

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON DÖKÜM ÖTEKTİK Al-Si
ALAŞIMLARINDA MODİFİYE EDİCİ ALAŞIM
ELEMENTLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Alpaslan KILIÇARSLAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON DÖKÜM ÖTEKTİK Al-Si
ALAŞIMLARINDA MODİFİYE EDİCİ ALAŞIM
ELEMENTLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Alpaslan KILIÇARSLAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hatem AKBULUT

ŞUBAT 2024

Alpaslan KILIÇARSLAN tarafından hazırlanan “Yüksek Basınçlı Enjeksiyon Döküm Ötektik Al-Si Alaşımlarında Modifiye Edici Alaşım Elementlerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 20.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hatem AKBULUT** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ahmet ÖZEL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ramazan YILMAZ**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON DÖKÜM ÖTEKTİK Al-Si ALAŞIMLARINDA MODİFİYE EDİCİ ALAŞIM ELEMENTLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı (etik onayı gerekmiyorsa bu cümle metinden çıkartılır), çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(20/02/2024)

(imza)

Alpaslan KILIÇARSLAN





Sevgili aileme



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın planlamasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda bütün tecrübesini ve bilgisini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren tez danışmanım Sayın Prof.Dr.Hatem AKBULUT'a teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Deneylerimin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, herdaim yanımda hissettiğim Öğr.Gör.İbrahim Fatih KEKİK'e teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmamda bana desteğini esirgemeyen, tecrübelerini eğitimler aldırarak destekleyen Ayhan Metal Pres Döküm A.Ş. ailesine ve Genel Müdürüm Aynur AYHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın düzenlenmesinde bana desteği ve yardımlarını esirgemeyen lisans eğitimimde bana çok büyük katkıları olan Prof.Dr.Ramazan YILMAZ'a teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Sevgili KILIÇARSLAN ve KÖKSALAN aileme desteklerini ve yardımlarını esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında sevgisini, desteğini ve güvenini yanımda hissettiğim varlığımın sebepleri eşim Kübra Köksalan KILIÇARSLAN'a ve biricik oğlum Ediz Alp KILIÇARSLAN'a teşekkürlerin en büyüğünü borç bilirim.

Alpaslan KILIÇARSLAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SİMGELER	xvii
TABLolar LİSTESİ.....	xix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Literatür Araştırması	1
2. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ	9
2.1. Saf Alüminyum	9
2.2. Elektrik ve Isı İletimi.....	10
2.3. Alüminyumun Doğada Bulunuşu.....	11
2.4. Alüminyumun Tarihçesi.....	12
2.5. Alüminyumun Elde Edilişi.....	13
2.5.1. Birincil alüminyum üretimi.....	15
2.5.2. İkincil alüminyum üretimi	15
2.6. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	17
2.6.1. Dövme alüminyum alışıımı.....	17
2.6.2. Dökme alüminyum alışıımı.....	19
2.7. Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	20
2.7.1. İnşaat sektörü ve mimari	22
2.7.2. Ambalaj ve gıda sektörü.....	22
2.7.3. Tüketici elektroniği	23
2.7.4. Elektrik sektörü	24
2.7.5. Ulaşım	24
2.7.6. Otomotiv endüstrisi.....	24
2.7.7. Havacılık endüstrisi.....	25
2.8. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi	26
2.8.1. Bakır elementinin alüminyuma etkisi	27
2.8.2. Silisyum elementinin alüminyuma etkisi	28
2.8.3. Magnezyum elementlerinin alüminyuma etkisi	29
2.8.4. Mangan elementinin alüminyuma etkisi	30
2.8.5. Çinko elementinin alüminyuma etkisi	32

