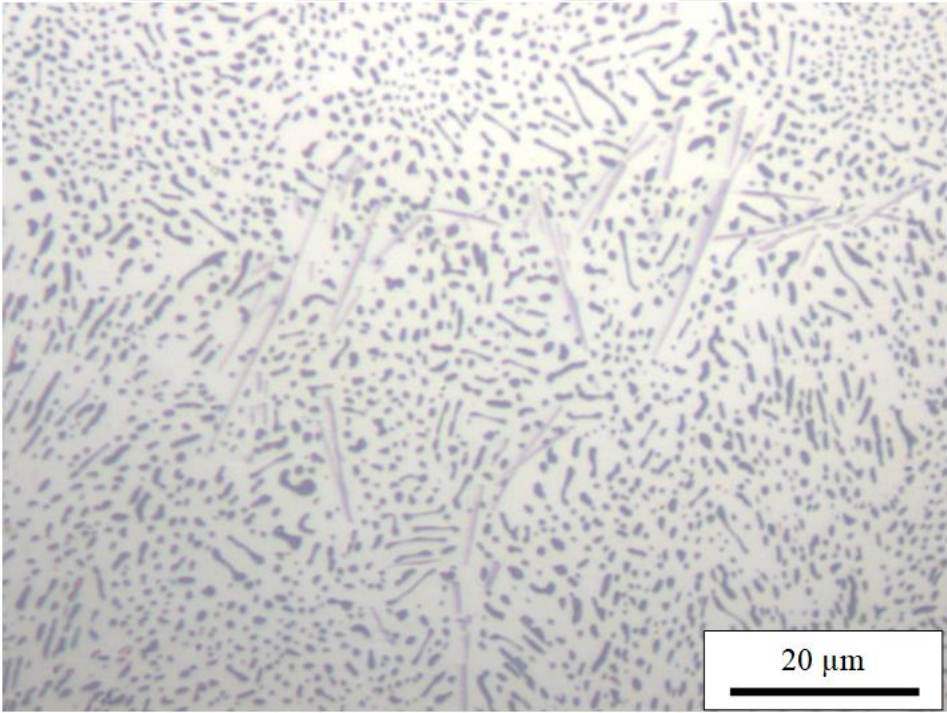


(b)

Şekil 23. Al-12Si-0,06Sr alaşımasının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

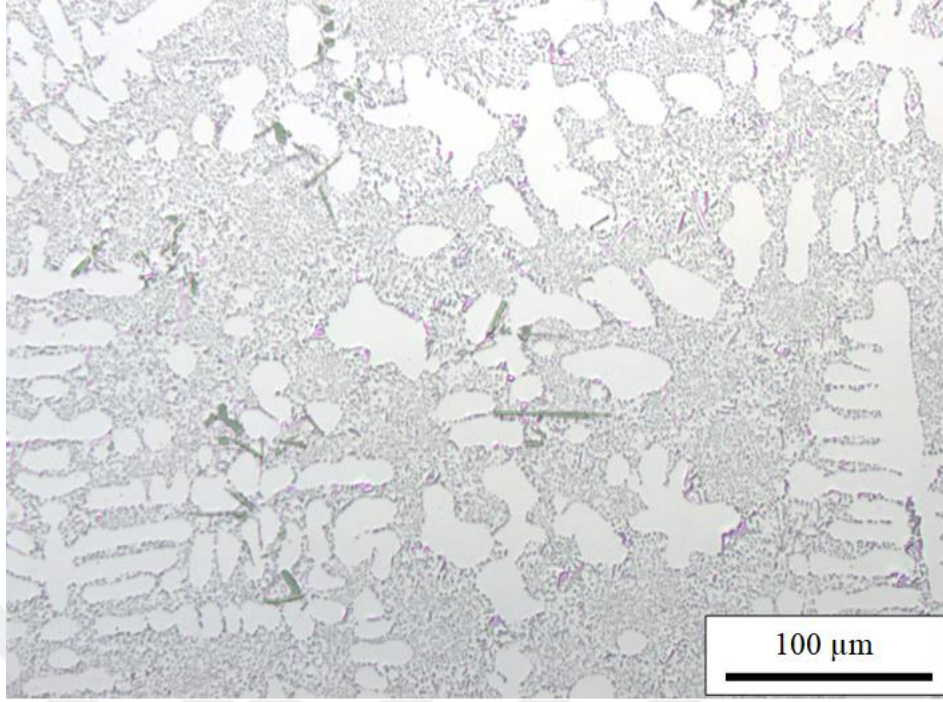


(a)

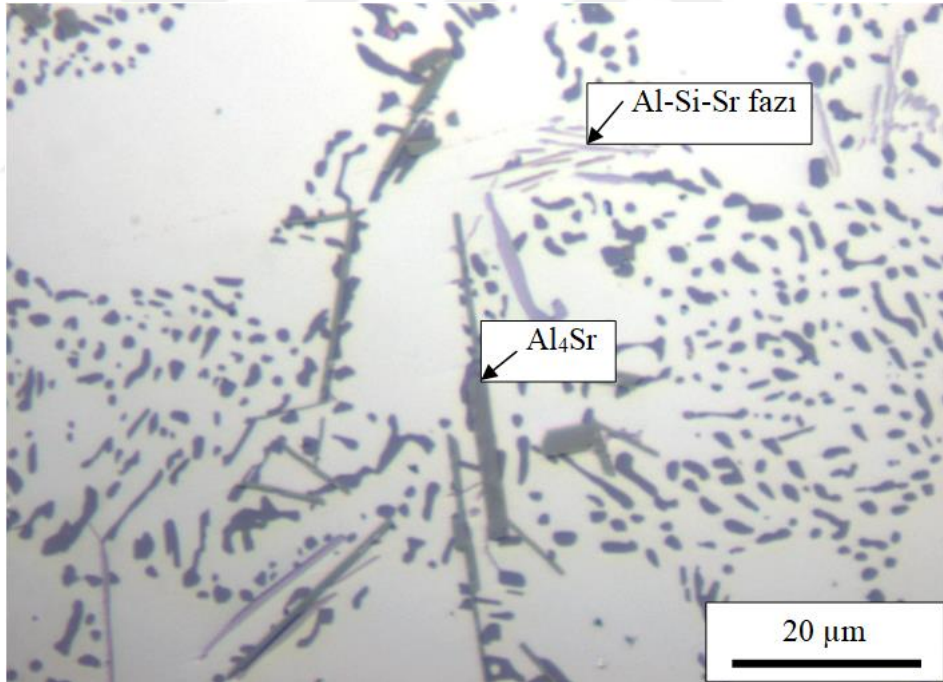


(b)

Şekil 24. Al-12Si-0,1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

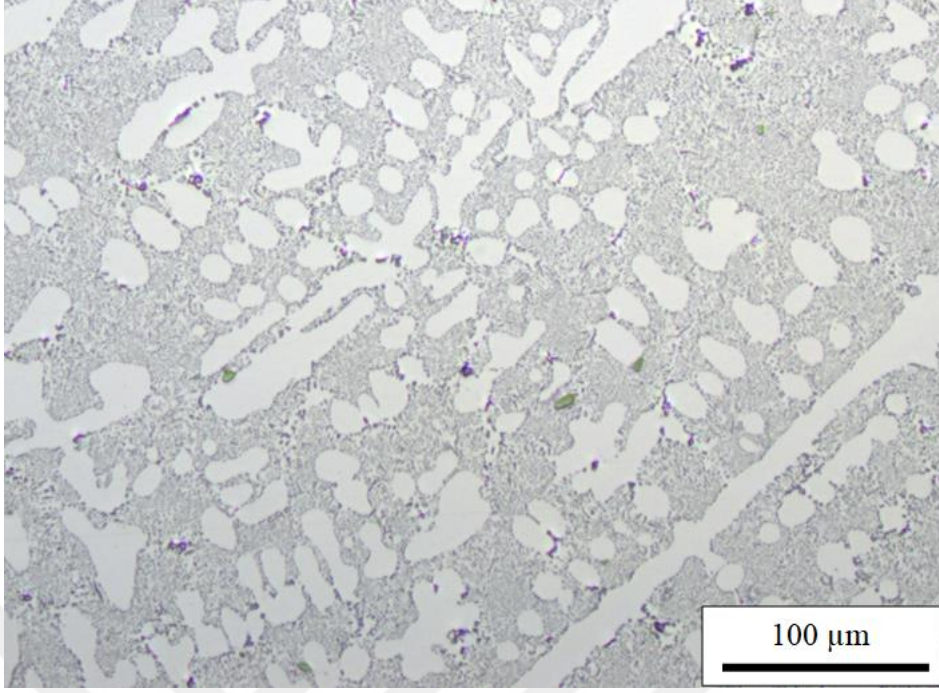


(a)

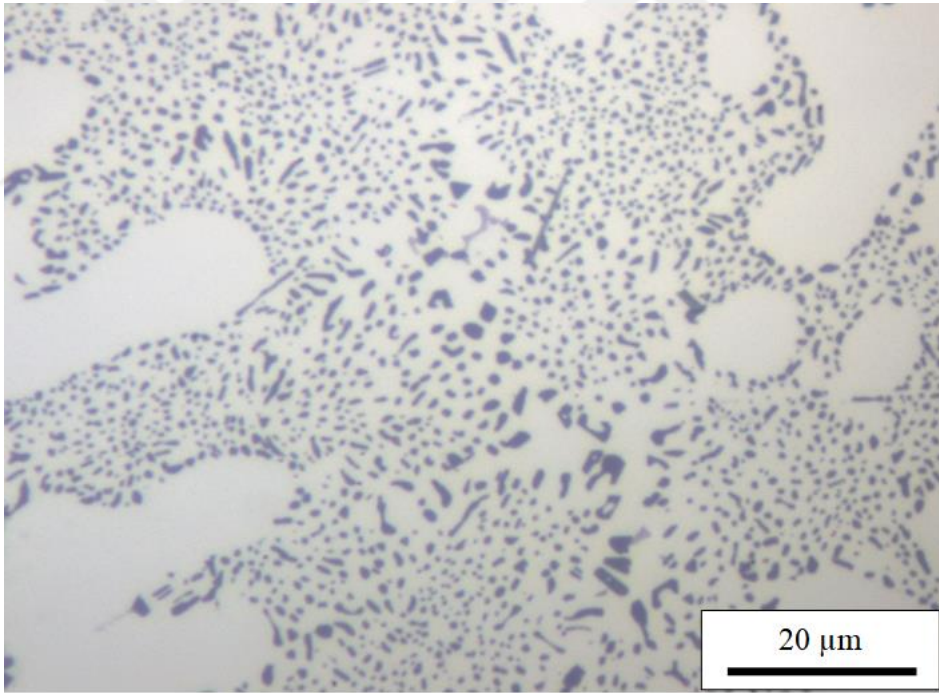


(b)

Şekil 25. Al-12Si-1,0Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

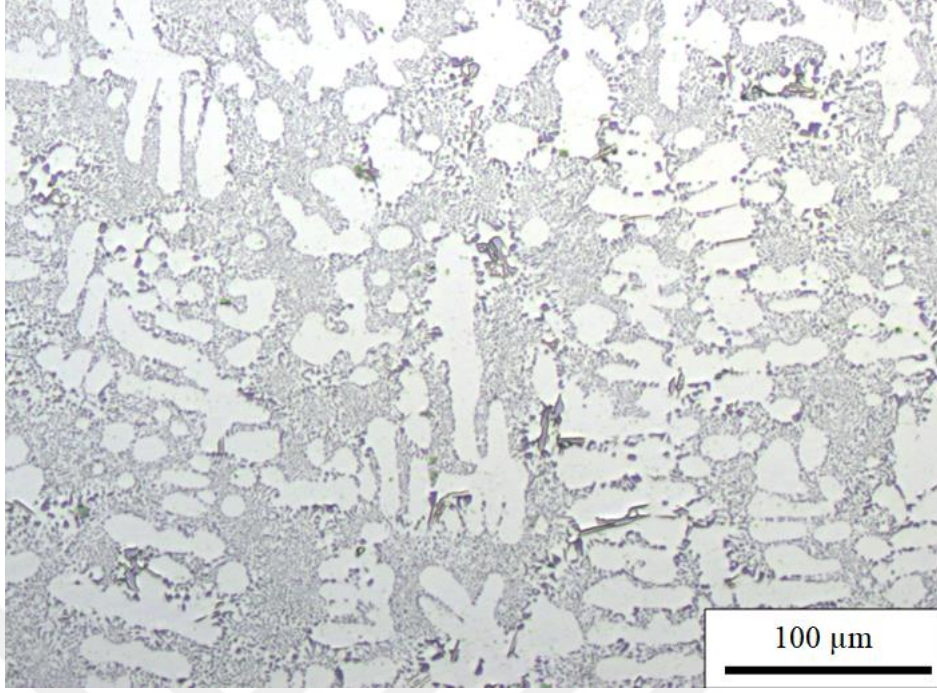


(a)

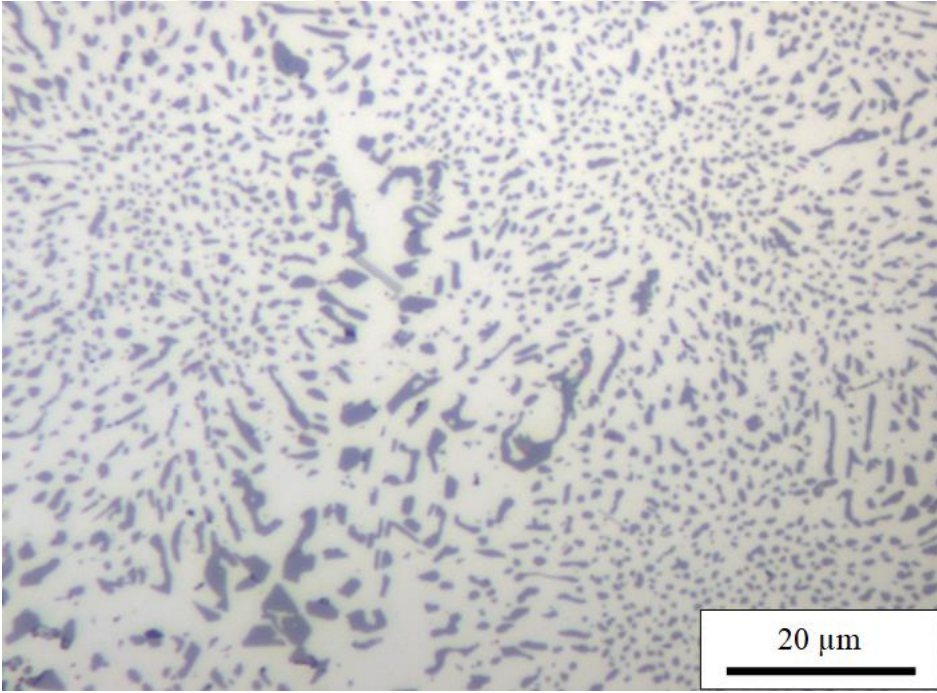


(b)

Şekil 26. Al-12Si-0,1Sr-0,2Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

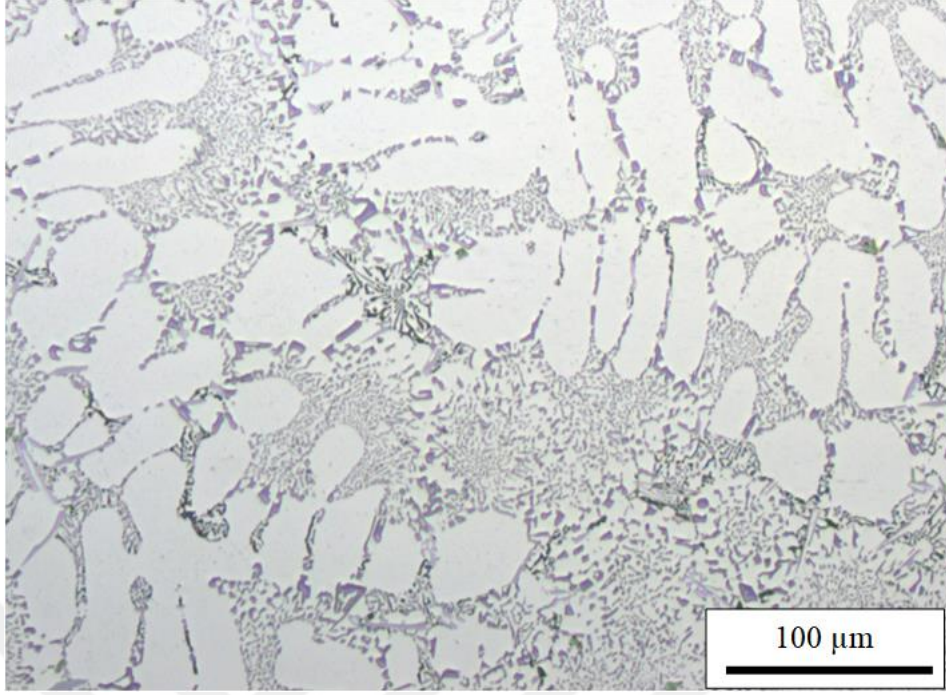


(a)

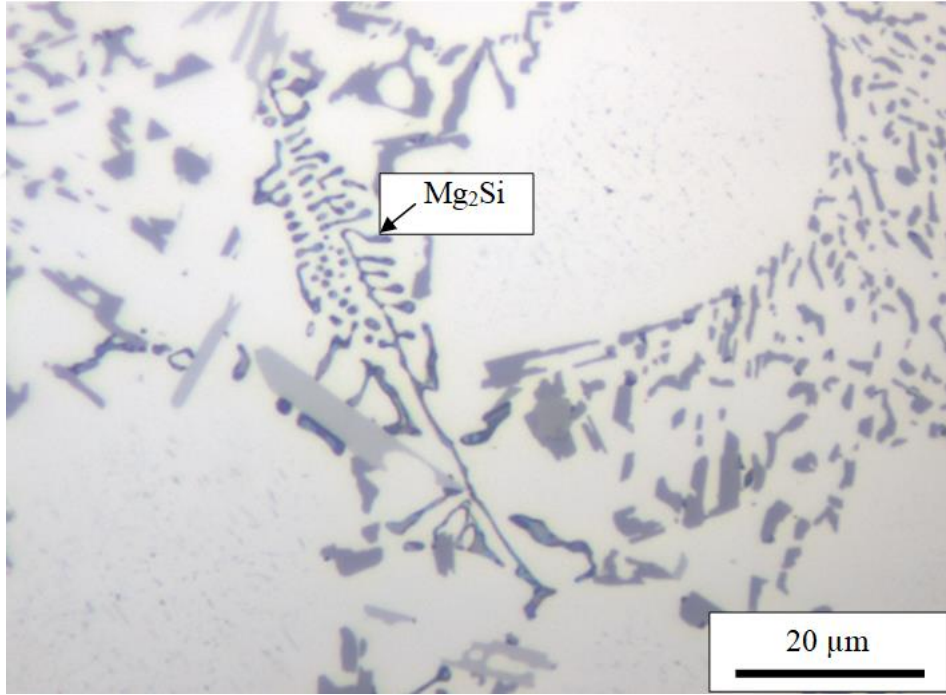


(b)