2.8.6. Titanyum elementinin alüminyuma etkisi.....	33
2.8.7. Demir elementinin alüminyuma etkisi	34
2.8.8. Ni elementinin alüminyuma etkisi	35
2.8.9. Kalay elementinin alüminyuma etkisi.....	37
2.8.10. Kurşun elementinin alüminyuma etkisi.....	38
2.8.11. Krom elementinin alüminyuma etkisi	40
2.8.12. Bor elementlerinin alüminyuma etkisi	41
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME	43
3.1. Tane İnceltici Miktarları.....	44
3.2. Tane İnceltme Prosesi.....	45
3.3. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme Yöntemleri	46
3.3.1. Termal yöntem	47
3.3.2. Kimyasal yöntem.....	47
3.3.3. Mekanik yöntem.....	47
3.3.4. Mikroyapılar.....	48
3.4. Tane İnceltme Prensipleri.....	51
3.4.1. Tane inceltme eğrileri.....	51
3.4.2. Tane İnceltme İşleminin Soğuma Eğrisine Etkisi	52
3.5. Tane Boyutu Ölçüm Teknikleri.....	52
3.5.1. Alan ölçümsel (planimetrik) yöntem.....	52
3.5.2. Kesişim yöntemi.....	53
3.5.3. Hall-Petch bağıntısı	54
3.6. Çekirdeklenme.....	55
3.6.1. Homojen çekirdeklenme	56
3.6.2. Heterojen çekirdeklenme.....	56
3.6.3. Çekirdeklenme teorileri.....	57
3.6.3.1. Karbür-borür teorisi	58
3.6.3.2. Faz diyagramı-peritektik teorisi	58
3.6.3.3. Peritektik hulk teorisi	59
3.6.3.4. Hiper çekirdeklenme teorisi	60
3.6.3.5. Çift çekirdeklenme teorisi	62
3.6.3.6. Çözünen teorisi.....	62
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
4.1. Yöntem	63
4.1.1. Araştırmada kullanılan cihazlar	64
4.1.1.1. Makro kesme cihazı	64
4.1.1.2. Bakalite alma cihazı	65
4.1.1.3. Zımparalama ve parlatma cihazı	65
4.1.1.4. Mikroyapı analizinde kullanılan optik mikroskop	66
4.1.1.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	66
4.1.1.6. Spektral analiz cihazı	67
4.1.1.7. Sertlik test cihazı	67
4.1.1.8. Mikrosertlik test cihazı	68
4.1.2. Tahribatsız muayene yöntemleri	69
4.1.2.1. RT-D görüntülemeye kullanılan x ışını radyografi cihazı	69
4.1.3. Tahribatlı muayene yöntemleri	69
4.1.3.1. Çekme testi.....	69
4.1.3.2. Dayanım testi	70
4.1.4. Araştırmada kullanılan alaşım ve malzemeler	70
4.1.4.1. Kullanılan alaşım malzemeleri.....	70

4.1.4.2. Kullanılan modifiye edici malzemeler	71
4.1.5. Araştırmada hazırlanan numuneler	72
4.1.5.1. Döküm numunelerinin hazırlanması	72
4.1.5.2. Spektral analiz numunesi	74
4.1.5.3. X-Ray numunesinin hazırlanması	77
4.1.5.4. Çekme çubuğu numunesinin hazırlanması	77
4.1.6. Araştırmada kullanılan deneysel analizler	78
4.1.6.1. Sertlik testi	78
4.1.6.2. Mikrosertlik testi	78
4.1.6.3. Çekme testi.....	79
4.1.6.4. Basma testi	79
4.1.6.5. Mikroyapı incelemeleri	81
4.1.6.6. SEM analizleri	82
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	83
5.1. Sertlik ölçümleri	83
5.2. Mikrosertlik ölçümleri.....	85
5.3. Çekme testi	87
5.4. Basma testi	90
5.5. Mikroyapı analizleri	91
5.6. SEM&EDS analizi	99
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	119
6.1. Sonuçlar.....	119
6.2. Öneriler.....	120
KAYNAKLAR	121
ÖZGEÇMİŞ.....	129



KISALTMALAR

AA	: Amerikan Alüminyum Birliği
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
EHT	: Yüksek Enerji Kaynağı
ASTM	: Amerikan Malzeme Test ve Standartları
GGG50	: Sfero Döküm
HB	: Brinell Sertlik
HRC	: Rockwell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
TALSAD	: Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği
WD	: Genişlik
XRD	: X ışını difraksiyon spektroskopisi
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik



SİMGELER

A	: Genleşme Katsayısı
°C	: Santigrat derece
°K	: Kelvin derece
Ağ.(%)	: Yüzde ağırlık
D	: Tane Boyutu
A_{KD}	: Katı-duvar ara yüzey alanı
A_{KS}	: Katı-sıvı ara yüzey alanı
Kg	: kilogram
kN	: Kilo Newton
L_f	: Katılaşma Gizli Isısı
LM28	: Alüminyum Alaşımı
MAG	: Büyütme
Mm	: Milimetre
µm	: Mikro metre
MPa	: Mega Paskal
N	: Newton
Nm	: Nano metre
pA	: Piko amper
ppm	: Milyonda bir parçacık
psi	: Basınç birimi
r*	: Kritik çekirdek yarıçapı
s	: Saniye
T_f	: Katılaşma Denge Sıcaklığı
T_m	: Ergime sıcaklığı
V-Charpy	: Çentik darbe
v	: Katılaşma Hızı
V_s	: Katının Özgül Hacmi
γ_{DK}	: Duvar-katı ara yüzey serbest enerjisi
γ_{KS}	: Katı-sıvı ara yüzey serbest enerjisi
V_L	: Sıvının Özgül Hacmi