Şekil 27. Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

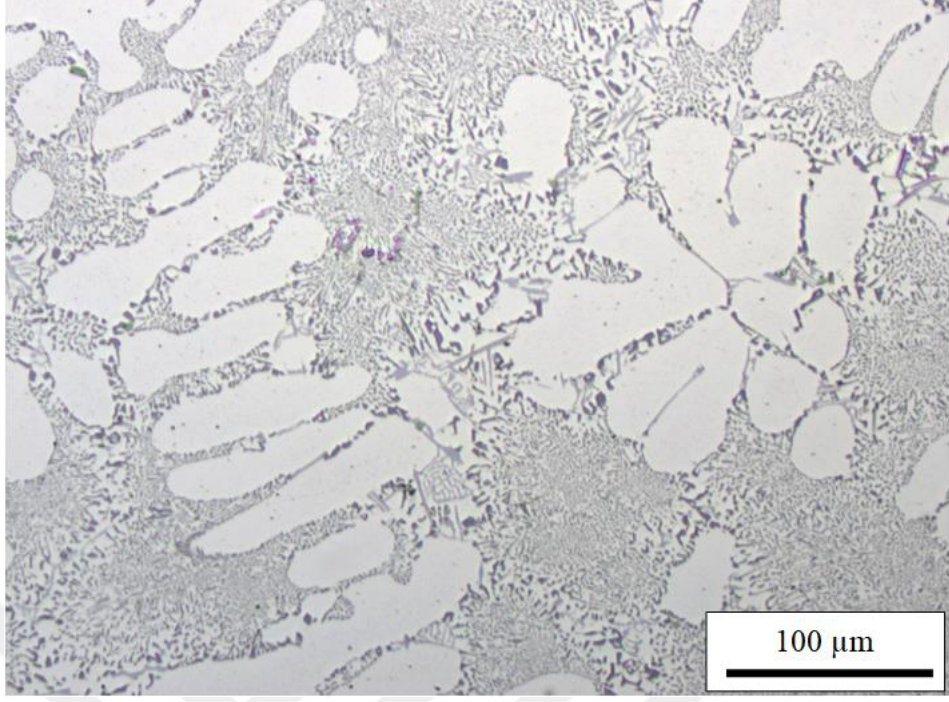


(a)

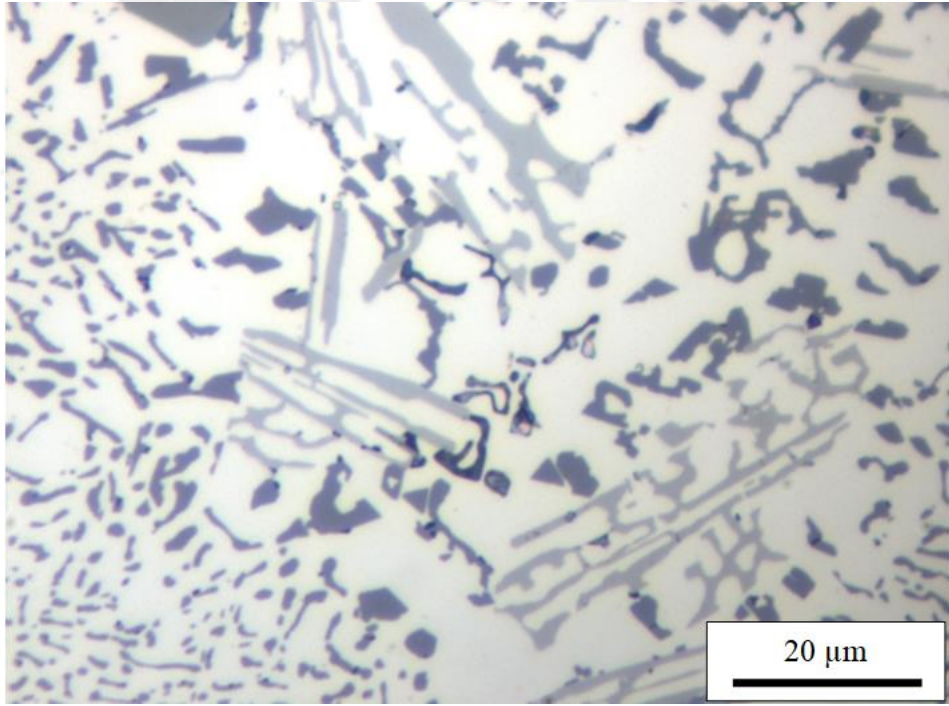


(b)

Şekil 28. Al-12Si-0,1Sr-1,0Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

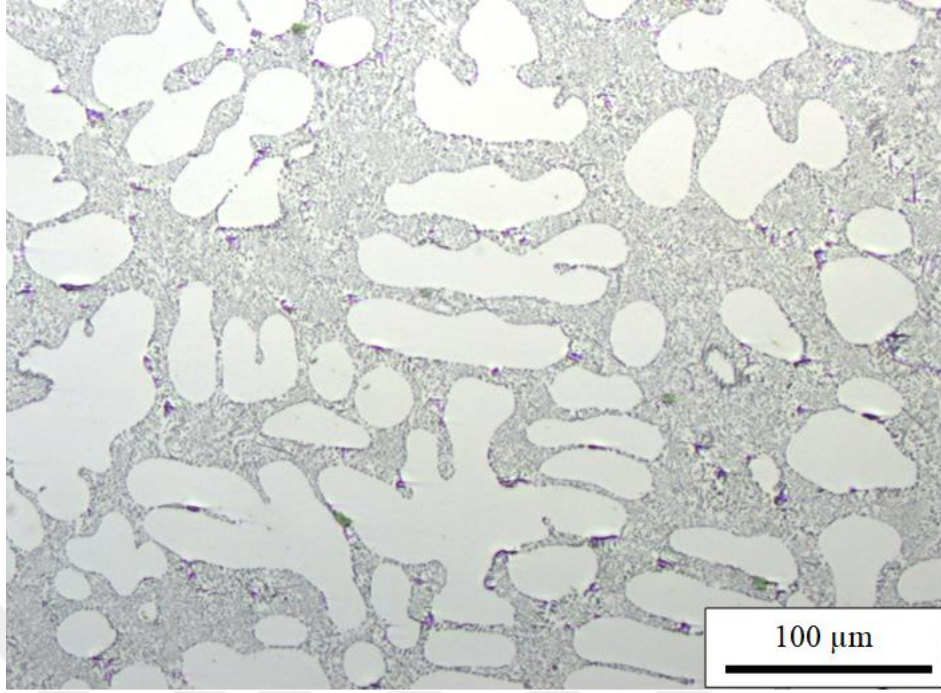


(a)

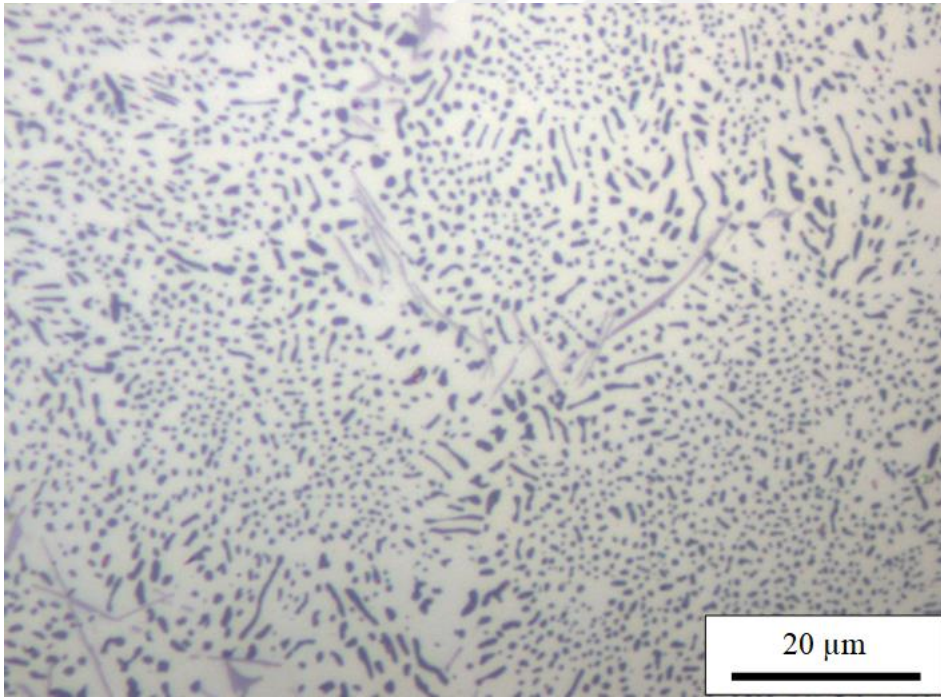


(b)

Şekil 29. Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

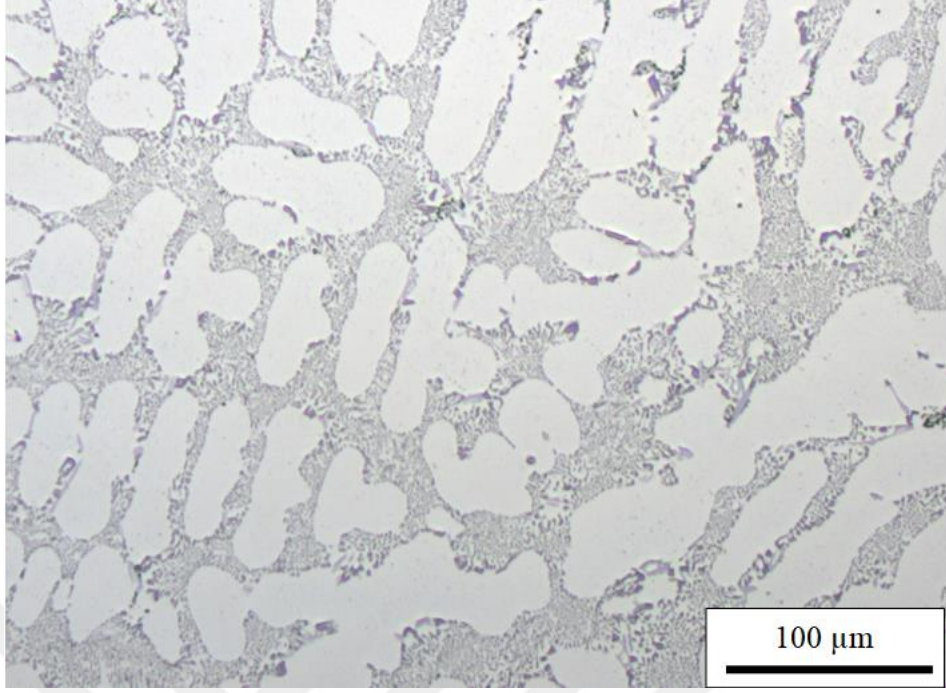


(a)

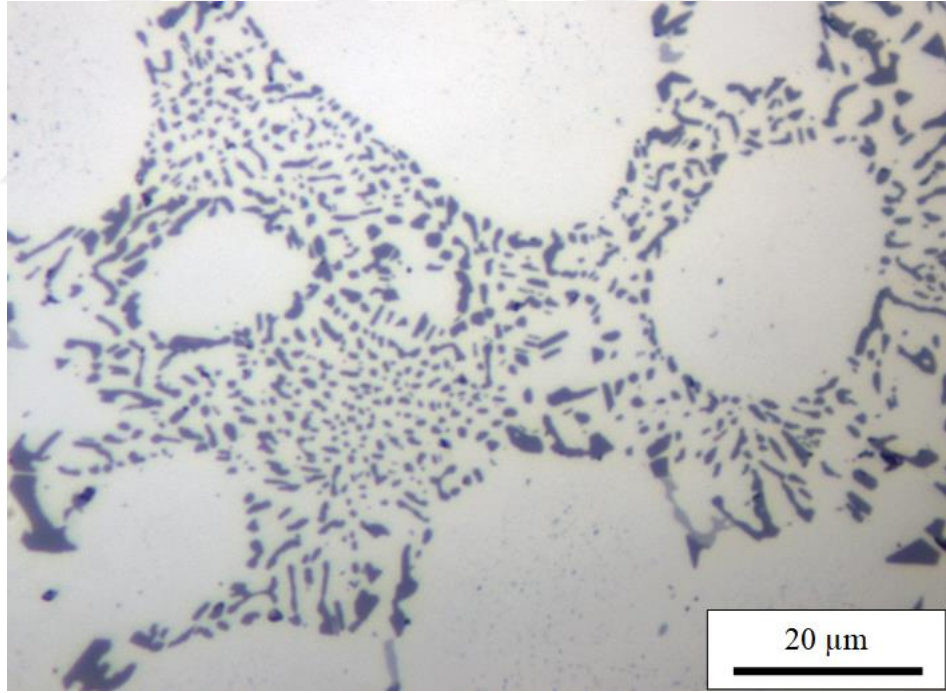


(b)

Şekil 30. Al-9Si-0,1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

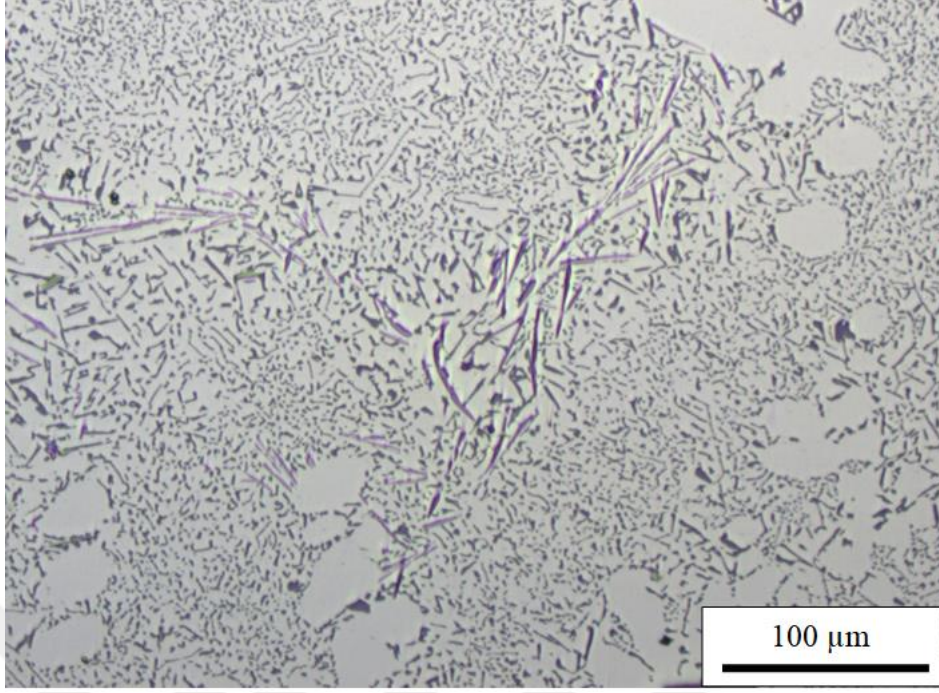


(a)

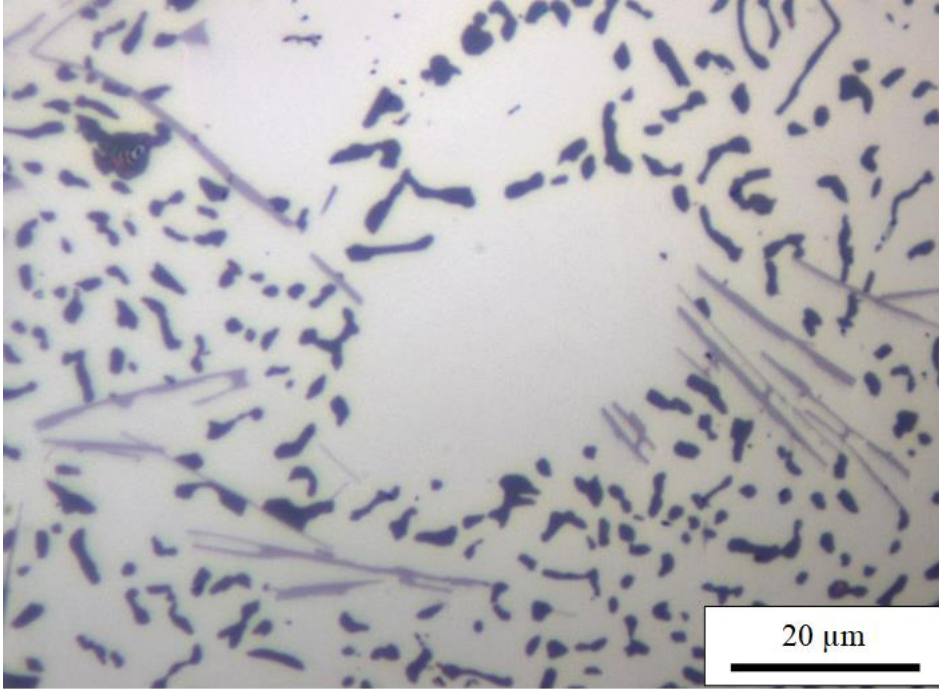


(b)

Şekil 31. Al-9Si-0,1Sr -0,6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

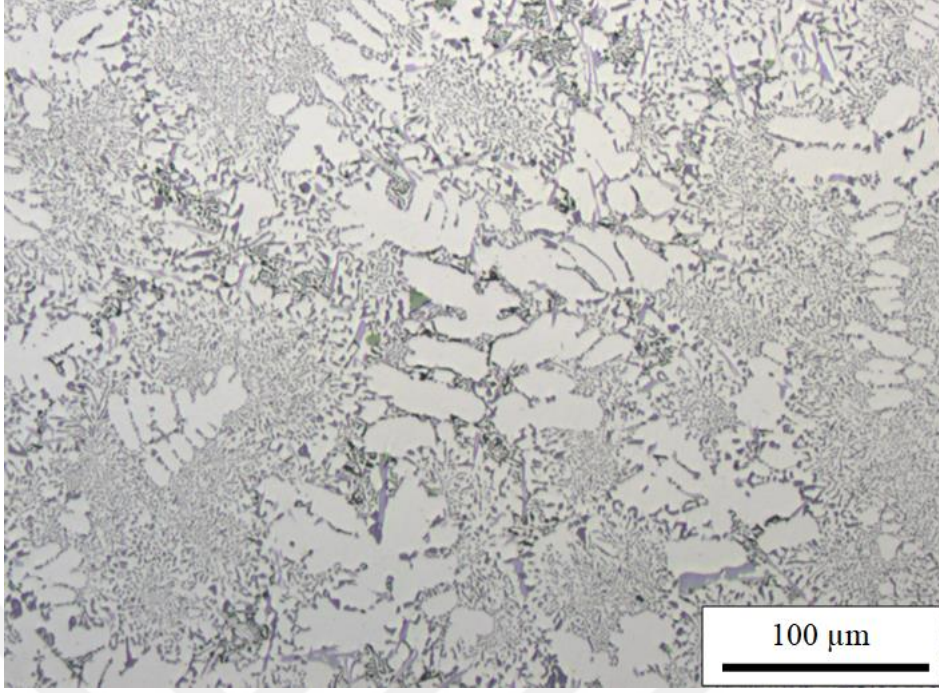


(b)

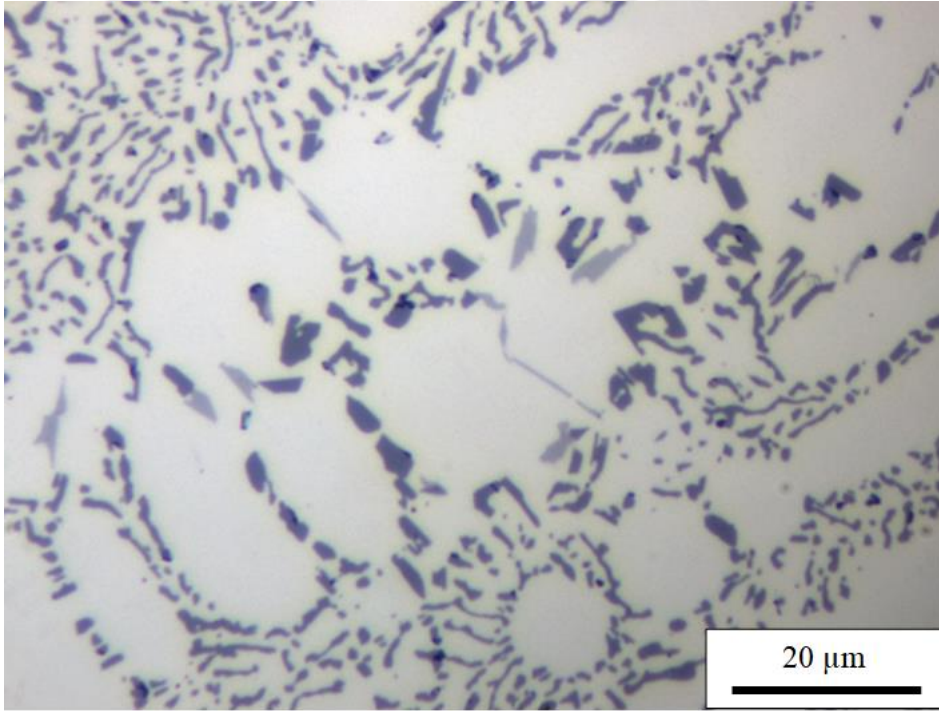


(b)

Şekil 32. Al-17Si-0,1Sr alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).