γ_{DS}	: Duvar-sıvı ara yüzey serbest enerjisi
ΔG	: Serbest Enerji Değişimi
ΔGV	: Hacim Serbest Enerji Değişimi
ΔT	: Sıcaklık Farkı
P	: Yoğunluk (g/cm ³)
σ_c	: Çekme Mukavemeti (MPa)
σ_a	: Akma Mukavemeti (MPa)



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.	10
Tablo 2.2. Dövmeye alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	18
Tablo 2.3. Farklı Cu ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi gösterilmektedir.....	27
Tablo 3.1. Tane inceltme mekanizmasına ilişkin farklı teorilerin argümanları.	49
Tablo 3.2. Farklı tane incelticileri.	50
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan katkısız AlSi12(Fe) alaşımının yüzde kimyasal kompozisyonu.....	71
Tablo 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan AlTi5B1 master alaşımının ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu.....	71
Tablo 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan AlSr10 master alaşımının ağırlıkça yüzde kimyasal kompozisyonu.....	72
Tablo 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça %0.08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.	75
Tablo 4.5. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.	75
Tablo 4.6. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.	76
Tablo 4.7. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 450 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.	76
Tablo 4.8. Keller çözeltisinin kompozisyonu.....	82
Tablo 5.1. Brinell sertlik değerleri ortalaması.....	83
Tablo 5.2. Vickers mikrosertlik değerleri ortalaması.....	85
Tablo 5.3. Çekme dayanımı değerleri.	87
Tablo 5.4. Akma Dayanımı değerleri.	88
Tablo 5.5. Yüzde (%) uzama değerleri.....	89
Tablo 5.6. Basma testi sonucunda % Deformasyon Uzaması değerleri ortalaması. .	90
Tablo 5.7. Silis morfolojisine göre ötektik modifikasyon sınıflandırması.....	96
Tablo 5.8. Noktasal analiz.	105
Tablo 5.9. Bölgesel analiz.	105
Tablo 5.10. Noktasal analiz sonuçları.	106
Tablo 5.11. Katkısız AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş 1)Noktasal analiz, 2)Bölgesel analiz, 3)Noktasal analiz sonuçları.....	106
Tablo 5.12. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	108
Tablo 5.13. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.....	108
Tablo 5.14. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analizi.....	108
Tablo 5.15. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	109

Tablo 5.16.	%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	109
Tablo 5.17.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.....	111
Tablo 5.18.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	111
Tablo 5.19.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	112
Tablo 5.20.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.	112
Tablo 5.21.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	114
Tablo 5.22.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	114
Tablo 5.23.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.....	114
Tablo 5.24.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.	114
Tablo 5.25.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.	115
Tablo 5.26.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.	117
Tablo 5.27.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.	117
Tablo 5.28.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.	117
Tablo 5.29.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analizi.	118

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyumun hammaddesi olan boksit cevheri.	12
Şekil 2.2. Alüminyum üretimi aşamaları.	13
Şekil 2.3. Alüminyum üretimi ve kullanımı.	14
Şekil 2.4. Dünya alüminyum talebi (milyon ton).	14
Şekil 2.5. Alüminyum üretiminde Bayer süreci.	15
Şekil 2.6. Alüminyum yarı mamul ve mamul üretimi.	16
Şekil 2.7. İkincil alüminyum üretimi.	17
Şekil 2.8. Alüminyum serileri ve ana alaşım elementleri	19
Şekil 2.9. Dünya alüminyum talebi.	21
Şekil 2.10. Türkiye işlenmemiş alüminyum tüketimi (ton).	21
Şekil 2.11. Sektörlere göre alüminyum talebi.	22
Şekil 2.12. Muhtelif alüminyum ambalaj çeşitleri.	23
Şekil 2.13. Ülkelere göre ihracatımız.	24
Şekil 2.14. Otomobil segmentlerine göre ortalama alüminyum kullanımı (kg).	25
Şekil 2.15. Alüminyum kullanım alanları.	26
Şekil 2.16. Elementlerin alüminyum üzerine etkisi.	26
Şekil 2.17. Al-12wt%Si alaşımı için SEM görüntüsü.	28
Şekil 2.18. Alüminyum alaşımı için gerilme şekil değiştirme diyagramı.	29
Şekil 2.19. Dendrit kolları.	30
Şekil 2.20. Alaşımı A (0Mn) ve Alaşımı B'nin (0.8Mn) mekanik özellikleri.	31
Şekil 2.21. Zn takviyesinin değişen ağırlık yüzdesinde numunelerin optik mikrografları.	32
Şekil 2.22. Ti eklenen Al-Mg-Zn-Si basınçlı döküm alaşımının XRD spektrumları.	33
Şekil 2.23. Cüruftaki tipik Fe açısından zengin fazın element haritalaması.	35
Şekil 2.24. Tipik morfolojiye sahip Fe açısından zengin fazın SEM görüntüsü ve dağılımı.	35
Şekil 2.25. 0.2Ni'nin SEM mikrografları.	36
Şekil 2.26. 0,5Ni ilaveli numunenin SEM mikrografları.	36
Şekil 2.27. 0,9Ni ilaveli numunenin SEM mikrografları.	37
Şekil 2.28. Sn katkılı AlSi10 alaşımının mikroyapısı-mag.50x.	38
Şekil 2.29. Sn katkılı AlSi10 alaşımının mikroyapısı —mag. 500x.	38
Şekil 2.30. Kontrol alaşımının mikrografi görüntüsü.	39
Şekil 2.31. Ağırlıkça (0.15wt.% Zr), (0.025wt.%Ti) ve (Cr) farklı ekleme seviyeleri optik mikrografları.	41
Şekil 2.32. B içeriğinin Al-5Ti-1B'nin tane inceltme verimliliği üzerindeki etkisini gösteren CP-Al külçelerinin makrografları ve mikrografları.	42
Şekil 3.1. Tane inceltme eğrileri.	52
Şekil 3.2. Hall-Petch bağıntısı.	55
Şekil 3.3. Çekirdeklenme teorileri.	58
Şekil 3.4. Peritektik teorisi.	59
Şekil 3.5. Peritektik Hulk teorisi.	60

Şekil 3.6. Hiper çekirdeklenme teorisi.....	61
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada uygulanan yöntem ve alaşımların şematik gösterimi.	63
Şekil 4.2. Deneysel çalışmalarda uygulanacak testlerin şematik gösterimi.....	64
Şekil 4.3. Strues labotom-3 marka makro kesme cihazı.	64
Şekil 4.4. Multimount Easy marka cihaz.	65
Şekil 4.5. TRD Grinder-Polisher marka cihaz.	65
Şekil 4.6. Nikon Eplipse L150 marka optik mikroskop.....	66
Şekil 4.7. Jeol JSM 6060LV marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.	66
Şekil 4.8. GNR marka S1 MiniLAB 150 model spektrometre cihazı.....	67
Şekil 4.9. Bulut makina marka BMS 200-RB model cihaz.	68
Şekil 4.10. Shimadzu Hmv marka cihaz.	68
Şekil 4.11. Yxlon Mu 2000 (160 kW) marka radyoskopi cihazı.	69
Şekil 4.12. Zwick/Roell Z050 marka model cihaz.....	69
Şekil 4.13. Marestek marka cihaz.	70
Şekil 4.14. Devirmeli ergitme fırını ile gerçekleştirilen ergitme prosesi.	72
Şekil 4.15. Rotary Degassing ile gerçekleştirilen gaz giderme prosesi.	73
Şekil 4.16. Spektral analiz numuneleri.	74
Şekil 4.17. Yolluklu numune parçası.	77
Şekil 4.18. NDT yöntemlerinden X-Ray muayenesi için hazırlanan numune görselleri.	77
Şekil 4.19. Silindirik çekme test çubuğunun ölçüleri ve çekme testi numune görselleri.	78
Şekil 4.20. Basma testi uygulama şekil görseli arasındaki mesafesi.	80
Şekil 4.21. Yüzde (%) deformasyon uzaması eğriler arasındaki mesafesi.	81
Şekil 5.1. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen ortalama sertlik değerleri.	84
Şekil 5.2. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen ortalama mikrosertlik değerleri.....	86
Şekil 5.3. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen çekme dayanımı (σ_c) değerleri.....	87
Şekil 5.4. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen Akma Dayanımı(σ_c) değerleri.....	89
Şekil 5.5. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen yüzde uzama değerleri.	90
Şekil 5.6. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak 130 kN yük altında elde edilen ortalama yüzde deformasyon uzaması değerleri.	91
Şekil 5.7. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X10 büyütmede mikroyapı görüntüleri.	92
Şekil 5.8. Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.	94
Şekil 5.9. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.	94
Şekil 5.10. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.	95
Şekil 5.11. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı götüntüleri.	95
Şekil 5.12. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.	96
Şekil 5.13. Amerikan Dökümcüler Birliği'nin modifikasyon seviyeleri.	97
Şekil 5.14. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X50 büyütmede mikroyapı görüntüleri.	98
Şekil 5.15. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X1000 büyütmede SEM görüntüleri.	99
Şekil 5.16. Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin SEM görüntüsü.	101