(a)

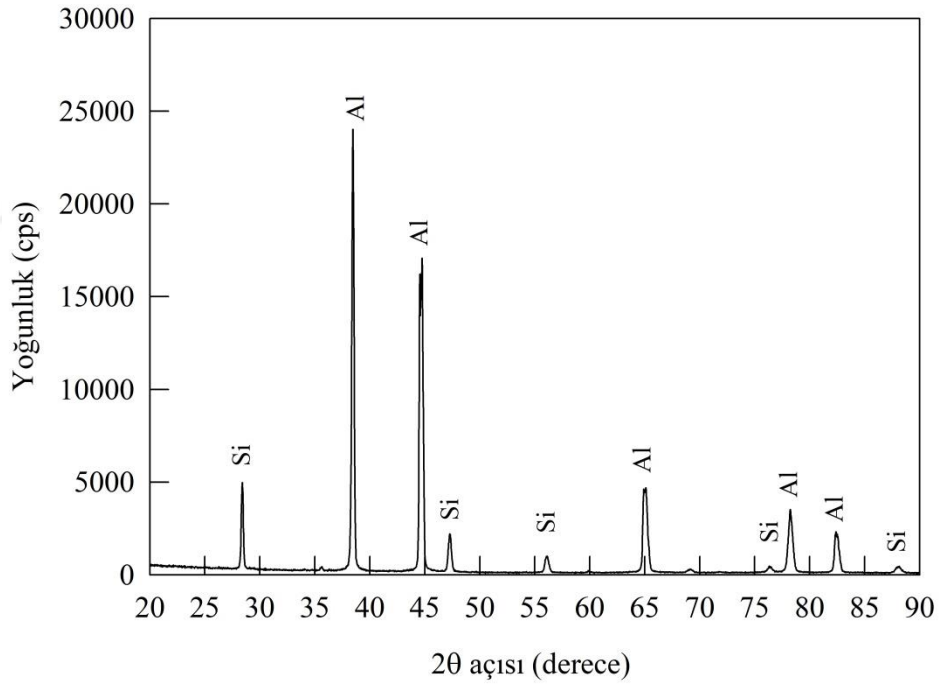


(b)

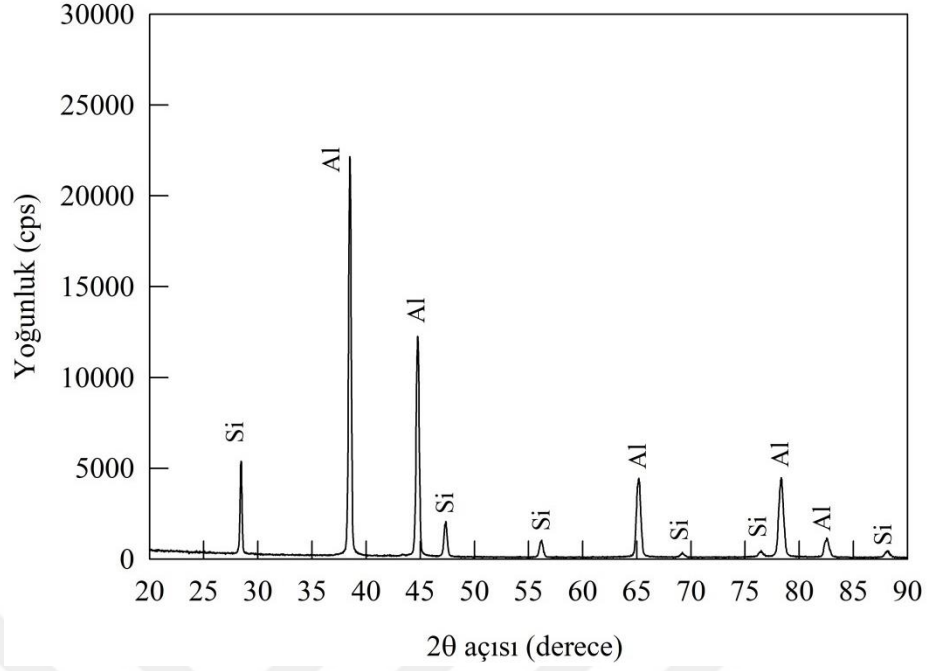
Şekil 33. Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf (a:düşük büyütme b: yüksek büyütme).

Üretilen Al-12Si esaslı üçlü, dörtlü ve beşli alaşımlarda oluşan fazları belirlemeye yönelik olarak yapılan X-ışını kırınımı çalışmalarından elde edilen veriler Şekil 34-

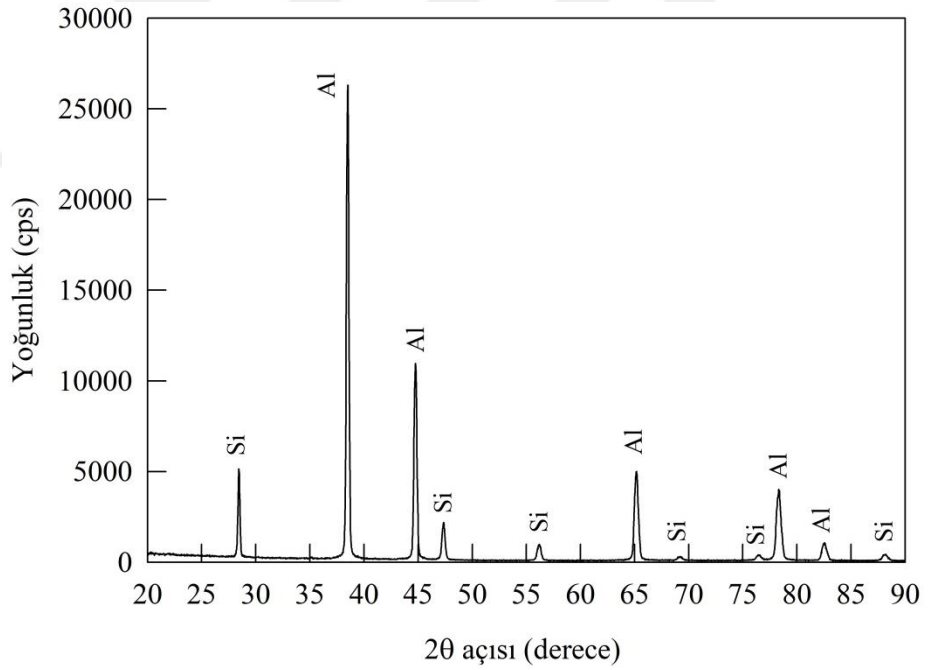
44'de verilmektedir. Bu veriler uygulanan oranlardaki bor katkılarının söz konusu alaşımlarda her hangi bir yeni fazın oluşumuna yol açmadığını ancak bazı piklerin şiddetlerinde (yoğunluklarında) değişim olduğunu göstermektedir, (Şekil 35-37). Al-12Si-Sr alaşımlarında ikili Al-12Si alaşımlarından farklı olarak 43°'de $Al_xSi_ySr_z$ ve %0,1 oranından daha fazla stronsiyum oranlarında Al_4Sr fazının oluştuğu görüldü, (Şekil 38-40). Al-12Si-0,1Sr-Mg alaşımlarında ise Al-12Si-0,1Sr alaşımındakilere ilave olarak %0,6 Mg oranından sonra Mg_2Si fazının oluştuğu görülmektedir, (Şekil 41-43). Al_4Sr fazının üçlü Al-12Si-1Sr alaşımında yaklaşık olarak 28 ve 34°'lik, Mg_2Si fazının ise dördü Al-12Si-0,1Sr-1Mg alaşımlarında yaklaşık olarak 40°'lik 2θ açılarında ortaya çıktığı görülmektedir, Şekil (40 ve 43). Beşli Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg-0,05B alaşımının üzerinde yapılan X-ışını kırınımı çalışmalarında Al_4Sr ve Mg_2Si fazına rastlanılmamıştır, (Şekil 44).



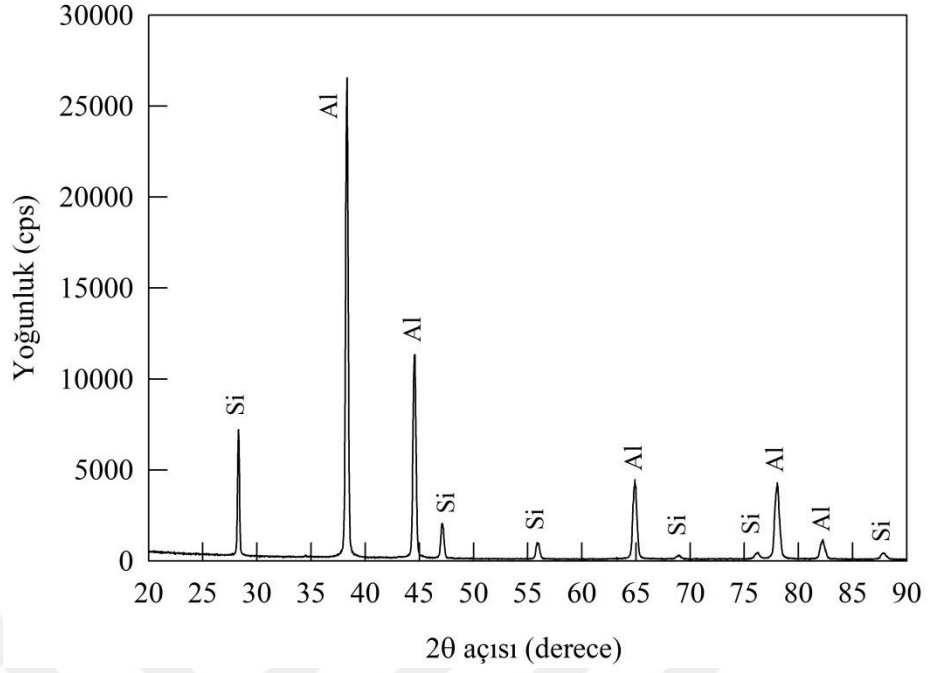
Şekil 34. Al-12Si alaşımının X-ışını kırınım deseni.



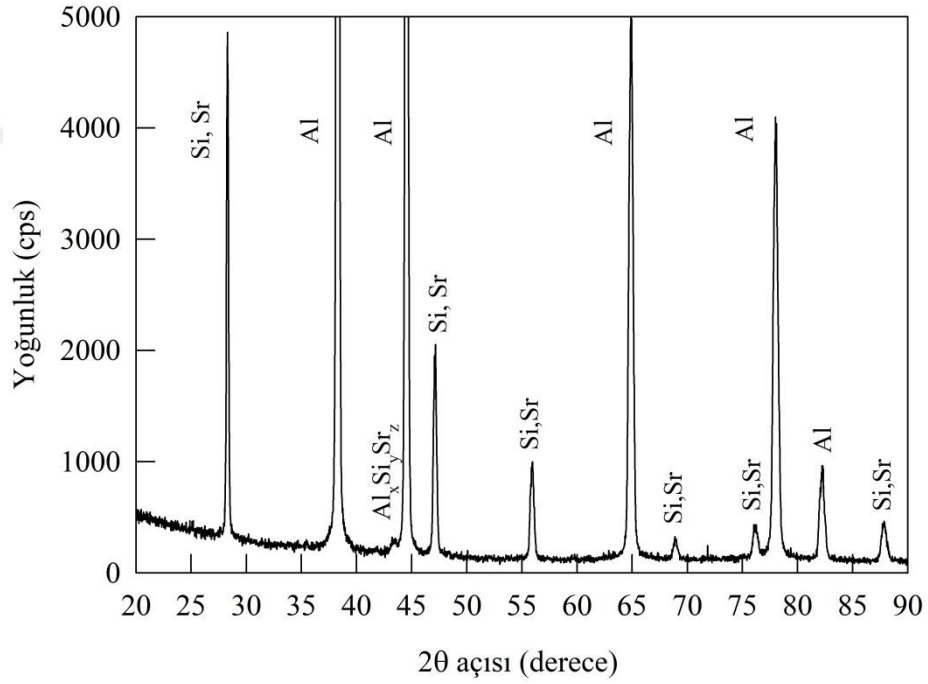
Şekil 35. Al-12Si-0,01B alaşımının X-ışını kırınım deseni.



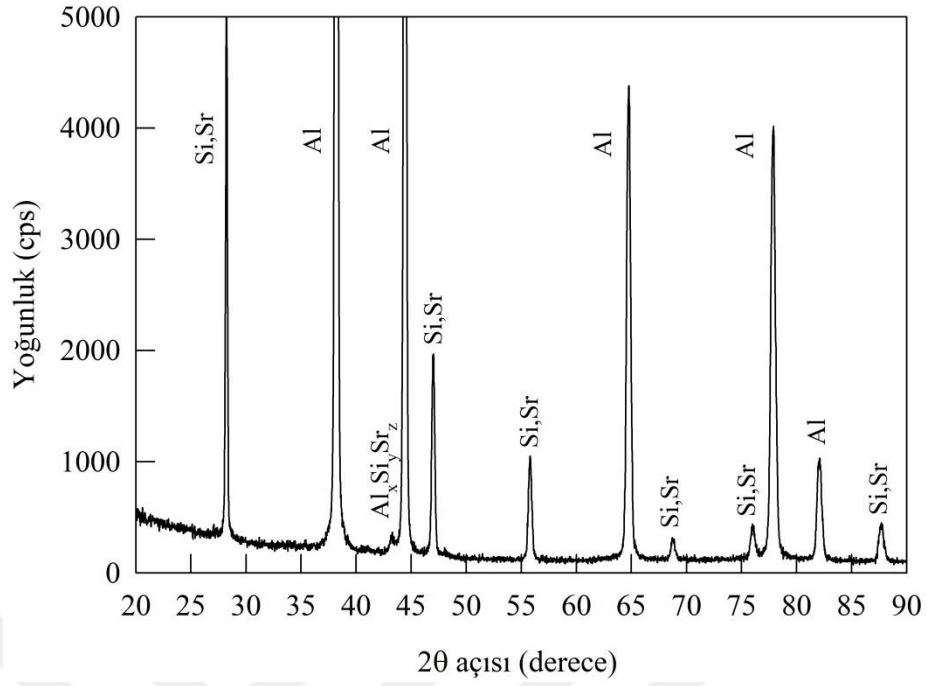
Şekil 36. Al-12Si-0,05B alaşımının X-ışını kırınım deseni.



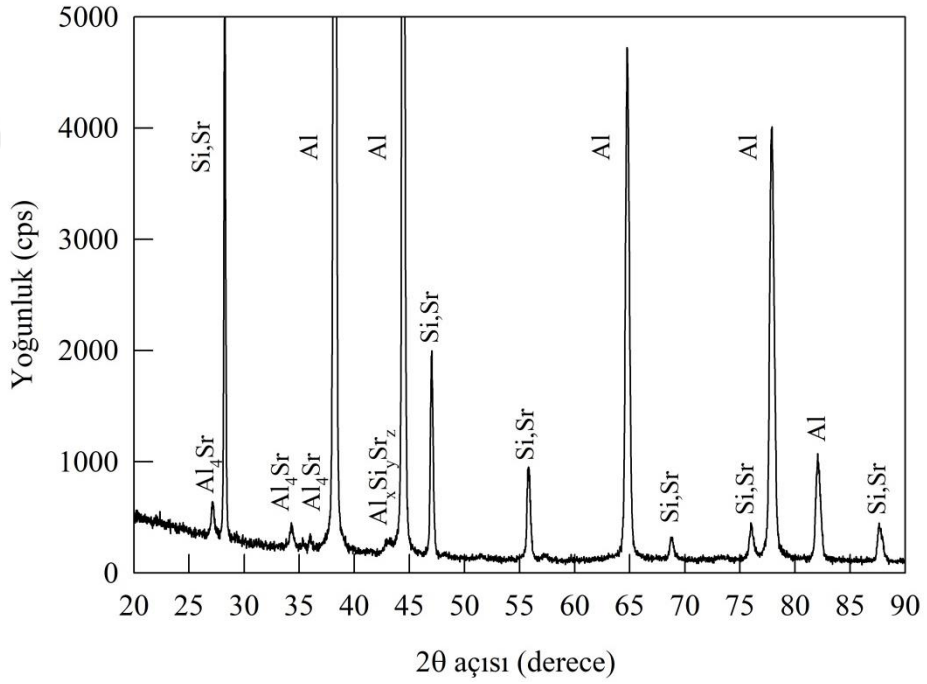
Şekil 37. Al-12Si-1B alaşımının X-ışını kırınım deseni.



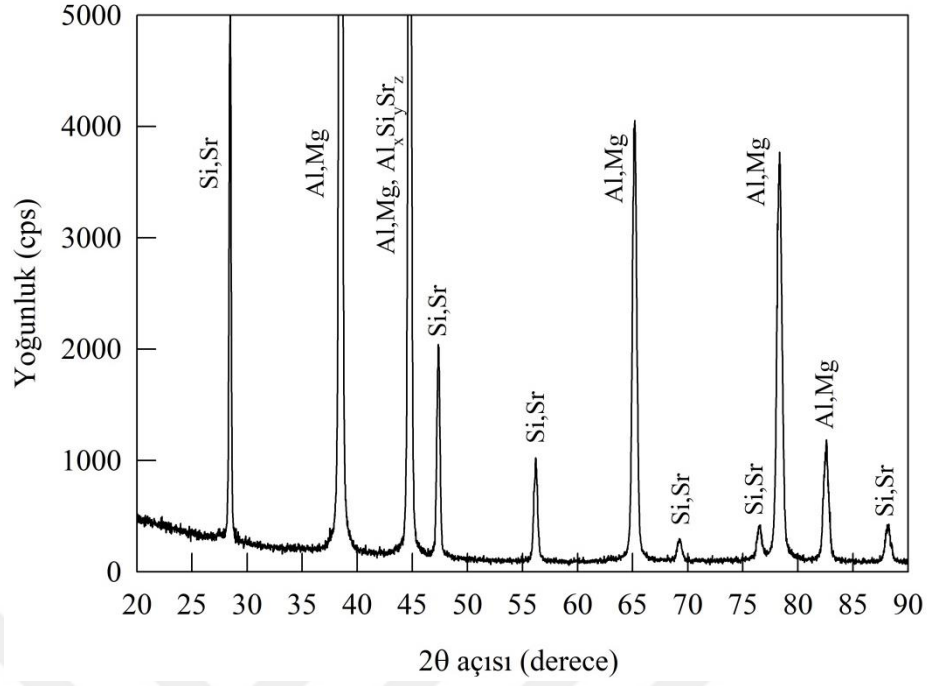
Şekil 38. Al-12Si-0,02Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni.