Şekil 5.17.	%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.....	101
Şekil 5.18.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.....	102
Şekil 5.19.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.....	102
Şekil 5.20.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.....	103
Şekil 5.21.	Katkısız AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.....	104
Şekil 5.22.	%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	107
Şekil 5.23.	150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	110
Şekil 5.24.	300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	113
Şekil 5.25.	450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	116



YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON DÖKÜM ÖTEKTİK Al-Si ALAŞIMLARINDA MODİFİYE EDİCİ ALAŞIM ELEMENTLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Alüminyum-silisyum alaşımları düşük yoğunluk, iyi dökülebilirlik, yüksek mukavemet, sertlik ve iyi işlenebilirlik gibi özelliklere sahip olduğundan özellikle otomotiv sanayinde kabul görmekte, taşıtlarda ağırlığın azaltılması, yakıt ekonomisi ve daha düşük çevre emisyon değerleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tür alaşımların uygulamalarda başarı bir şekilde kullanılabilmesi için daha iyi mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu alaşımlara titanyum ilavesi ile hızlı bir şekilde ve önemli oranlarda tane inceltmesi sağlanarak, alaşımın sertlik, mukavemet değerleri ve dökülebilirliği artırılabilir. Bu çalışma ile ötektik Al-Si alaşımlarında mukavemeti artırma ve kalıcı deformasyonu azaltma amaçlı alaşım elementleri ilave ederek birincil alüminyum dendritleri ve ötektik silisyum kristallerin modifikasyonunun alaşımın mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla titanyum ve Sr ilavesi ile alaşımın döküm kalitesini artırılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanarak alaşımların kullanım ömürlerinin arttırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada EN AC 44300 [AlSi12 (Fe)] serisi alüminyum alaşımına tane inceltme işlemi ve modifikasyon işlemleri için Al1Ti5B1 ve AlSr10 mastır alaşımı ilave edilerek, beş farklı kompozisyona sahip alüminyum alaşımları yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemi ile üretilmiştir. Alaşıma ilave edilen Ti ve Sr elementlerinin alaşımın mikroyapısı ile mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde optik mikroskobu, tarama elektron mikroskobu (SEM) ve SEM/EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Üretilen alaşımların mekanik özellikleri Brinell ve mikrosertlik ölçümleri, çekme deneyi ve basma deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda AlSi12 (Fe) alaşımına Ti ilavesi ile alaşımların tane boyutlarının küçüldüğü ve alaşımın sertlik değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. İçerisinde %0.08 titanyum + farklı oranlarda (0-450ppm) stronsiyum bulunan alaşımlarda Sr miktarının artışına bağlı olarak alaşımın sertlik değerlerinde doğrusal oranda artış elde edilmiştir. Mikroyapıda bulunan α -Al dendritleri ile ötektik silisyum fazları üzerinden alınan mikrosertlik değerlerinde alaşımın içerisinde Ti ve Sr ilavesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Aynı şekilde alaşımların içerisinde Ti ve Sr oranının artışına bağlı olarak AlSi12 (Fe) alaşımların akma ve çekme ve % uzama değerlerinde doğrusal oranda bir artış gözlenmiştir. Basma deneylerinde ise Ti ve Sr ilavesinin artışına bağlı olarak alaşımın % deformasyon uzaması değerlerinde azalma sağlanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde elde edilen mekanik testler sonucu elde edilen sonuçların mikroyapı ile uyumlu olduğu ve elde edilen sonuçları desteklediği gözlenmiştir. Alaşımların optik mikroskop görüntülerinde Ti ilavesinin α -Al dendritlerin küçültmesi sonucu tane boyutu küçülmekte ancak ötektik silisyuma herhangi bir etkisi görülmemiştir. Diğer taraftan Sr ilavesinin Si kristallerini küçülttüğü ve içerisinde 450 ppm Sr bulunan alaşımda

modifiye işleminin gerçekleştiği, mikroyapının kaba lamelli ve iğnemsî yapıdan fiberimsî/küreselleşmiş yapıya dönüştüğü görülmüştür. SEM görüntüleri optik mikroskop görüntülerini desteklemekte ve α -Al dendiritleri ve Si kristalleri küçülmektedir. Ayrıca, noktasal ve bölgesel SEM/EDS analizlerinden Al, Si ve Fe elementlerinden oluşan intermetalik fazların bulunduğu anlaşılmaktadır.

Amacı;

Tez çalışmasında ötektik alüminyum-silisyum alaşımında mukavemeti artırma ve kalıcı deformasyonu azaltmaya yönelik ilave alaşım elementleri ilave ederek primer alüminyum dendiritlerinin inceltilmesi ve ötektik Si kristalleri modifikasyonun mekanik özelliklere etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Alüminyum alaşımlarında Tane inceltici olarak kullanılan Titanyum ve modifikasyon için kullanılacak Sr elementlerinin etkisiyle beraber malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlayarak kullanım ömürlerini arttırmak hedeflenmiştir. EN AC 44300[AlSi12(Fe)] serisi Alüminyum alaşımlarında belirli yük altında istenilen mukavemeti karşılayabilmek için düşük sıcaklıklarda presleme yaparak (dislokasyon oluşturarak) mukavemette artış sağlanmaktadır. Yapılacak çalışmada soğuk şekillendirmeye maruz kalmadan özellikle Stronsiyum ve Titanyum metalleri kullanılarak enjeksiyon döküm yöntemi ile üretilecek alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri optimize edilecektir. Tespit edilecek alaşım elementlerinin değişik oranlarda tane inceltici ve modifiye edici olarak alüminyum alaşımlarına ilave edilmesiyle parametrik olarak çalışmalar yapıp yüksek mukavemetli ve düşük kalıcı deformasyonlu özgün alüminyum alaşımları geliştirilecektir.

Sonuçlar;

Bu çalışmada AlSi10(Fe) alaşımına tane inceltme ve modifikasyon amaçlı AlTi5B1 ve AlSr10 master alaşımları ilave edilerek %0,08 Ti + farklı miktarlarda Sr içeren beş farklı kompozisyona sahip alaşımlar yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle üretilmiştir. Titanyum ve stronsiyum ilavesinin AlSi10(Fe) alaşımının mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Üretilen alaşımlara sertlik ve mikrosertlik ölçümleri ile çekme ve basma deneyleri gerçekleştirilmiş, optik ve SEM mikroskobu incelemeleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Üretilen alaşımların sertlik incelemelerinde AlSi10(Fe) alaşımına AlTi5B1 master alaşımı kullanılarak ilave edilen %0,08 titanyumun alaşımın tane boyutunu küçültürerek sertlik değerlerini net bir şekilde artırdığı gözlenmiştir.

%0,08 Ti içeren AlSi10(Fe) alaşımına AlSr10 master alaşımı ilave edilerek ağırlıkça 150ppm, 300ppm ve 450 ppm stronsiyum içeren alaşımlar üretilmiş ve bu alaşımların sertlik değerleri alaşımın Sr miktarındaki artışa bağlı olarak doğrusal artış gözlenmiştir. Bu artış ağırlıkça 150ppm, 300ppm ve 450ppm Sr içeren alaşımların sertliği her bir miktar artış için ortalama olarak 2,5 Brinell sertlik değeri artırmıştır. İlavesiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın Brinell sertlik değerleri arasındaki fark sırasıyla %19 dur.

AlSi10(Fe) alaşımına titanyum ilavesi ile α -Al dendiritleri, stronsiyum ilavesi ile ötektik silisyum fazı modifiye edilmiştir. Stronsiyum oranının artışına bağlı olarak fazların mikrosertlik değerleri artmıştır. İlavesiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımındaki α -Al dendiritleri ve ötektik silisyum fazı mikrosertlik değerleri arasındaki fark sırasıyla %181 ve %127 dir.

Alaşıma % 0,08 titanyum ilavesi ve stronsiyum oranının artışına bağlı olarak çekme

deneyleri sonrasında akma ve çekme dayanım değerleri doğrusal artmış ve en yüksek akma ve çekme dayanım ile % uzama değerleri 450ppm Sr içeren alaşımlarında elde edilmiştir. İlavessiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın akma, çekme dayanım ve % uzama değerleri arasındaki fark sırasıyla %21, %31 ve %69 dur.

Basma testinde yüzde (%) deformasyon uzaması ilave edilen Ti ve Sr elementlerinin alaşımın tane yapısını küçülmesi ve ötektik silisyumun fibroz/küreselleşmiş yapıya dönüşmesi uygulanan Fm kuvvetini absorbe edilmektedir. Bu durum alaşımın mukavemetinin artışına sağlamaktadır. Böylece Ti ilavesi alaşımın kalıcı deformasyon uzaması düşürmektedir. Buna ilaveten alaşımdaki Sr miktarındaki artışa bağlı olarak kalıcı deformasyon uzaması orantılı olarak daha da düşmektedir. İlavessiz AlSi1(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın % kalıcı deformasyon uzaması değerleri arasındaki fark sırasıyla %26 dır.