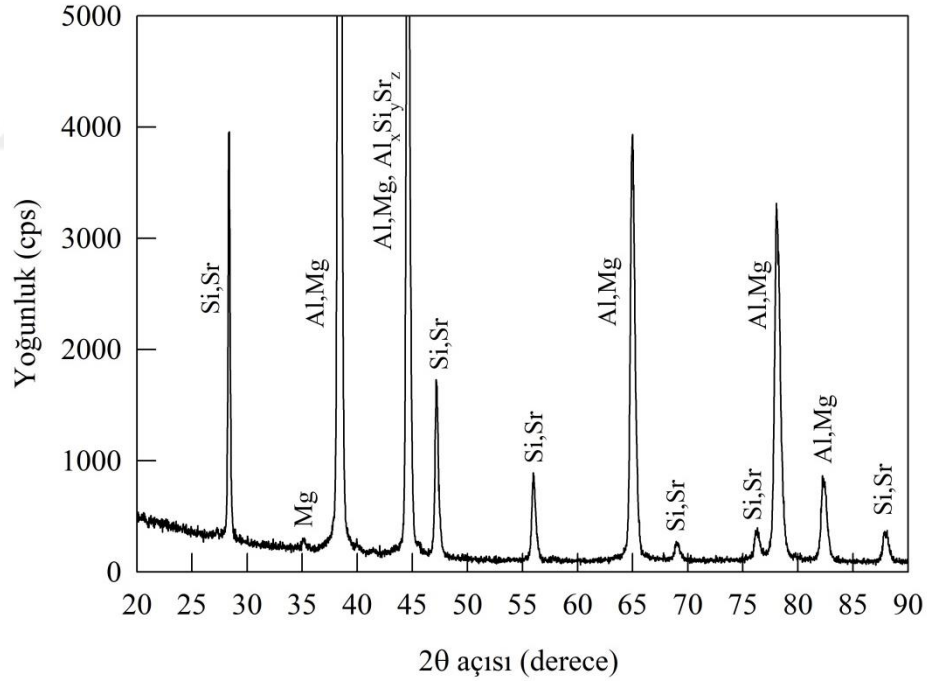
Şekil 39. Al-12Si-0,1Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni.



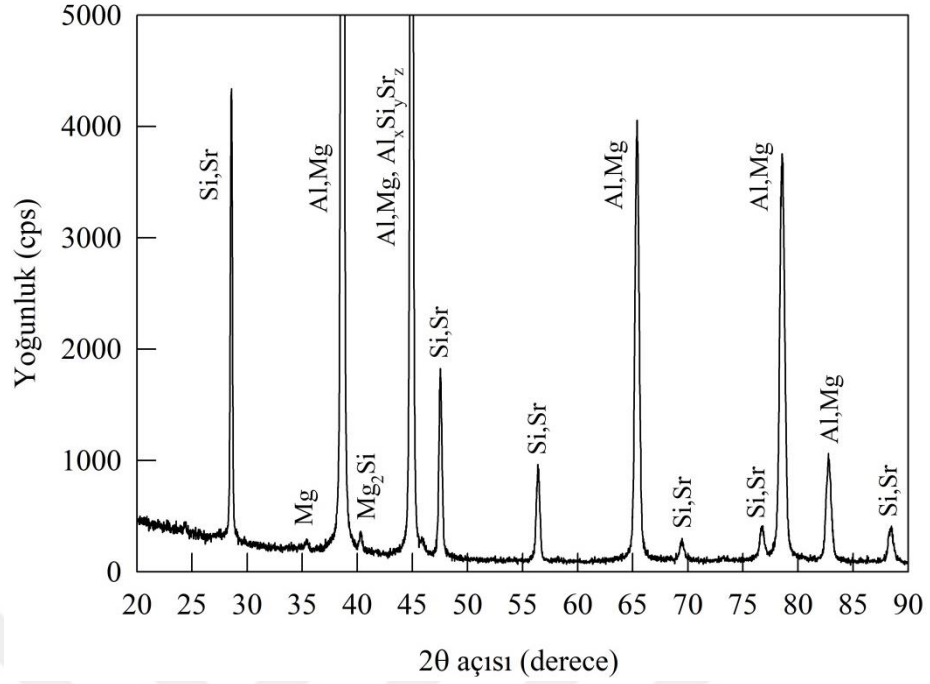
Şekil 40. Al-12Si-1,0Sr alaşımının X-ışını kırınım deseni.



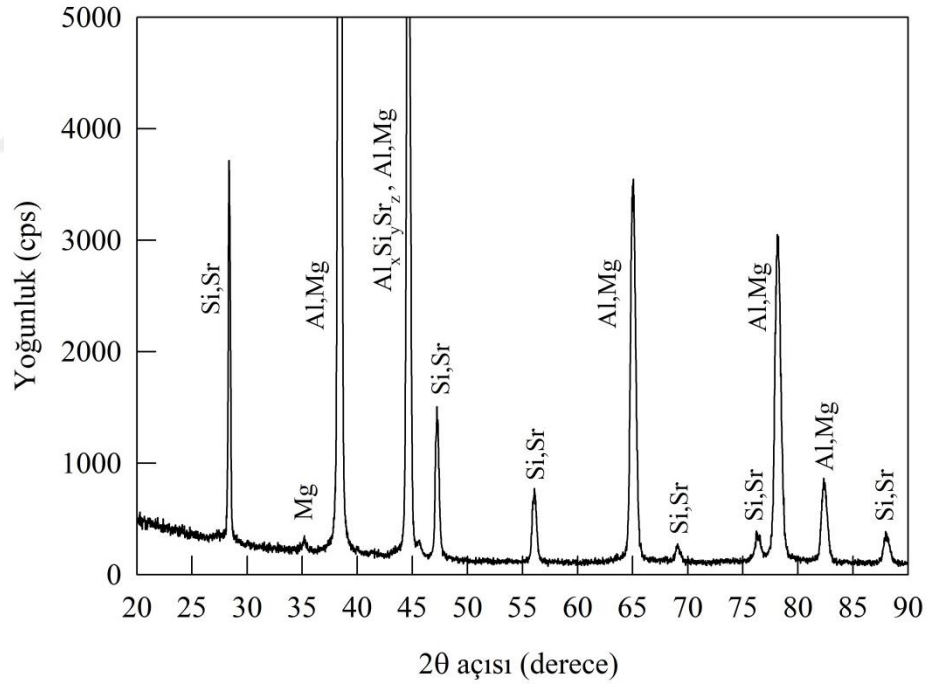
Şekil 41. Al-12Si-0,1Sr-0,2Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni.



Şekil 42. Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni.



Şekil 43. Al-12Si-0,1Sr-1,0Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni.



Şekil 44. Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg alaşımının X-ışını kırınım deseni.

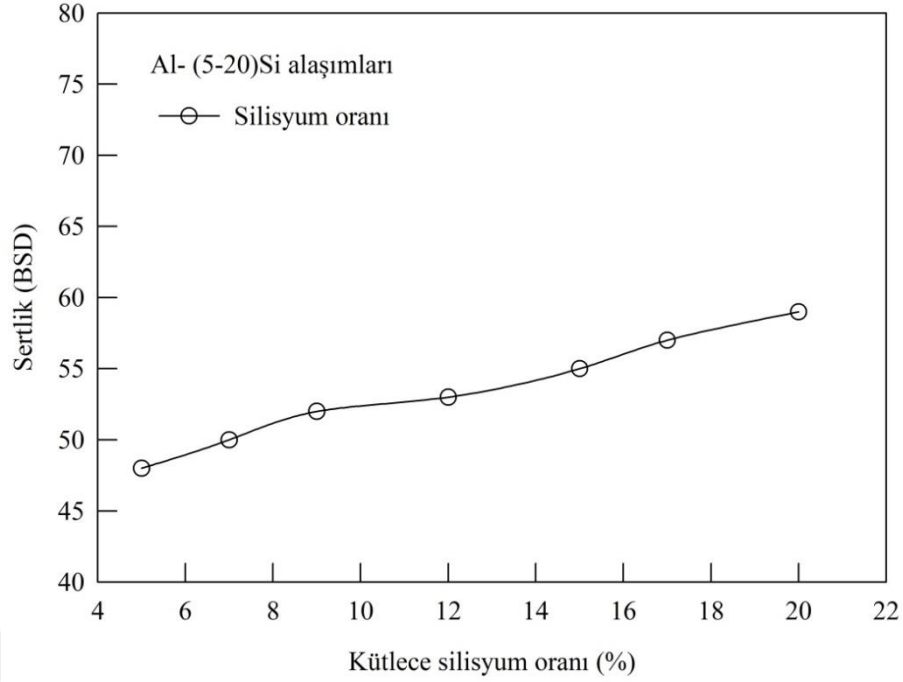
3.2. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

İncelenen alaşımların sertlik, akma, çekme ve basma dayanımı ile kopma uzaması değerleri toplu olarak Tablo 4’de verilmiştir. İkili Al-Si alaşımlarında silisyum oranına

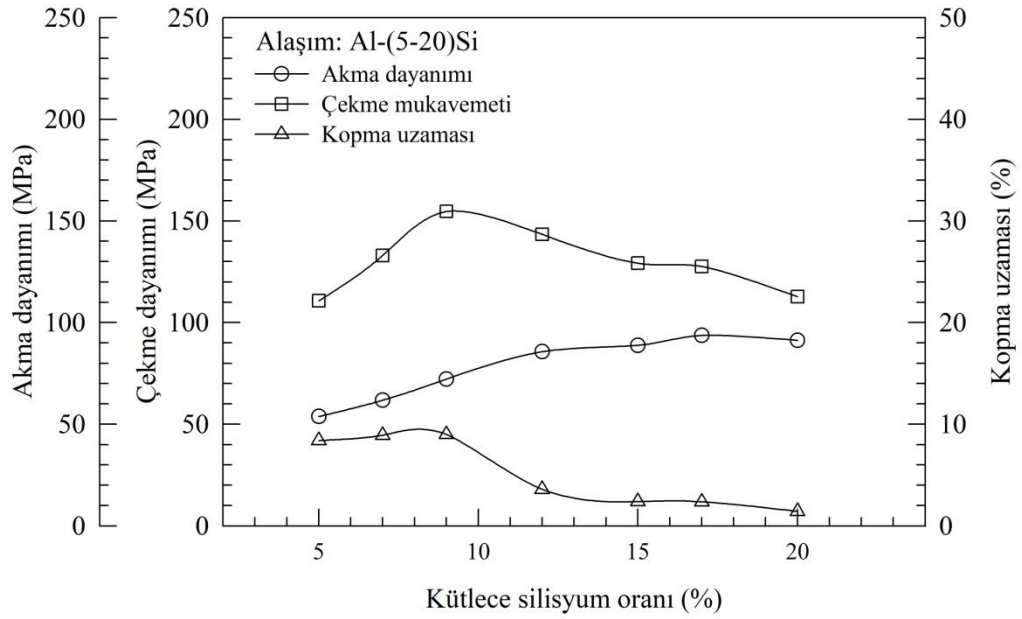
göre sertliğin değişimini gösteren eğri Şekil 45’de, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzamasının değişimini gösteren eğriler ise Şekil 46’da verilmiştir. Bu eğriler, söz konusu alaşımların sertlik değerlerinin artan silisyum oranı ile arttığını, akma dayanımlarının % 17, çekme dayanımlarının ise % 9 silisyum oranına kadar arttığını bu orandan sonra ise azaldıklarını göstermektedir, Şekil 45 ve 46. İkili Al-Si alaşımlarının kopma uzaması değerlerinin ise artan silisyum oranı ile azaldığı görülmektedir, Şekil 46.

Tablo 4. Üretilen alaşımların sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerleri.

Alaşım	Sertlik (BSD)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Al-5Si	48	53,8	110,7	8,4
Al-7Si	50	61,8	132,8	8,9
Al-9Si	52	72,2	154,7	9,0
Al-12Si	53	85,7	143,4	3,6
Al-15Si	55	88,8	129,2	2,4
Al-17Si	57	93,7	127,6	2,4
Al-20Si	59	91,3	112,8	1,5
Al-12Si-0,01B	56,2	89,17	150,6	4,7
Al-12Si-0,05B	57,8	90,93	154,1	4,9
Al-12Si-0,10B	56,8	88,20	146,5	4,3
Al-12Si-0,25B	56,5	87,83	146,7	3,9
Al-12Si-0,50B	57,6	87,40	143,1	3,2
Al-12Si-1,0B	56,3	87,10	141,1	2,9
Al-12Si-0,02Sr	58,8	82,1	160,1	13,5
Al-12Si-0,04Sr	60,7	84,1	161,9	12,8
Al-12Si-0,06Sr	62,3	86,8	165,4	11,4
Al-12Si-0,08Sr	61,3	87,5	167,3	10,9
Al-12Si-0,1Sr	58,4	89,5	167,8	10,6
Al-12Si-0,2Sr	54,8	89,9	151,8	7,8
Al-12Si-0,5Sr	54,8	90,5	143,4	3,3
Al-12Si-1,0Sr	53,1	90,9	141,6	2,9
Al-12Si-0,1Sr-0,2Mg	61,8	91,5	168,0	5,4
Al-12Si-0,1Sr-0,3Mg	63,1	98,7	173,0	5,0
Al-12Si-0,1Sr-0,4Mg	63,5	103,6	173,0	4,6
Al-12Si-0,1Sr-0,5Mg	64,0	104,0	178,0	4,4
Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg	64,0	109,5	185,7	4,4
Al-12Si-0,1Sr-0,8Mg	66,4	108,4	182,1	3,5
Al-12Si-0,1Sr-1,0Mg	67,2	102,0	171,1	2,9
Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg	63,0	109,8	177,9	4,3
Al-9Si-0,1Sr	50	77,3	163,8	14,0
Al-9Si-0,1Sr-0,6Mg	63	107,1	182,3	5,1
Al-17Si-0,1Sr	55	95,2	137,9	2,9
Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg	70	123,2	141,1	1,1



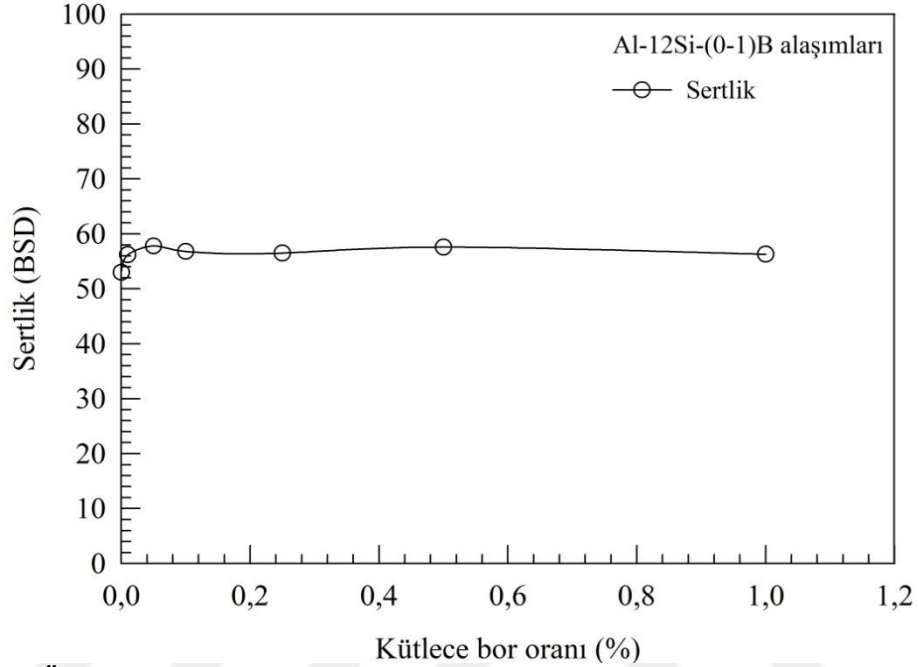
Şekil 45. İkili Al-(5-20)Si alaşımlarının sertlik değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.



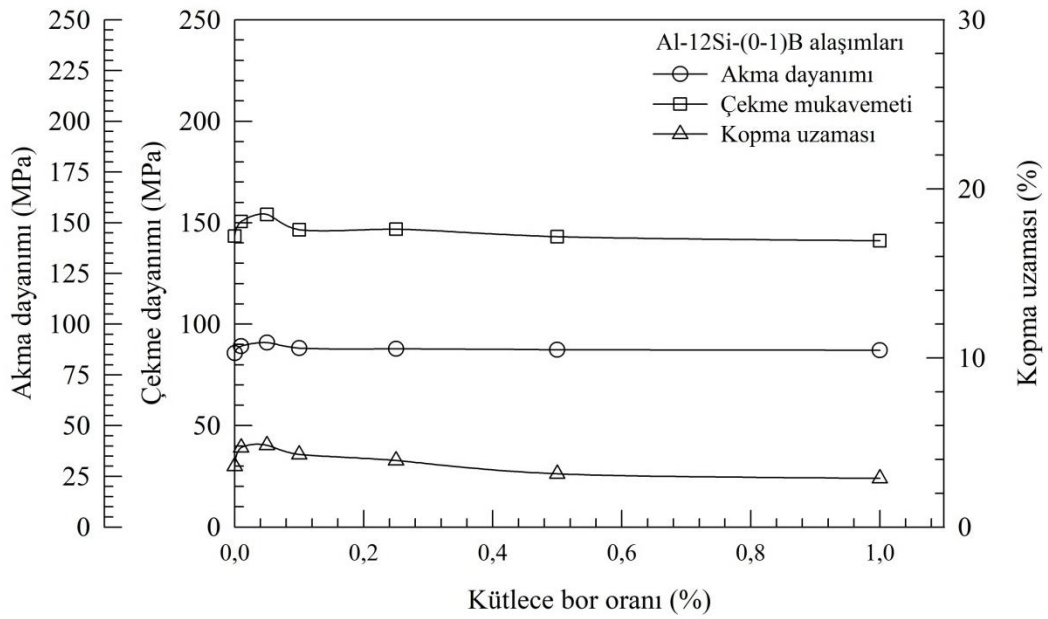
Şekil 46. İkili Al-(5-20)Si alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin silisyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.

Üçlü Al-12Si-(0-1)B alaşımlarında, artan bor oranına göre sertlik değişimini gösteren eğri Şekil 47’de, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzamasının değişimini gösteren eğriler ise Şekil 48’de verilmektedir. Bu eğriler, Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının

sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinin artan bor oranı ile %0,05 oranına kadar arttığını bu orandan sonra ise azaldığını, kopma uzaması değerlerinin ise artan bor oranı ile sürekli azaldığını göstermektedir.