Mikroyapıları incelemelerde optik mikroskop görüntülerinde alaşıma Ti ilavesinin α -Al dendiritlerini küçültmesi ile alaşımın tane boyutunu küçülttüğü gözlenmiştir. Ancak bu durumun ötektik silisyuma etki etmediği gözlenmiştir. Diğer taraftan alaşıma Sr ilavesinin silisyum kristallerini küçülttüğü gözlenmiştir. Alaşım içerisinde Sr miktarı ağırlıkça 450ppm ulaştığında mikroyapının kaba lamelli ve iğnemi yapıdan fibroz/küreselleşmiş yapıya dönüştüğü gözlenmiş ve böylece modifiyenin gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

SEM/EDS analizlerinde elde edilen sonuçlar optik mikroskop görüntülerinde elde edilen sonuçları desteklemektedir. Görüntülerde α -Al dendiritlerinin ve Si kristallerinin küçüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca, alaşımın SEM/EDS noktasal ve bölgesel analizlerinden Al, Si ve Fe elementlerinden oluşan intermetalik fazların bulunduğu görülmüştür.

Öneriler;

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlardan yola çıkarak benzer konularda çalışma yapacak araştırmacılara aşağıdaki öneriler sunulabilir:

Bu çalışmada kullanılan AlSi10(Fe) alaşımına titanyum + farklı oranlardaki stronsiyum ilavesinin alaşımının korozyon özelliklerine etkileri incelenebilir.

Geçirgen elektron mikroskobu gibi farklı mikroyapı karakterizasyon teknikleri kullanılarak tane inceltme ile elde edilen mikroyapı ve mekanik özellikleri detaylı incelenerek mekanizmaları daha net olarak açıklanabilir.

AlSi10 (Fe) alaşımına farklı oranlardaki stronsiyum ile fosfor ilavesinin içeren alaşımların bu çalışmada çalışılan mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri araştırılabilir.

Bu çalışmada alaşımın üretiminde yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin dışında aynı kompozisyon ile kum ve kokil kalıba döküm gibi alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımlarda basıncın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.



INVESTIGATION OF MODIFIER ELEMENTS EFFECT IN THE HIGH PRESSURE INJECTION CASTING FOR EUTECTIC Al-Si ALLOYS

SUMMARY

Aluminum-silicon alloys are especially accepted in the automotive industry because they have properties such as low density, good castability, high strength, hardness and good machinability, and are preferred in vehicles due to weight reduction, fuel economy and lower environmental emission values. In order for such alloys to be used successfully in applications, they must have better mechanical properties. By adding titanium to these alloys, the hardness, strength values and castability of the alloy can be increased by providing rapid and significant grain refinement. In this study, the effects of modification of primary aluminum dendrites and eutectic silicon crystals on the microstructure and mechanical properties of the alloy by adding alloying elements to increase strength and reduce permanent deformation in eutectic Al-Si alloys were investigated. For this purpose, it is aimed to increase the lifespan of the alloys by increasing the casting quality of the alloy and improving the mechanical properties by adding titanium and Sr.

In this study, Al1Ti5B1 and AlSr10 master alloys were added to EN AC 44300 [AlSi12 (Fe)] series aluminum alloy for grain refinement and modification processes, and aluminum alloys with five different compositions were produced by high pressure injection molding method. The effects of Ti and Sr elements added to the alloy on the microstructure and mechanical properties of the alloy were examined. Optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and SEM/EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) characterization techniques were used in microstructural investigations. The mechanical properties of the produced alloys were determined by Brinell and microhardness measurements, tensile tests and compression tests. In experimental studies, it was observed that by adding Ti to AlSi12 (Fe) alloy, the grain sizes of the alloys decreased and the hardness values of the alloy increased. In alloys containing 0.08% titanium + different amounts of strontium (0-450ppm), a linear increase in the hardness values of the alloy was achieved depending on the increase in the amount of Sr. The microhardness values obtained from the α -Al dendrites and eutectic silicon phases in the microstructure increase depending on the increase in the addition of Ti and Sr in the alloy. Likewise, a linear increase was observed in the yield, tensile and % elongation values of AlSi12 (Fe) alloys depending on the increase in the Ti and Sr ratio in the alloys. In compression tests, the % deformation elongation of the alloy increased depending on the increase in Ti and Sr addition in values reduction has been achieved. It was observed that the results obtained as a result of mechanical tests obtained in microstructure examinations were compatible with the microstructure and supported the results obtained. In the optical microscope images of the alloys, the addition of Ti reduces the grain size as a result of the reduction of α -Al dendrites, but no effect on eutectic silicon is observed. On the other hand, it has been observed that the addition of Sr shrinks the Si crystals and the modification process takes place in the alloy containing 450 ppm Sr, and the microstructure changes from a coarse lamellar

and needle-like structure to a fibre-like/spherical structure. SEM images support the optical microscope images and the α -Al dendrites and Si crystals become smaller. In addition, it is understood from point and regional SEM/EDS analyzes that there are intermetallic phases consisting of Al, Si and Fe elements.