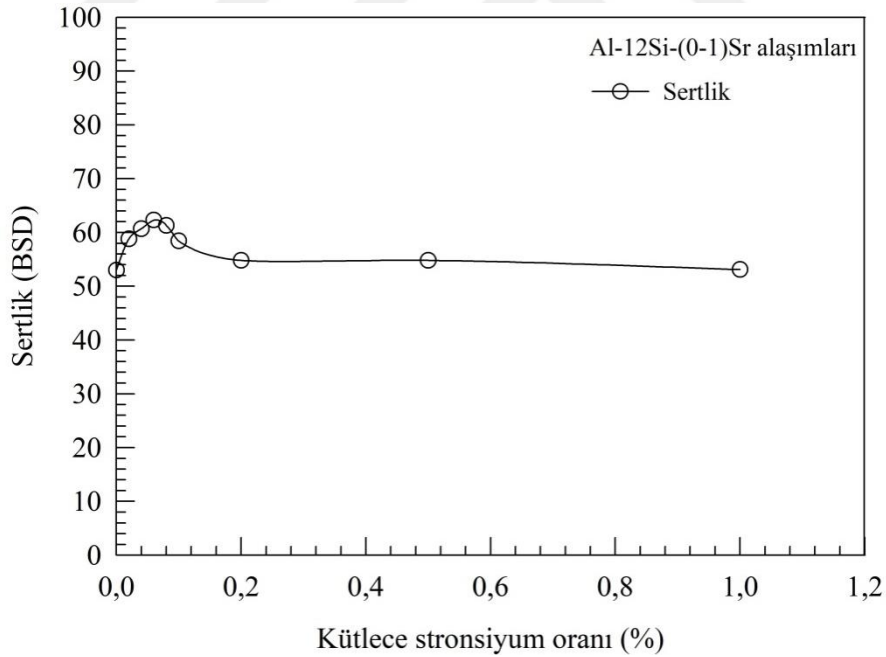
Şekil 47. Üçlü Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının sertlik değerlerinin bor oranına göre değişimini gösteren eğri.



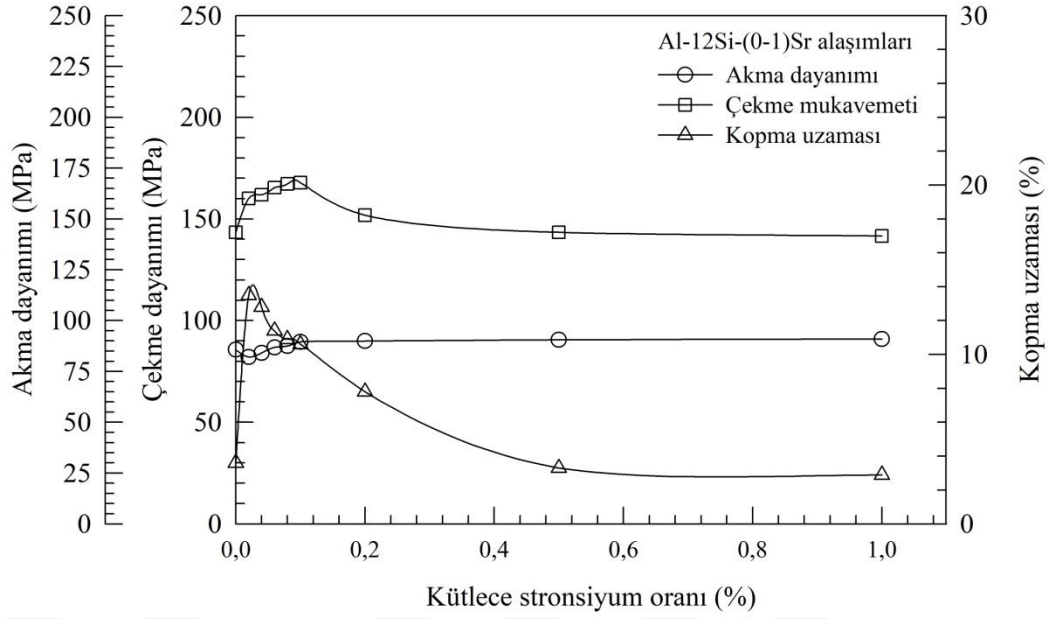
Şekil 48. Üçlü Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bor oranına göre değişimini gösteren eğriler.

Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarının sertlikleri Şekil 49’da, akma ve çekme dayanımları ile kopma uzamaları değerleri Şekil 50’deki grafikte verilmektedir. Bu alaşımların sertlik, akma ve çekme dayanımlarının %0,1 stronsiyum oranına kadar artıp, bu orandan sonra azaldığı, % 0,2 oranından sonra ise fazla değişmediği, kopma uzamasının ise %0,02 Sr oranında maksimum olduğu bu orandan sonra ise azaldığı grlmştr, Şekil 49 ve 50.

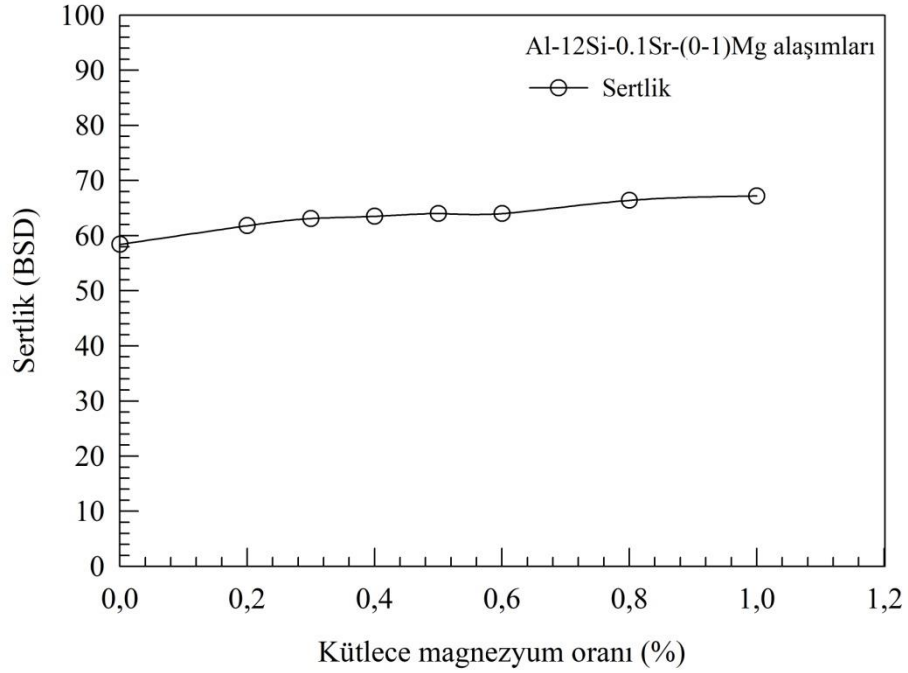
Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarında sertliğin magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğri, Şekil 51’de, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzamasının magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 52’de verilmektedir. Bu eğrilerden söz konusu alaşımların sertliğinin artan magnezyum oranı ile sürekli arttığı, akma ve çekme dayanımlarının ise %0,6 magnezyum oranına kadar arttığı, bu orandan sonra azaldığı görülmektedir, Şekil 51 ve 52. Bu alaşımların kopma uzaması değerleri ise artan magnezyum oranı sürekli azalmaktadır, Şekil 52.



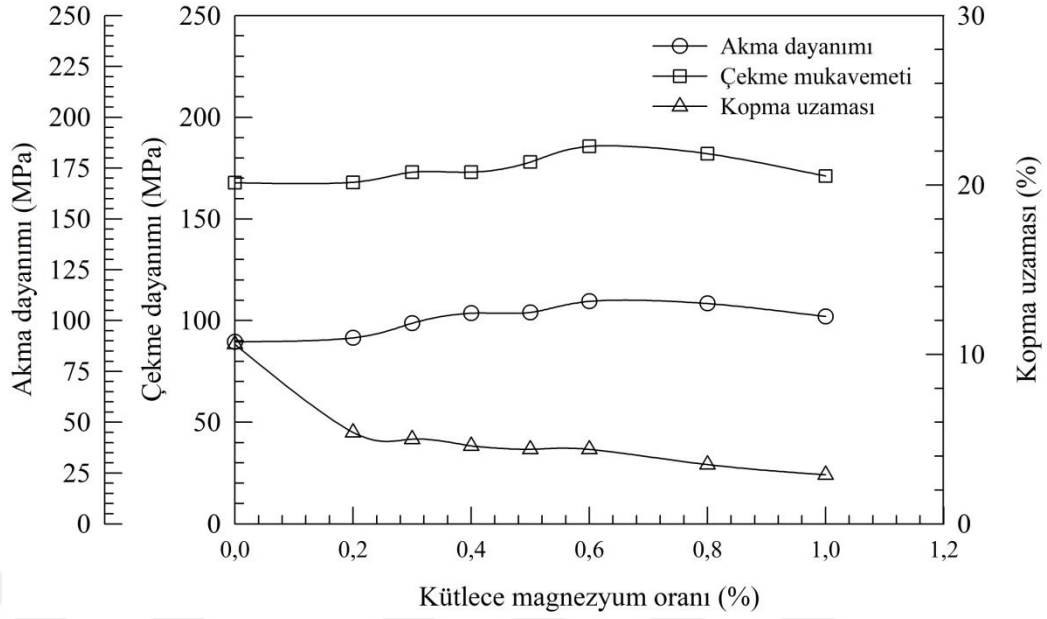
Şekil 49. l Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarının sertlik değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 50. Üçlü Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 51. Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının sertlik değerlerinin magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.



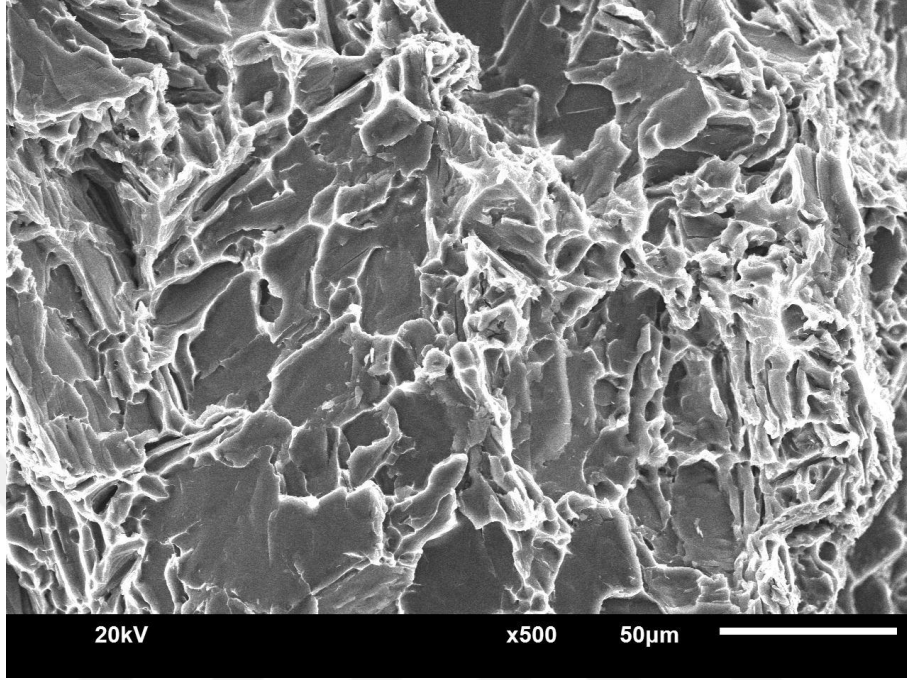
Şekil 52. Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin magnezyum oranına göre değişimini gösteren eğriler.

3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

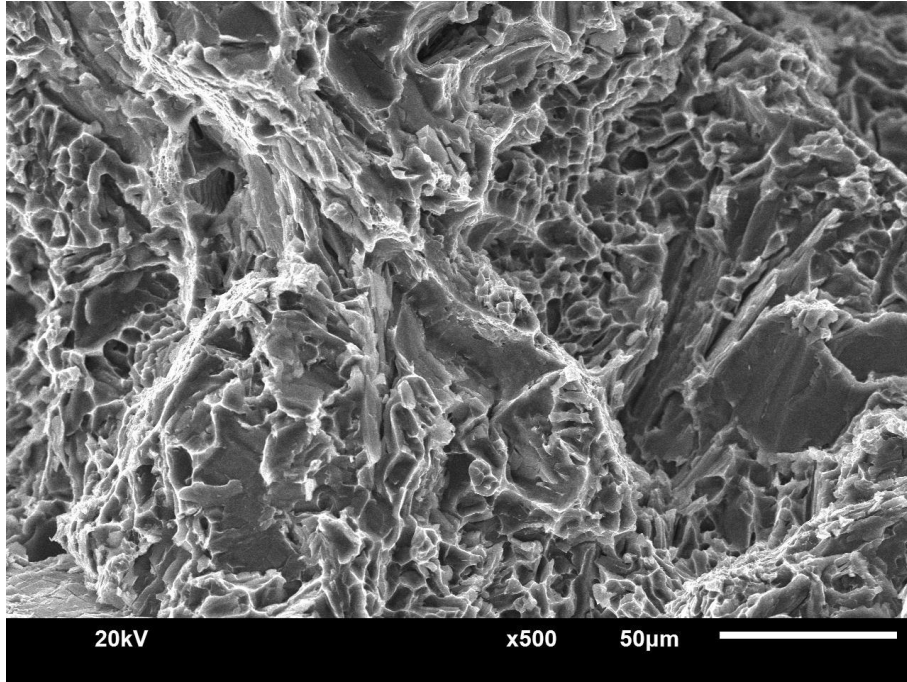
Al-12Si alaşımının çekme deneyine numunesine ait kırılma yüzeyi fotoğrafı Şekil 53'de verilmektedir. Bu fotoğraf Al-12Si alaşımının kırılma yüzeyinin çukurcuklardan ve yarık veya ayrık şekilde kırılma sonucu oluşan klivaj düzlemlerinden oluştuğunu göstermektedir. Üçlü Al-12Si-(0,01-1)B ve Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımlarının kırılma yüzeylerini gösteren fotoğraflar ise sırasıyla Şekil 54-56 ve Şekil 57-59'da verilmiştir. Bu fotoğraflardan artan bor ilavesi ile Al-12Si-(0,01-1)B alaşımlarının kırılma yüzeylerinde klivaj düzlemlerinin büyüklüğünün arttığı (Şekil 54-56), Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımlarında ise kırılma yüzeylerinin genel olarak çukurcuklardan oluştuğu ancak %0,02 stronsiyum oranından sonra kırılma yüzeylerinde klivaj düzlemlerinin oluştuğu görülmektedir, (Şekil 57-59).

Al-12Si-0,1Sr-(0,02-1)Mg alaşımlarının çekme deneyi numunelerinden elde edilen kırılma yüzeyi fotoğrafları ise düşük oranlarda magnezyum içeren Al-12Si-0,1Sr esaslı alaşımlarda kırılma yüzeylerinin daha çok çukurcuk içerdiğini, magnezyum oranı arttıkça yüzeyde klivaj düzlemlerinin oluştuğunu göstermektedir, (Şekil 60-62). Beşli Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg alaşımının kırılma yüzeyleri de diğer alaşımlarının

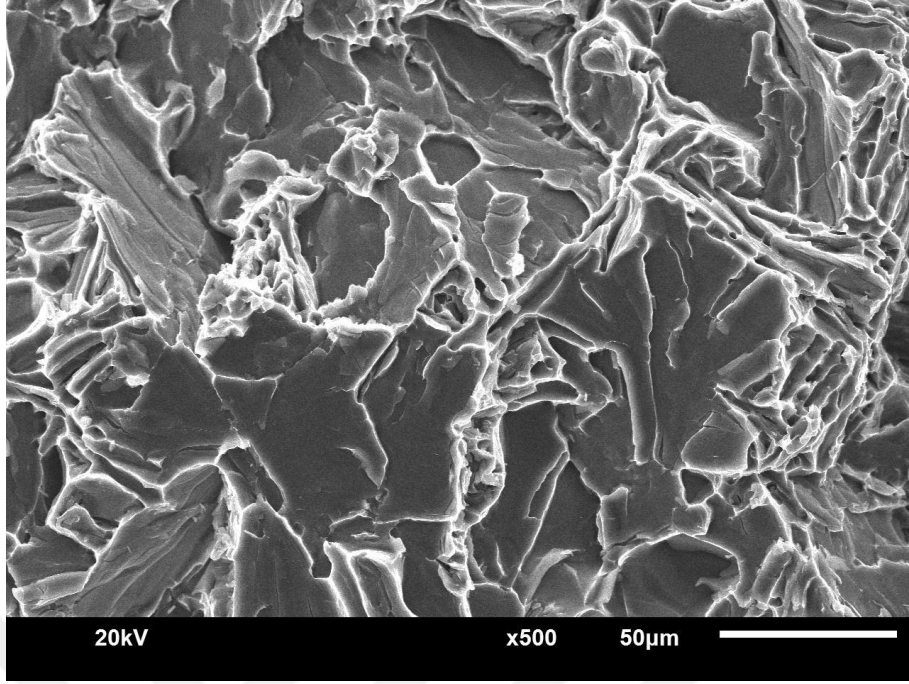
yüzeylerine benzer olarak çukurcuk ve klivaj düzlemlerinden oluşan bir görüntü sergilemiştir, (Şekil 63).



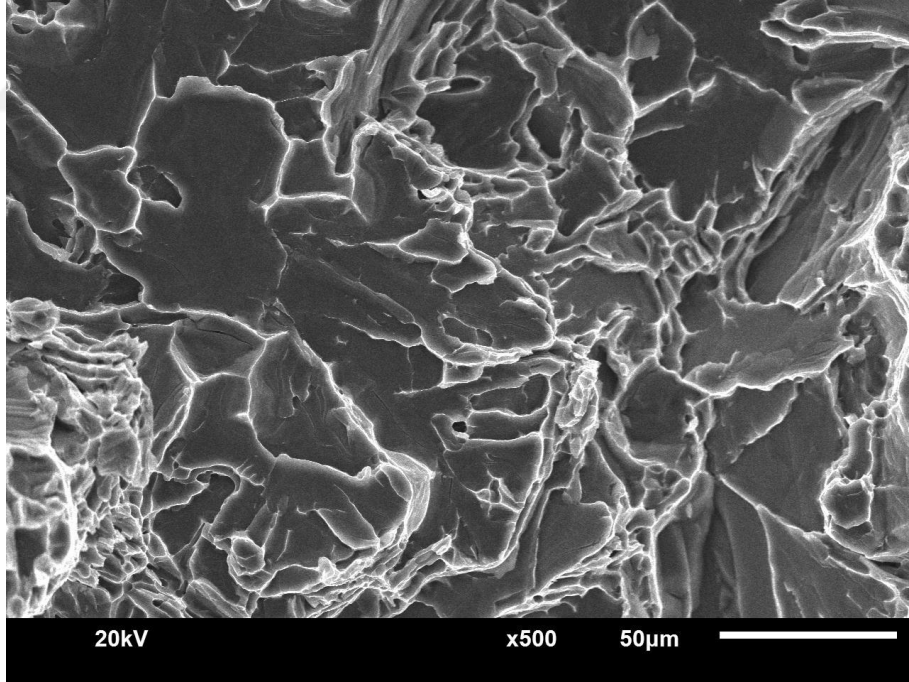
Şekil 53. Al-12Si alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



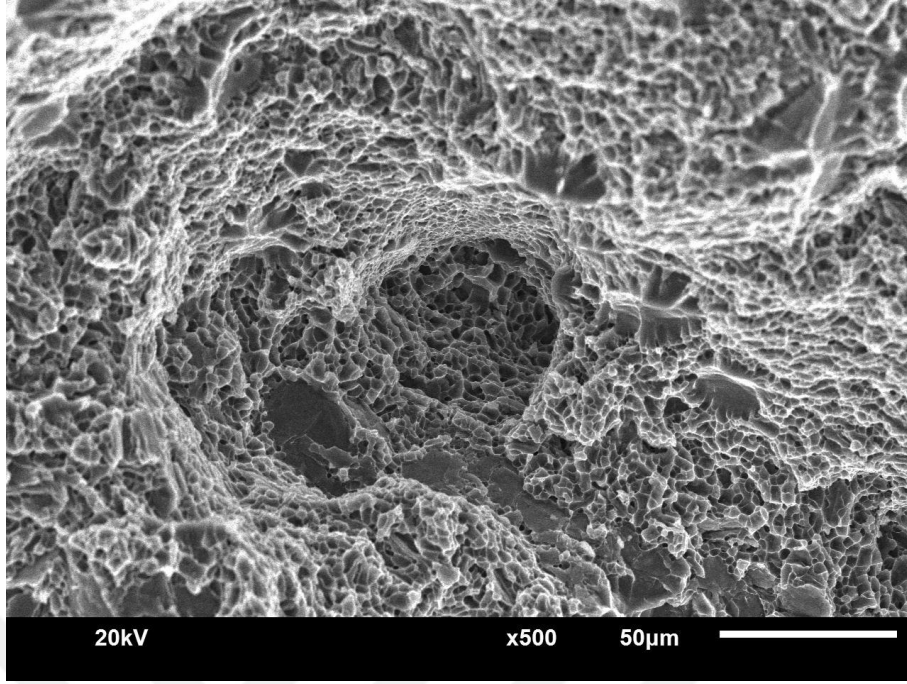
Şekil 54. Al-12Si-0,01B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



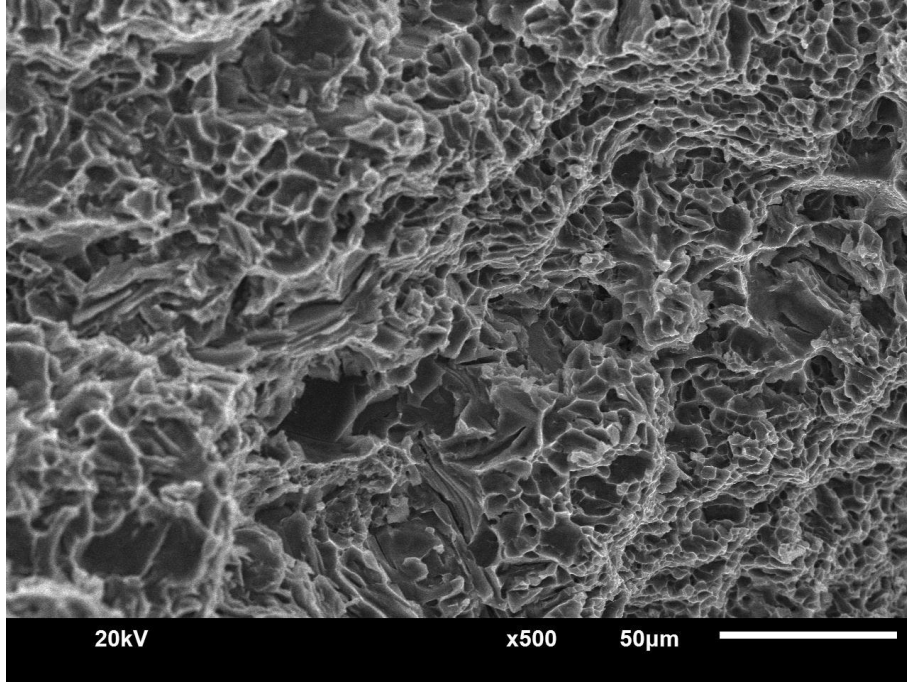
Şekil 55. Al-12Si-0,05B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



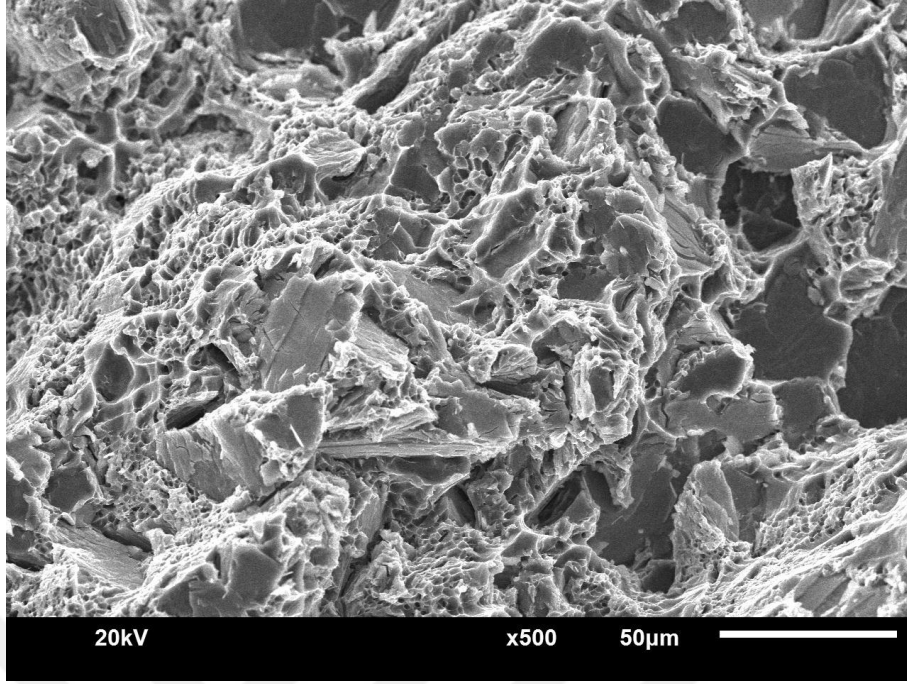
Şekil 56. Al-12Si-1,0B alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



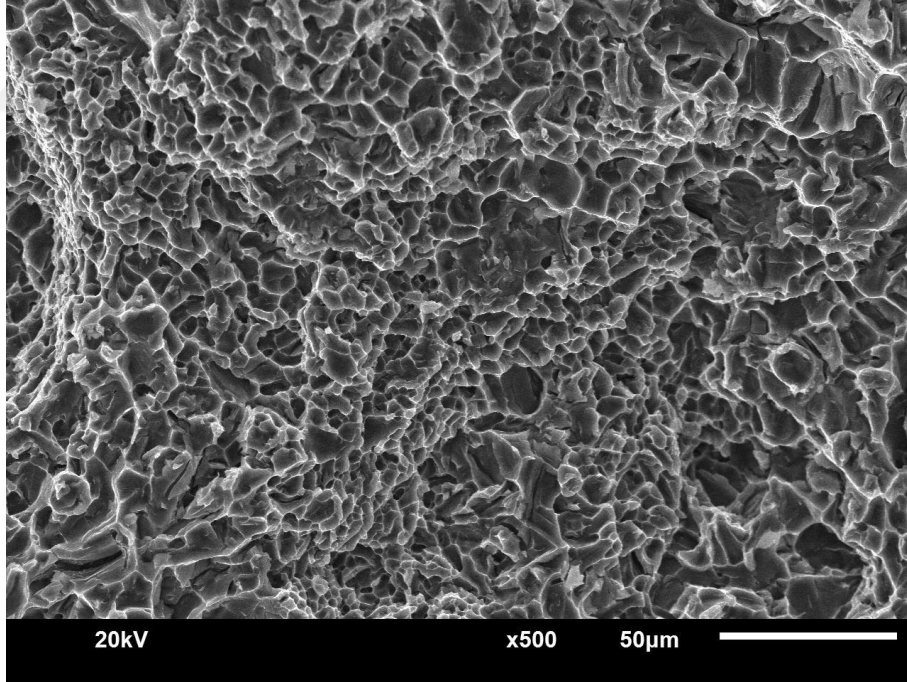
Şekil 57. Al-12Si-0,02Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



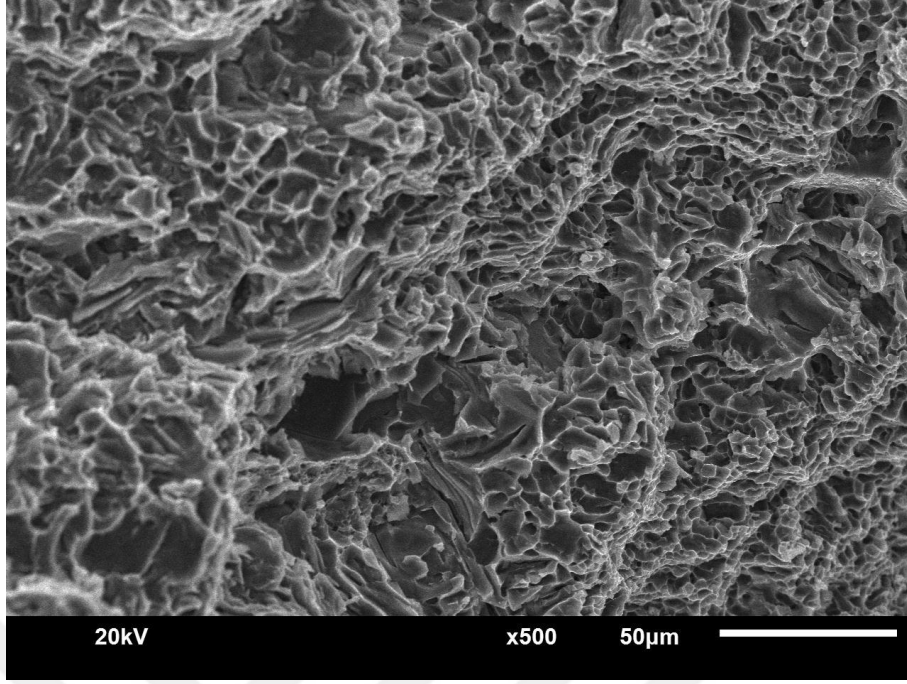
Şekil 58. Al-12Si-0,1Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



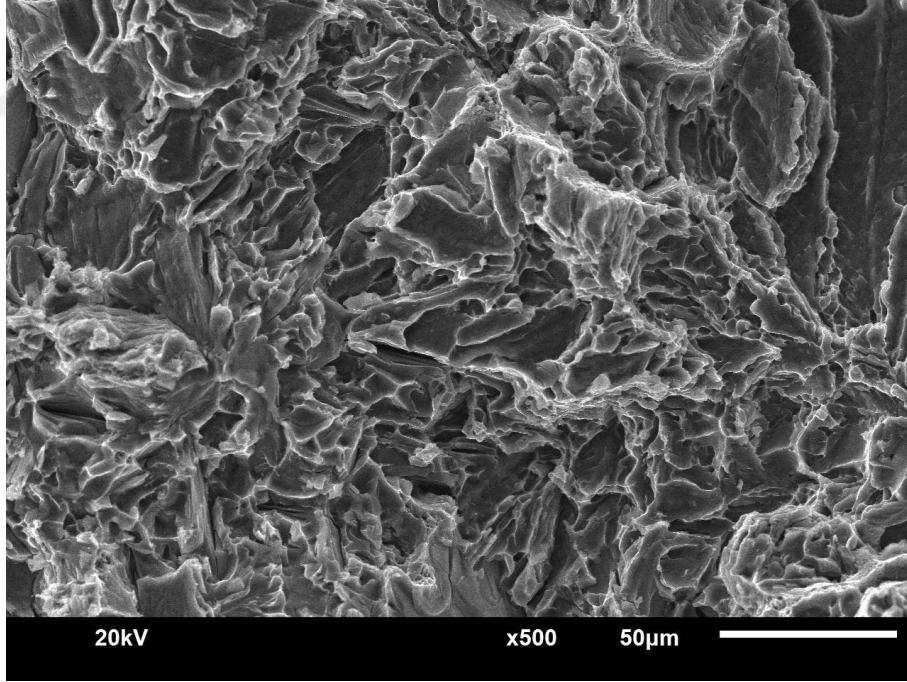
Şekil 59. Al-12Si-1,0Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



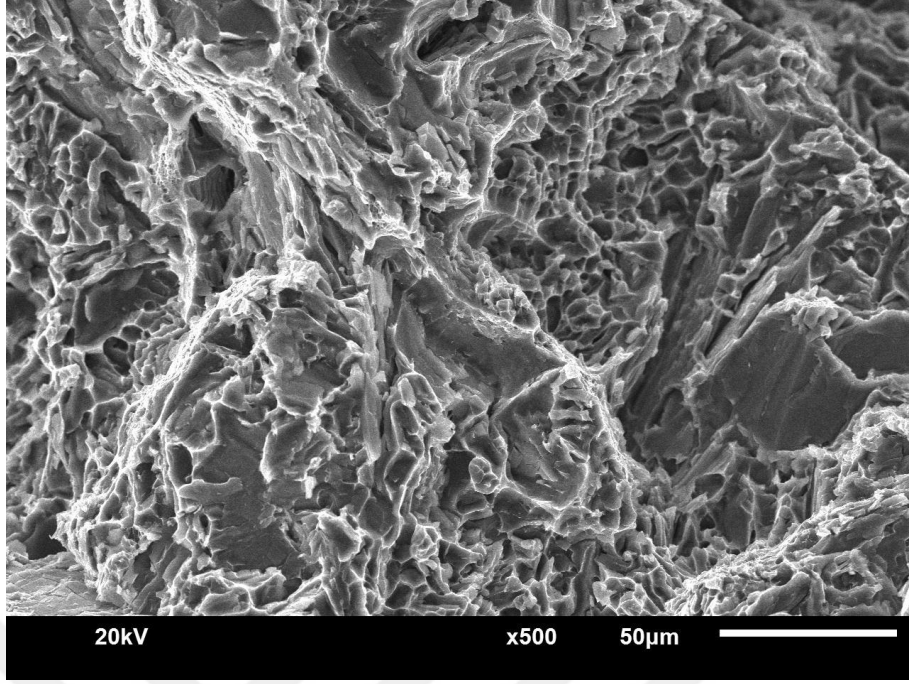
Şekil 60. Al-12Si-0,1Sr-0,2Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 61. Al-12Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 62. Al-12Si-0,1Sr-1Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 63. Al-12Si-0,1Sr-0,05B-0,6Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

İkili Al-9Si, Al-12Si ve Al-17Si alaşımlarının içyapısı alüminyumca zengin α dendiritlerinden, primer silisyum parçacıklarından ve ötektik al-si fazından oluşmaktadır (Şekil 16-18). Bu fazların oluşumu söz konusu ötektik altı ve üstü alaşımların katılma davranışına göre açıklanabilir. Şöyleki, ötektik altı bileşime sahip olanlarda Al-Si faz diyagramına göre, sıvı metalin sıcaklığı katılma noktasına kadar düştüğünde önce alüminyum çekirdekleri oluşur. Sıcaklık düşmeye devam ettikçe alüminyum çekirdekleri farklı yönlerde büyür ve dendiritik formdaki α fazı oluşur. Soğuma süresi arttıkça daha fazla alüminyum katılır ve dendiritler büyür. Sıvı metalin kimyasal bileşimi ötektik bileşime (Al-12,6Si), sıcaklığı ötektik noktanın sıcaklık değerine geldiğinde dendiritler arası bölgelerde alüminyum matris üzerinde iğne şekilli ötektik silisyum parçacıklarının dağıldığı ötektik katılma meydana gelir. Üretilen ötektik altı alaşımların içyapısında görülen primer silisyum parçacıkları, denge dışı katılma nedeniyle oluşmuş olabilir. Ötektik üstü bileşime sahip alaşımda (Al-17Si) ise sıvı metal soğumaya başladığında önce ergime noktası daha yüksek olan primer silisyum fazı katılır, sıvı metalin kimyasal bileşimi ötektik bileşime ulaştığında ise ötektik alüminyum-silisyum fazı oluşur. Bundan dolayı soğuma tamamlandığında söz konusu alaşımın içyapısı ötektik alüminyum-silisyum fazı ile primer silisyum fazından oluşmuş olur. Ötektik üstü alaşımlarda görülen α dendiritleri denge dışı soğuma şartlarından kaynaklanmış olabilir.

İkili Al-Si alaşımına %0,01 oranında bor ilavesi yapılması durumunda α dendiritlerinin küçüldüğü, ötektik silisyum parçacıklarında ise önemli bir değişim olmadığı görüldü, (Şekil 19). Ancak %0,01 oranından daha fazla bor katkıları α dendiritlerini küçültmenin ve sayılarını artırmanın yanı sıra ötektik silisyum parçacıklarının da uzamasına ve daha sıkı dizilmelerine yol açmıştır, (Şekil 20 ve 21). Bu yapısal değişiklikler ötektik teori, heterojen çekirdeklenme mekanizması ve yapısal aşırı soğuma nedeniyle tane büyümesinin kısıtlanmasına bir başka deyişle borun tane inceltici ve çekirdeklenmeyi artırıcı etkisine dayandırılarak açıklanabilir (Jones ve Pearson, 1976; Chen vd., 2016; Liu vd., 2011; Schumacher vd., 1998). Şöyle ki; ötektik teoriye göre yaklaşık 660°C sıcaklıkta alüminyum ve bor içeren sıvı faz ötektik

dönüşüm ile Al ve AlB₂ katlarına dönüşmektedir. Bu dönüşüm ürünlerinden Al'nin dönüşüm sıcaklığı daha düşük olan bir başka deyişle daha sonra katılacak olan α katı çözeltilisinin heterojen çekirdeklenmesine alt yapı oluşturduğu bilinmektedir (Chen vd., 2016). Ayrıca, çekirdeklenme mekanizmasında çekirdeği oluşturan faz içerisinde başka bir elementin çözünmesinin de önemli bir rolü olduğu ve borun bu faz (çekirdekler) içinde çözüldüğü bilinmektedir (Easton ve StJohn, 1999a; Easton ve StJohn, 1999b; Easton ve StJohn, 2001). Alaşımlarda bor oranı arttıkça çekirdekler içinde çözünen bor miktarı artacağından, Maxwell ve Hellawell tarafından ortaya koyulan $Q=C_0m(k-1)$ bağıntısına (Q: büyümeyi kısıtlayıcı faktör, C₀: çözünen madde oranı, m: likidüs çizgisinin eğimi, k: alaşımın denge bölünme katsayısı) göre Q artar ve bu nedenle tane büyümesi engellenir. Maxwell ve Hellawell modeline göre çekirdek büyümesinin kısıtlanması sıvı metalde daha fazla çekirdek oluşumuna yol açmakta ve daha ince taneli yapının ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Maxwell, I. ve Hellawell, A., 1975). Üçlü Al-12Si-B alaşımlarında ikili Al-12Si alaşımına göre daha yüksek sıcaklıkta daha fazla çekirdeğin oluşması katılaşmanın daha fazla sayıda çekirdek üzerinde devam etmesine neden olur. Böylece sıvı metaldeki alüminyumun daha fazla sayıda çekirdek üzerinde daha yüksek sıcaklıkta katılaşması nedeniyle yapıda daha fazla alüminyumca zengin tane/dendirit oluşur. Dendiritler sıvı metalden ağırlıklı olarak katılaşma noktası daha yüksek olan alüminyumu çekerek büyüyeceği için katılaşma devam ettikçe sıvı metalin içerisindeki alüminyum oranı azalır. Dendirit (α fazı) sayısının artarken sıvıdaki alüminyum miktarının azalmasının da dendiritlerin büyümesinin önünde bir engel oluşturması dendiritlerin küçük kalmasına katkı yapmış olabilir. Al-12Si-B alaşımlarına %0,05 oranından daha fazla yapılan bor katkılarının dendiritlerin boyutlarını fazla değiştirmemesi bor ile alüminyum arasındaki çözünürlük limitine ulaşılmış olmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, Maxwell ve Hellawell bağıntısından ve literatürden (Alamdari vd., 2012; Wang vd., 2012; Chen vd., 2016; Johnsson, 1994a; Johnsson, 1994b; Johnsson ve Backerud, 1996; Spittle ve Sadli, 1995) tane incelmesinin çözünürlüğe bağlı olarak değiştiği, çözünürlüğün artması durumunda arttığı, azalması durumunda ise azaldığı anlaşılmaktadır. Tane boyutunun sabit kalması çözünürlüğün sabit kalmasıyla bir başka deyişle çözünürlük limitine ulaşılması ile mümkün olabildiğinden Al-12Si-B alaşımlarında %0,05 bor katkılarına kadar borun α fazı içerisinde çözünürlüğünün arttığı, bu oranda maksimum olduğu ve daha sonra sabit

kaldığı anlaşılmaktadır. Artan bor oranı ile ötektik silisyum parçacıklarının daha ince ve sıkı dizilimli bir hal alması ise ötektik dönüşüm şartları oluşmadan önce gerçekleşen çekirdeklenme mekanizması nedeniyle sıvıdan daha fazla alüminyum çekilmesinden ve ötektik oluşumu için gerekli alüminyumun azalması nedeniyle söz konusu dönüşüm reaksiyonun zorlaşmasından kaynaklanmış olabilir.

Üçlü Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımlarının içyapılarının ikili Al-12Si alaşımında olduğu gibi α dendritleri ile primer ve ötektik silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlemlendi, (Şekil 22-25). Ancak üçlü Al-12Si-(0,02-1)Sr alaşımlarında ikili alaşıma göre özellikle ötektik silisyum parçacıklarının daha küçük olduğu sayılarının ise daha fazla olduğu ve dendrit oluşma eğiliminin arttığı görüldü, (Şekil 22-25). Ayrıca stronsiyum oranının %0,1 değerini aşması durumunda bu alaşımların içyapılarında Al_4Sr fazının oluştuğu gözlemlenmiştir, (Şekil 25 ve 40). Stronsiyum ilavesi ile ikili Al-12Si alaşımının içyapısında ortaya çıkan bu değişimler döküm sonrası soğuma koşullarında neden olduğu değişime dayandırılarak açıklanmaktadır (Xu vd., 2017; Liao vd., 2002). Şöyle ki; literatürde (Liao vd., 2002) stronsiyum ilavesi ötektik reaksiyon süresince açığa çıkan ısının artmasına ve bu nedenle ikili alaşıma göre ötektik dönüşüm sıcaklığının düşmesine, ötektik noktanın sağa yani daha yüksek silisyum oranına doğru kaymasına ve daha düşük sıcaklıkta çekirdeklenmenin başlamasına neden olduğu ifade edilmektedir. Çekirdeklerin büyüme sıcaklığının düşmesi de Al-Si ötektik çekirdeklerinin etrafında meydana gelebilecek katılaşmayı bir başka deyişle çekirdek büyümesini engellediği için ötektik silisyum parçacıklarının daha ince taneli kaldığı ileri sürülmektedir (Nogita ve Dahle, 2001a, 2001b, 2001c; Nogita vd., 2013).

Dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0,2-0,6)Mg alaşımlarının içyapıları üçlü Al-12Si-0,1Sr alaşımlarının içyapısında olduğu ince yapılı α fazı ve kısmen küreselleşmiş ötektik fazdan oluşmaktadır, (Şekil 26 ve 27). Ancak Al-12Si-0,1Sr-Mg alaşımlarında magnezyum oranı %0,6 yi aştığında içyapıda Mg_2Si fazının oluştuğu görülmektedir, (Şekil 28 ve 43). Bu fazın genellikle dendrit dışı (dendritler arası) bölgelerde oluşması nedeniyle alüminyum içerisinde çözünemeyen fazlalık magnezyumun silisyum ile reaksiyona girmesi sonucunda meydana geldiği söylenebilir.

Al-12Si, Al-12Si-0,01B, Al-12Si-0,05B ve Al-12Si-1B alaşımlarının X-ışını kırınım desenlerinden α (alüminyum) fazına ait piklerin 38° , 46° , 65° , 78° ve 82° , silisyum fazına ait piklerin ise 28° , 47° , 56° , 69° , 76° ve 88° lik 2θ açılarında olduğu görölmektedir, (şekil 34-35). Al-12Si alaşımına yapılan bor ilavesinin 45° lik 2θ açısında gözlenen alüminyum piklerinin şiddetlerinin azalmasına yol açtığı gözlendi, (şekil 33 ve 35). Alüminyum piklerinin şiddetindeki azalma bor katkısı nedeniyle alüminyum dendiritlerinin küçölmesinden kaynaklanmış olabilir. Bor katkısının %0,05'i aşması durumunda ise 28° lik 2θ açısındaki silisyum pikinin şiddetinin arttığı göröldü, şekil 35. Bu durum artan bor oranıyla dendirit dışı yapıdaki ve ötektik fazdaki silisyum yoğunluğunun artmasının kaynaklanmış olabilir.

Al-12Si-Sr alaşımlarında Al-12Si alaşımından farklı olarak 43° 'de $Al_xSi_ySr_z$ fazının ve %0,1 Sr oranından sonra 27° ve 34° lerde Al_4Sr pikinin olduğu göröldü, (şekil 38-40). Ayrıca, üçlü Al-12Si-Sr alaşımlarına ait X-ışını kırınım desenlerinde $Al_xSi_ySr_z$ ve Al_4Sr fazları dışındaki stronsiyum piklerinin silisyum pikleri ile aynı 2θ açılarında olduğu gözlendi. Bu bulgulardan stronsiyumun alüminyum içerisinde çözümlenme yerine alüminyum ile bileşik oluşturma eğilimi sergilediği, silisyum içerisinde ise çözümlenirlik sergilediği, silisyum piklerinin açılarında ve yoğunluklarında herhangi bir değişikliğin gözlenmemesinden ise kafes yapısında stronsiyum atomlarının silisyum atomlarının yerini aldığı ve kafes düzlemlerinin mesafelerinde bir değişikliğe yol açmadığı anlaşılmaktadır. Dörtlü Al-12Si-0.1Sr-Mg alaşımlarında ise %0,6 magnezyum oranından sonra Al-12Si alaşımındaki piklere ilave olarak yaklaşık 35° ve 40° lik 2θ açılarında Mg_2Si fazının olduğu göröldü, (şekil 41-43). Bu veriler de magnezyumun %0,6 ya kadar alaşımın içyapısında özellikle alüminyumca zengin faz(lar) içerisinde çözümlendiğini bu orandan sonra ise çözümlenemeyip saf veya bileşik halinde yapı içinde dağıldığını göstermektedir.

Bor ilavesi ile Al-12Si alaşımının sertliğinin arttığı ancak, bor oranı arttıkkça sertlikte belirgin bir değişimin olmadığı göröldü, şekil 45. Bor oranı ile sertlikte meydana gelen artış içyapıdaki alüminyumca zengin dendiritlerin küçölmesinden ve ötektik fazın daha sıkı diziliminden kaynaklanmış olabilir. Al-12Si alaşımına stronsiyum katılması durumunda ise elde edilen üçlü alaşımların sertliği %0,1

stronsiyum oranına kadar artış gösterip bu değerden sonra ise azaldı, (Şekil 47). Ancak yaklaşık %0,2 stronsiyum oranından sonra Al-12Si-Sr alaşımlarının sertlikleri belirgin bir değişim göstermedi, (Şekil 47). Stronsiyum katkısı ile Al-12Si alaşımlarının sertliğinde meydana gelen artış içyapılarındaki ötektik silisyum parçacıklarının parçalanıp daha homojen dağılmasından kaynaklanmış olabilir. Stronsiyumun söz konusu alaşımın sertliğinde yol açtığı azalma ise stronsiyum katkısı ile ötektik noktanın daha yüksek silisyum oranlarına kayması nedeniyle yapıda alüminyumca zengin fazın hacimsel oranının artmasından kaynaklanmış olabilir. Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının sertliğinin magnezyum katkısıyla arttığı ve bu artışın artan magnezyum oranı ile sürekli olduğu görüldü, (Şekil 51). Magnezyum içeren dörtlü alaşımların sertliğindeki bu değişim magnezyumun alüminyum içerisinde çözünmesi nedeniyle oluşan katı çözeltili sertleşmesinin ve belli oranlardan sonra yapıda çökelen Mg₂Si fazının etkisinden kaynaklanmış olabilir.

Al-12Si-(0-1)B alaşımlarının akma ve çekme dayanımlarının %0,05 bor oranına kadar arttığı bu orandan sonra azaldığı görüldü, (Şekil 48). Al-12Si-(0-1)Sr alaşımlarında ise akma ve çekme dayanımı değerleri stronsiyum katkısı ile arttı ancak çekme dayanımı değerleri %0,1Sr oranından sonra azaldı, (Şekil 50). Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarının akma ve çekme dayanımı değerleri ise %0,6 Mg oranına kadar artarken bu orandan sonra her iki değer de azaldı, (Şekil 52). Al-12Si alaşımının akma ve çekme mukavemeti değerlerine bor, stronsiyum ve magnezyumun etkisi içyapıda neden oldukları değişime dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki ötektik bileşime yakın Al-Si alaşımlarında mukavemet değerlerinin özellikle alüminyum dendritlerinin ve ötektik fazın yapıdaki durumuna ve dağılımına bağlı olduğu bilinmektedir (Liao vd., 2002). Bor katkısı ile hem α dendritlerinin küçülmesi nedeniyle dendrit kol mesafelerinin azalması hem de bu elementlerin alüminyum içerisinde çözünmeleri nedeniyle ortaya çıkan katı çözeltili sertleşmesinin etkisiyle dislokasyonların hareketlerinin engellenmesi bu alaşımların mukavemet değerlerinde meydana gelen artışın sebebi olabilir. Ayrıca ötektik silisyum fazının bor ilavesi ile daha sıkı dizilimli, stronsiyum ilavesi sonucunda ise parçalanarak nispeten küresel ince taneli bir dağılım sergilemesi mukavemet artışına katkı sağlamış olabilir. Bor oranının % 0,05'i aşması durumunda alaşımların çekme mukavemeti değerlerinde meydana gelen azalma bu katkı

oranlarından sonra dendiritik yapının parçalanması veya bozulmasından kaynaklanmış olabilir. İkili Al-12Si alaşımına stronsiyum katkısı ile elde edilen mukavemet artışı içyapıda dendirit oluşumunun artması ve $Al_xSi_ySr_z$ fazının oluşması nedeniyle dislokasyonların hareketinin zorlaşması sonucu ortaya çıkmış olabilir. Magnezyumun Al-12Si-Sr alaşımlarının mukavemetinde neden olduğu artışın sebebi ise alüminyumca zengin dendiritler içerisinde çözünmesinden kaynaklanan katı çözelti sertleşmesi olabilir. Üçlü Al-12Si-Sr alaşımlarının çekme mukavemetinde %0,1Sr oranından sonra, dörtlü Al-12Si-0,1Sr-(0-1)Mg alaşımlarında ise %0,6 Mg oranından sonra görülen azalma sırasıyla bu alaşımların içyapısında oluşan Al_4Sr ve Mg_2Si bileşiklerinin mukavemeti zayıflatıcı etkisinden kaynaklanmış olabilir. Zira literatürden (Savaşkan vd., 2004; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2014) alüminyum alaşımlarının dendiritler arası bölgelerinde oluşan gevrek fazların mukavemeti düşürdüğü bilinmektedir.

Al-12Si alaşımına düşük oranlarda yapılan bor ve stronsiyum katkılarının kopma uzamasını arttırdığı, ancak bu katkıların oranı arttıkça Al-12Si-B ve Al-12Si-Sr alaşımlarının kopma uzaması değerlerinin azaldığı görüldü, (Şekil 48 ve 50). Al-12Si-0,1Sr alaşımına magnezyum katılması durumunda ise kopma uzamasının artan magnezyum oranı ile sürekli azaldığı görüldü, Şekil 52. Bor ve stronsiyum ilavesi ile kopma uzaması değerlerinde meydana gelen artış dendiritlerin incelmelerinden ve ötektik fazın modifikasyonundan, azalma ise söz konusu elementlerin oranı arttıkça dendiritik yapının parçalanması nedeniyle olmuş olabilir. Magnezyum katkısı nedeniyle Al-12Si-0,1Sr alaşımının kopma uzamasında meydana gelen azalma ise magnezyum elementinin kafes yapısının özelliğinden kaynaklanmış olabilir. Zira, literatürde magnezyum elementinin sahip olduğu sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısında dislokasyonların c kafes parametresi yerine c+a kafes parametresi yönünde daha düşük enerji ile daha kolay kaydığı ve bununda sünekliği olumsuz etkilediği ileri sürülmektedir (Wu ve Curtin, 2015).

İncelenen alaşımlara ait çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeyleri çukurcuklardan ve yarık veya ayrık şekilde kırılma sonucu oluşan klivaj düzlemlerinden oluşmaktadır, (Şekil 53-63). Al-12Si alaşımına düşük oranlarda yapılan bor ve stronsiyum katkıları kırılma yüzeylerindeki çukurcuk oranını artırmakta ancak, belli

oranlardan sonra ise klivaj düzlemlerinin oranını arttırmaktadır. Al-12Si-0,1Sr alaşımına yapılan magnezyum katkısı ise bu alaşımın kırılma yüzeyinde klivaj düzlemlerinin oranını sürekli arttırmıştır, (Şekil 60-63). Alaşımların kırılma yüzeylerindeki bu gözlemler bor, stronsiyum ve magnezyumun içyapılarında neden olduğu değişikliklere dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, Al-Si esaslı alaşımlarda kırılma mekanizması silisyum kristallerinin boyutu ve dağılımına, silisyum kristalleri ile matrisin birbirine bağlanma kuvvetine ve silisyum kristallerinin kırılma kolaylığı ile ilişkili olduğu ileri sürülmektedir (Zhou ve Duszczek, 1990). Kaba silisyum kristallerinden kaynaklanan kırılma taneler arası hasar karakteristiği göstermektedir ve daha büyük boyutlu silisyum kristallerinde incelere göre daha fazla çatlak oluşmaktadır. Bunun nedeni, kuvvet etkisi altında matriste oluşan gerilmelerin kaba silisyum kristallerine daha yüksek oranda transfer edilmesi ve bu nedenle silisyum kristallerinin dayanım değerlerinin daha kolay aşılması olarak açıklanmaktadır (Xu vd., 2007). Silisyum kristallerinde oluşan ve birleşen çatlaklar alüminyum fazı ile bu kristaller arasındaki sınırlar boyunca ilerleyerek alaşımdaki kırılma mekanizmasını tamamlamaktadır (Chang vd., 1998; Xu vd., 2007).

Bor katkısının %0,01 olması durumunda kırılma yüzeyinde çukurcukların gözlenmesi borun yapıdaki dendiritleri küçültmesinden, bu orandan daha fazla olan bor katkılarında klivaj düzlemlerinin büyümesi ise ötektik silisyum parçacıklarının uzaması ve sıklaşmasından kaynaklanmış olabilir. Düşük oranlarda stronsiyum içeren Al-12Si alaşımına ait numunelerin kırılma yüzeylerinde ince ve hacimsel oranı nispeten daha fazla olan çukurcukların gözlenmesi stronsiyumun özellikle ötektik silisyum parçacıklarını inceltmesinden kaynaklanmış olabilir. Stronsiyum oranı arttıkça kırılma yüzeylerindeki çukurcukların azalması ise artan stronsiyum oranı ile ince ve kısmen küreselleşmiş ötektik fazın yapıdaki hacimsel oranının azalmasından kaynaklanmış olabilir. Al-12Si-0,1Sr-Mg alaşımlarında artan magnezyum oranı ile klivaj düzlemlerinin artması magnezyumun hem dendiritler içerisinde çözünerek hem de %0,6 oranından sonra dendiritler arası bölgede nispeten gevrek Mg_2Si fazını oluşturmasından kaynaklanmış olabilir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada indüksiyon ocağında ergitme ve dökümden sonra oda sıcaklığında soğutma yoluyla üretilen Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine bor, stronsiyum ve magnezyum elementlerinin etkisi sistematik bir şekilde incelenerek ortaya koyulmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda ark ergitme ve vakum altında ergitme gibi farklı üretim yöntemlerinin ve dökümden sonra farklı soğuma hızlarının bu alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir. Söz konusu katkı elementlerinin ve üretim yöntemlerinin Al-Si alaşımlarının işlenebilirlik, sürünme, tribolojik ve korozyon özelliklerine etkileri de incelenebilir. Başka katkı elementlerinin ve farklı ısıl işlemlerin Al-Si esaslı alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerine etkileri konusunda da yeterli düzeyde çalışma bulunmamaktadır. Bu konuda da çalışmalar yapılarak Al-Si alaşımları üzerine daha detaylı veriler ortaya konulabilir.

KAYNAKLAR

- ASM, 1990a.** ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams. ASM International, ISBN: 978-1-62708-070-5.
- ASM, 1990b.** ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International, ISBN: 978-0-87170-378-1.
- ASM, 1992.** ASM Handbook Volume 15: Casting (10th ed.). Ohio: ASM Publication.
- ASM, 2016.** ASM Handbook: Volume 4E: Heat Treating of Nonferrous Alloys. ASM International, ISBN: 978-1627081122.
- Aguilera-Luna, I., Castro-Román, M.J., Escobedo-Bocardo, J.C., García-Pastor, F.A. and Herrera-Trejo, M., 2014.** Effect of cooling rate and Mg content on the Al–Si eutectic for Al–Si–Cu–Mg alloys. *Materials Characterization*, 95, 211 – 218. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.06.009.
- Alemdağ Y. and Beder M., 2014.** Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5)Zn alloys. *Materials and Design*, 63, 159-167. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.006.
- Alipour, M., Azarbarmas, M., Heydari, F., Hoghoughi, M., Alidoost, M. and Emamy, M., 2012.** The effect of Al–8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al–12Zn–3Mg–2.5Cu aluminum alloy. *Materials and Design*, 38, 64–73. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.02.008
- Biol, Y., 2013.** Impact of grain size on mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy. *Materials Science and Engineering A*, 559, 394-400. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.115.
- Caceres, C.H., Davidson, C.J., Griffiths, J.R. and Wang, Q.G., 1999.** The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 2611-2618. DOI:10.1007/s11661-999-0301-8.
- Cai, Z., Wang, R., Zhang, C., Peng, C., Xie, L. and Wang, L., 2015.** Characterization of rapidly solidified Al-27Si hypereutectic alloy: Effect of solidification condition. *Journal of Materials Engineering and Performance*, DOI: 10.1007/s11665-015-1386-4.
- Chang, J.Y., Moon, I. and Choi, C.S., 1998.** Refinement of cast microstructure of hypereutectic Al-Si alloys through the addition of rare earth metals. *Journal of Materials Science*, 33, 5015–5023.
- Chen, Z., Wang, T., Zhao, Y., Zheng, Y. and Kang, H., 2015.** Effects of NaBF₄ + NaF on the tensile and impact properties of Al-Si-Mg-Fe alloys. *Metallurgical and*

Materials Transactions A:Physical Metallurgy and Materials Science, 46,2063-2072. DOI: 10.1007/s11661-015-2759-X.

Chen, Z., Wang, T., Gao, L., Fu, H. and Li, T., 2012. Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloys by inoculation with Al-B master alloy. *Materials Science and Engineering A*, 553, 32– 36. DOI: 10.1016/j.msea.2012.05.088.

Chen, Z., Kang, H., Fan, G., Li, J., Lu, Y., Jie, j., Zhang, Y., Li, T., Jian, X. and Wang, T., 2016. Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B. *Acta Materiala*, 120, 168-178. DOI:10.1016/j.actamat.2016.08.045.

Choi, S.W., Kim, Y.M., Lee, K.M., Cho, H.S., Hong, S.K., Kim, Y.C., Kang, C.S. and Kumai, S., 2014. The effects of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al-Si-Cu-Mg foundry alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 654-659. DOI:10.1016/j.jallcom.2014.08.033.

Darlapudi, A., McDonald, S.D., Terzi, S., Prasad, A., Felberbaum, M. And StJohn, D.H., 2016. The influence of ternary alloying elements on the Al-Si eutectic microstructure and the Si morphology. *Journal of Crystal Growth*, 433, 63–73. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.10.002.

Davis, J.R., 2001. *Alloying: Understanding the Basics*, ASM International, ISBN: 978-0-87170-744-4, 351-416.

Ding, X.P., Cui, H., Zhang, J.X., Li, H.X. , Guo, M.X., Lin, Z., Zhuang, L.Z. and Zhang, J.S., 2015. The effect of Zn on the age hardening response in an Al-Mg-Si alloy. *Materials and Design*, 65, 1229-1235. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.086.

Dong, J.X., Karnezis, P.A., Durrant, G. and Cantor, B., 1999. The effect of Sr and Fe additions on the microstructure and mechanical properties of a direct squeeze cast Al-7Si-0.3Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 1341-1356. DOI: 10.1007/s11661-999-0283-6.

Drar, H. and Svensson, I.L., 2006. Characterization of tensile properties and microstructures in directionally solidified Al-Si alloys using linear roughness index. *Materials Characterization*, 57, 244–258. DOI: 10.1016/j.matchar.2006.01.020.

Easton, M.A. and StJohn,D.H., 1999a. Grain refinement of aluminum alloys Part I. The nucleant and solute paradigmsda review of the literature, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30, 1613-1623.

Easton, M.A. and StJohn,D.H., 1999b. Grain refinement of aluminum alloys Part II. Confirmation of and a mechanism for the solute paradigm, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30, 1626-1633.

- Easton, M.A. and StJohn, D.H., 2001.** The effect of alloy content on the grain refinement of aluminium alloys, in: J.L. Anjier (Ed.), *Light Metals, Minerals, Metals and Materials Society*, 927-933.
- Effenberg, G. and Ilyenko, S., 2009.** Ternary alloy systems: Phase diagrams, Crystallographic and Thermodynamic, Berlin/Heidelberg, ISBN 978-3-540-88052-3. DOI: 10.1007/978-3-642-00771-2.
- Farahany, S., Idris, M.H. and Ourdjini, A., 2015.** Effect of bismuth and strontium interaction on the microstructure development, mechanical properties and fractography of a secondary Al–Si–Cu–Fe–Zn alloy. *Materials Science and Engineering A*, 621, 28–38. DOI: 10.1016/j.msea.2014.10.053.
- Garay-Tapia, A.M., Romero, A.H., Trapaga, G. and Arróyave, R., 2012.** First-principles investigation of the Al–Si–Sr ternary system: Ground state determination and mechanical properties. *Intermetallics*, 21, 31-44. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.09.001.
- Gholizadeh, R. and Shabestari, S.G., 2011.** Investigation of the effects of Ni, Fe, and Mn on the formation of complex intermetallic compounds in Al–Si–Cu–Mg–Ni alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42, 3447-3458. DOI: 10.1007/s11661-011-0764-2.
- Guzowski, M., Sigworth, G.K. and Sentner, D.A., 1987.** The role of boron in the grain refinement of aluminum with titanium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 18A, 603-619.
- Hafiz, M.F. and Kobayashi, T., 1994.** Mechanical properties of modified and non modified eutectic Al–Si alloys. *Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals*, 44, 28-34. DOI: 10.2464/jilm.44.28.
- Huter, P., Renhart, P., Oberfrank, S., Schwab, M., Grün, F. and Stauder, B., 2016.** High-and low-cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al–Si–Cu and Al–Si–Mg cast alloys used in cylinder heads. *International Journal of Fatigue*, 82, 588–601. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.09.015.
- Hwang, J.Y., Doty, H.W. and Kaufman, M.J., 2008.** The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Cu casting alloys. *Materials Science and Engineering A*, 488, 496-504. DOI:10.1016/j.msea.2007.12.026.
- Jeong, C.Y., 2013.** High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads. *Materials Transactions*, 54, 588-594. DOI:10.2320/matertrans.M2012285.
- Johnsson, M., 1994a.** Influence of Si and Fe on the grain-refinement of aluminum. *Zeitschrift für Metallkunde*, 85, 781-785.
- Johnsson, M., 1994b.** Influence of Zr on the grain-refinement of aluminum. *Zeitschrift für Metallkunde*, 85, 786-789.

- Johnsson, M., and Backerud, L., 1996.** The influence of composition on equiaxed crystal growth mechanisms and grain size in Al alloys. *Zeitschrift für Metallkunde*, 87, 216-220.
- Jones, G.P. and Pearson, J., 1976.** Factors affecting the grain-refinement of aluminum using titanium and boron additives. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 7, 223-234.
- Jung, J.G., Park, J.S., Ha, Y.S., Lee, Y. K., Jun, J.H., Kang, H.S. and Lim, J.D., 2009.** The optimal solution treatment condition in a Al-Si-Cu AC2B alloy. *Journal of Korean Institute of Metals and Materials*, 47, 223-227.
- Kaygısız, Y. ve Maraşlı, N., 2015.** Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al–Si–Mg eutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 618, 197–203. DOI:10.1016/j.jallcom.2014.08.056.
- 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, 94–104. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00794-7
- Li, P., Nikitin, V.I., Kandalova, E.G. and Nikitin, K.V., 2002.** Effect of melt overheating, cooling and solidification rates on Al–16wt.%Si alloy structure. *Materials Science and Engineering A*, 332, 371–374. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01864-0.
- Li, X.P., Wang, X.J., Saunders, M., Suvorova, A., Zhang, L.C., Liu, Y.J., Fang, M.H., Huang, Z.H. and Sercombe, T.B., 2015.** A selective laser melting and solution heat treatment refined Al-12Si alloy with a controllable ultrafine eutectic microstructure and 25% tensile ductility. *Acta Materialia*, 95, 74-82. DOI:10.1016/j.actamat.2015.05.017.
- Li, Y.J., Brusethaug, S. and Olsen, A., 2006.** Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior of AlSi7Mg0.5 alloy during aging treatment. *Scripta Materialia*, 54, 99-103. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.044.
- Li, Z., Li, C., Liu, Y., Yu, L., Guo, Q. and Li, H., 2016.** Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Al-10%Mg2Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 16-19. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.12.128.
- Liao, H., Sun, Y. and Sun, G., 2002.** Correlation between mechanical properties and amount of dendritic Al phase in as-cast near-eutectic Al–11.6% Si alloys modified with strontium. *Materials Science and Engineering A*, 335, 62–66.
- Liu, Y., Ding, C. and Li, Y.X., 2011.** Grain refining mechanism of Al-3B master alloy on hypoeutectic Al-Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 1435-1440. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60878-9.
- Liang, Z.X., Ye, B., Zhang, L., Wang, Q.G., Yang, W.Y. and Wang, Q.D., 2013.** A new high-strength and corrosion-resistant Al-Si based casting alloy. *Materials Letters*, 97, 104-107. DOI: 10.1016/j.matlet.2013.01.112.

- Liao, H., Sun, Y. and Sun, G., 2002.** Correlation between mechanical properties and amount of dendritic-Al phase in as-cast near-eutectic Al–11.6% Si alloys modified with strontium. *Materials Science and Engineering A*, 335, 62–66. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01949-9.
- Maxwell, I. and Hellawell, A., 1975.** Simple model for grain refinement during solidification, *Acta Metallurgica*, 23, 229-237.
- Medraj, M., Parvez, M.A., Essadiqi, E. and Li, J., 2007.** New phases in the Mg-Al-Sr system. *Materials Science Forum*, 539-543 (2007), 1620-1625. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.1620.
- Meng, Y., Cui, J., Zhao, Z. and Zuo, Y., 2013.** Effect of vanadium on the microstructures and mechanical properties of an Al–Mg–Si–Cu–Cr–Ti alloy of 6XXX series. *Journal of Alloys and Compounds*, 573, 102–111. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.03.239.
- Mohamed, A.M.A., Samuel, F.H. and Kahtani, S.A., 2013.** Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al-Si-Mg-Cu cast alloys. *Materials Science and Engineering A*, 577, 64-72. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.084.
- Nakayama, Y., Ninomiya, K. and Ohnishi, N.C., 1998.** Effect of solution treatment condition on the mechanical properties of Al-2%Si-0.6%Mg casting alloy. *Keikinzoku/Journal of Japan Institute of Light Metals*, 48, 346-351. DOI: 10.2464/jilm.48.346.
- Nogita, K., McDonald, S.D. and Dahle, A.K., 2013.** Effects of boron-strontium interactions on eutectic modification in Al-10 mass % Si alloys. *Materials Transactions*, 44, 692-695. DOI: 10.2320/matertrans.44.692.
- Nogita, K. and Dahle, A.K., 2001a.** Eutectic growth mode in strontium antimony and phosphorus modified Al–Si foundry alloys. *Materials Transactions*, 42, 393–396. DOI: 10.2320/matertrans.42.393.
- Nogita, K. and Dahle, A.K., 2001b.** Determination of eutectic solidification mode in Sr-modified hypoeutectic Al–Si alloys by EBSD. *Materials Transactions*, 42, 207–214. DOI: 10.2320/matertrans.42.207.
- Nogita, K. and Dahle, A.K., 2001c.** Eutectic solidification in hypoeutectic Al–Si alloys: electron backscatter diffraction analysis. *Materials Characterization*, 46, 305–310. DOI:10.1016/S1044-5803(00)00109-1.
- Oh, J.M., Lim, J.W., Lee, B.G., Suh, C.Y., Cho, S.W., Lee, S.W. and Choi, G.S., 2010.** Grain refinement and hardness increase of titanium via trace element addition. *Materials Transactions*, 51,11, 2009-2012. DOI:10.2320/matertrans.M2010175.

- Okamoto, H. and Massalski, T., 1993.** Guidelines for binary phase diagram assessment. *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 14 No. 3, 316-335. DOI: 10.1007/BF02668229.
- Peijie, L., Jingjie, G., Jun, J., Qingchun, L. and Khosen, R., 1996.** Physical properties and solidification structure of Al-Si eutectic alloy melt with cerium modification. *Journal of Rare Earths*, 14, 143-144.
- Predel, B., 2012.** Phase equilibria, crystallographic and thermodynamic data of binary alloys. Springer, ISBN 978-3-540-44753-5.
- Salleh, M.S., Omar, M.Z. and Syarif, J., 2015.** The effects of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of thixoformed Al-5%Si-Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 621, 121-130. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.152.
- Savaşkan, T. and Hekimoğlu, A.P., 2014.** Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys. *Materials Science and Engineering A*, 603, 52-57. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.047.
- Savaşkan, T., Hekimoğlu, A.P. and Pürçek, G., 2004.** Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys. *Tribology International*, 37, 1, 45-50. DOI:10.1016/S0301-679X(03)00113-0.
- Shabestari, S.G. and Moemeni, H., 2004.** Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 193-198. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.302.
- Shaha, S.K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. and Chen, D.L., 2015a.** Monotonic and cyclic deformation behavior of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy with micro-additions of Ti, V and Zr. *International Journal of Fatigue*, 70, 383-394. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.001.
- Shaha, S.K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. and Chen, D.L., 2015b.** Effect of solidification rate and loading mode on deformation behavior of cast Al-Si-Cu-Mg alloy with additions of transition metals. *Materials Science and Engineering A*, 636, 361-372. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.077.
- Shaha, S.K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. And Chen, D.L., 2015c.** Microstructure and mechanical properties of Al-Si cast alloy with additions of Zr-V-Ti. *Materials and Design*, 83, 801-812. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.057.
- Shi, W., Gao, B., Tu, G., Li, S., Hao, Y. and Yu, F., 2010.** Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15%Si alloy. *Journal Of Rare Earths*, 28, Dec. 2010, 367-370. DOI: 10.1016/S1002-0721(10)60363-8.

- Shin, J.S., Kim, B.H. and Lee, S.M., 2011.** Effects of physical melt treatments on microstructural evolution and anodizing characteristics of Al-Si casting alloys. *Materials Science Forum*, 695, 243-246. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.695.243.
- Spittle, J.A and Sadli, S., 1995.** Effect of alloy variables on grain refinement of binary aluminum-alloys with Al-Ti-B. *Materials Science and Technology*, 11, 533-537. DOI: 10.1179/026708395790165273.
- Sui, Y., Wang, Q., Liu, T., Ye, B., Jiang, H. and Ding, W., 2015a.** Influence of Gd content on microstructure and mechanical properties of cast Al-12Si-4Cu-2Ni-0.8Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 644, 228-235. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.04.164.
- Sui, Y., Wang, Q., Ye, B., Zhang, L., Jiang, H. and Ding, W., 2015b.** Effect of solidification sequence on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-11Si-2Cu-Fe alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 679-686. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.187.
- Tavitas-Medrano, F.J., Mohamed, A.M.A., Gruzleski, J.E., Samuel, F.H. and Doty, H.W., 2010.** Precipitation-hardening in cast Al-Si-Cu-Mg alloys. *Journal of Materials Science*, 45, 641-651. DOI: 10.1007/s10853-009-3978-6.
- Tebib, M., Samuel, A.M., Ajersch, F. and Chen, X.G., 2014.** Effect of P and Sr additions on the microstructure of hypereutectic Al-15Si-14Mg-4Cu alloy. *Materials Characterization*, 89, 112-123. DOI:10.1016/j.matchar.2014.01.005.
- Timelli, G., Camicia, G. and Ferraro, S., 2014.** Effect of grain refinement and cooling rate on the microstructure and mechanical properties of secondary Al-Si-Cu alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(2), 611-621.
- Timpel, M., Wanderka, N., Schlesiger, R., Yamamoto, T., Lazarev, N., Isheim, D., Schmitz, G., Matsumura, S. and Banhart, J., 2012.** The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys. *Acta Materialia*, 60, 3920-3928. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.03.031.
- TS EN 1706, 2010.** Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları-Dökümler-Kimyasal Bileşim ve Mekanik Özellikler. TSE., Ankara, 7. Baskı, 3-25s.
- Vijeesh, V. and Prabhu, K.N., 2014.** Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67, 1-18. DOI:10.1007/s12666-013-0327-X.
- Wang, Q.G. and Davidson, C.J., 2001.** Solidification and precipitation behaviour of Al-Si-Mg casting alloys. *Journal of Materials Science*, 36, 739-750. DOI: 10.1023/A:1004801327556.
- Wang, K., Jiang, H.Y., Wang, Q.D. and Ding, W.J., 2016.** Influence of nanoparticles on microstructural evolution and mechanical properties of Sr-modified Al-10Si

- alloys. *Materials Science and Engineering A* 666, 264–268. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.072.
- Wu, Y., Zhang, J., Liao, H., Li, G. and Wu, Y., 2016.** Development of high performance near eutectic Al-Si-Mg alloy profile by micro alloying with Ti. *Journal of Alloys and Compounds*, 660, 141-147. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.11.083.
- Wu, Zhaoxuan and Curtin, W.A., 2015.** The origins of high hardening and low ductility in magnesium, *Nature*, 526, 62-75, DOI:10.1038/nature15364.
- Xu, C.L., Wang, H.Y., Qiu, F., Yang, Y.F. and Jiang, Q.C., 2006.** Cooling rate and microstructure of rapidly solidified Al–20wt.%Si alloy. *Materials Science and Engineering A*, 417, 275–280. DOI: 10.1016/j.msea.2005.10.040.
- Xu, C., Wang, F., Mudassar, H., Wang, C., Hanada, S., Xiao, W. and Ma, C., 2017.** Effect of Sc and Sr on the eutectic Si morphology and tensile properties of Al-Si-Mg alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(4), 1605-1613. DOI: 10.1007/s11665-017-2599-5.
- Yamagata H., Kasprzak W., Aniolek M., Kurita H. and Sokolowski, J.H., 2008a.** The effect of average cooling rates on the microstructure of the Al-20%Si high-pressure die-casting alloy used for monolithic cylinder blocks. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 203, 333-341. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.023.
- Yamagata H., Kurita H., Aniolek M., Kasprzak W. and Sokolowski, J.H., 2008b.** Thermal and metallographic characteristics of the Al-20%Si high-pressure die-casting alloy for monolithic cylinder blocks. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 84-90. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.007.
- Yan, G., Mao, F., Jie, J., Cao, Z., Li, T. and Wang, T., 2016.** Effect of Sr addition on the characteristics of as-cast and rolled 3003/4004 clad aluminum. *Journal of Alloys and Compounds*, 678, 201–211. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.03.259.
- Ye, H., 2003.** An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12, 288-297. DOI: 10.1361/105994903770343132.
- Yue, T.M., Ha, H.U. and Musson, N.J., 1995.** Grain size effects on the mechanical properties of some squeeze cast light alloys. *Journal of Materials Science*, 30, 2277-2283. DOI: 10.1007/BF01184573.
- Zhao, A.M., Mao, W.M., Zhen, Z.S., Jiang, C.M. and Zhong, X.Y., 2001.** Effects of cooling rate on solidification microstructures and wear resistance of hypereutectic Al-Si alloy. *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 11, 827-833.

Zhou, J. and Duszcyk, J., 1990. Fracture features of a silicon-dispersed aluminium alloy extruded from rapidly solidified powder. *Journal of Materials Science*, 25, 4541–4548.



ÖZGEÇMİŞ

Gizem AYATA 1990 yılında Osmaniye’de doğdu. 2007 yılında Tekirdağ/Saray ilçesinde Ali Naki Erenyol Lisesi’ni bitirdi. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine ve Metal Teknolojileri Bölümünden mezun oldu. Ardından 2015 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2015 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başlayan Gizem AYATA 2017’nin Ekim ayından itibaren Vastaş Valf Armatür Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketinde Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.

Bilimsel Çalışmaları ve Yayınları

1. Konferans bildirisi: Hekimoğlu A.P., Ayata G., "Effect of Boron Contents on the Structural and Mechanical Properties of Al-12Si Alloy", The 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, 19-21 Ekim 2017, pp.2175-2181.
2. Konferans bildirisi: Hekimoğlu A.P., Çalış, M., Ayata G., "Stronsiyum ve Stronsiyum Magnezyum Katkılarının Al-9Si Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", 1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Antalya, Türkiye, 11-13 Nisan 2018, pp.422-426.
3. BAP Projesi: Bor, Stronsiyum ve/veya Magnezyum Katkılarının AlSi Alaşımlarının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Recep Tayyip Erdoğan Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi, Yürütücü: Yrd. Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU, Araştırmacı: Gizem AYATA, Başlama tarihi: 23.11.2016-Devam ediyor.