Its purpose;

In the thesis study, it was aimed to thin the primary aluminum dendrites by adding additional alloying elements to increase the strength and reduce permanent deformation in the eutectic aluminum-silicon alloy and to investigate the effect of modification of eutectic Si crystals on the mechanical properties. It is aimed to increase the service life of the material by improving the mechanical properties of the material with the effect of Titanium used as grain refiner in aluminum alloys and Sr elements to be used for modification. In EN AC 44300[AlSi12(Fe)] series Aluminum alloys, an increase in strength is achieved by pressing (creating dislocation) at low temperatures in order to meet the desired strength under a certain load. In the study to be carried out, the mechanical properties of aluminum alloys to be produced by injection molding method, especially using Strontium and Titanium metals, will be optimized without being subjected to cold forming. By adding the alloying elements to be determined to aluminum alloys in different proportions as grain refiners and modifiers, parametric studies will be carried out and unique aluminum alloys with high strength and low permanent deformation will be developed.

Results;

In this study, AlTi5B1 and AlSr10 master alloys were added to AlSi10(Fe) alloy for grain refinement and modification purposes, and alloys with five different compositions containing 0.08% Ti + different amounts of Sr were produced by high pressure injection molding method. The effect of titanium and strontium addition on the microstructure and mechanical properties of AlSi10(Fe) alloy was examined. Hardness and microhardness measurements, tensile and compression tests were carried out on the produced alloys, and optical and SEM microscope examinations were carried out. The following conclusions were drawn from the experimental studies carried out:

In the hardness examinations of the produced alloys, it was observed that 0.08% titanium added to the AlSi10(Fe) alloy using AlTi5B1 master alloy clearly increased the hardness values by reducing the grain size of the alloy.

By adding AlSr10 master alloy to AlSi10(Fe) alloy containing 0.08% Ti, alloys containing 150ppm, 300ppm and 450 ppm strontium by weight were produced, and a linear increase in the hardness values of these alloys was observed depending on the increase in the Sr amount of the alloy. This increase increased the hardness of alloys containing 150ppm, 300ppm and 450ppm Sr by weight by an average of 2.5 Brinell hardness values for each amount of increase. The difference between the Brinell hardness values of the AlSi12(Fe) alloy without addition and the alloy with 0.08% Ti + 450ppm Sr added is 19%, respectively.

α -Al dendrites were modified by adding titanium to the AlSi10(Fe) alloy, and the eutectic silicon phase was modified by the addition of strontium. Due to the increase in the strontium ratio, the microhardness values of the phases increased. The difference between the microhardness values of α -Al dendrites and eutectic silicon phase in the

AlSi12(Fe) alloy without addition and the alloy with 0.08% Ti + 450ppm Sr added is 181% and 127%, respectively.

Due to the addition of 0.08% titanium to the alloy and the increase in the strontium ratio, the yield and tensile strength values increased linearly after the tensile tests, and the highest yield and tensile strength and % elongation values were obtained in the alloys containing 450ppm Sr. The difference between the yield, tensile strength and % elongation values of the AlSi12(Fe) alloy without addition and the alloy with 0.08% Ti + 450ppm Sr added is 21%, 31% and 69%, respectively.

In the compression test, the percent (%) deformation elongation is due to the fact that the added Ti and Sr elements reduce the grain structure of the alloy and the transformation of eutectic silicon into a fibrosis/spherical structure absorbs the applied Fm force. This situation increases the strength of the alloy. Thus, the addition of Ti reduces the permanent deformation elongation of the alloy. In addition, the permanent deformation elongation decreases proportionally due to the increase in the amount of Sr in the alloy. The difference between the % permanent deformation elongation values of the AlSi1(Fe) alloy without addition and the alloy with 0.08% Ti + 450ppm Sr added is 26%, respectively.

In microstructure examinations, it was observed in optical microscope images that the addition of Ti to the alloy reduced the grain size of the alloy by shrinking the α -Al dendrites. However, it has been observed that this situation does not affect eutectic silicon. On the other hand, it has been observed that the addition of Sr to the alloy shrinks the silicon crystals. When the amount of Sr in the alloy reached 450 ppm by weight, it was observed that the microstructure changed from a coarse lamellar and needle-like structure to a fibrous/spherical structure, and thus it was concluded that the modification took place.

The results obtained in SEM/EDS analyzes support the results obtained in optical microscope images. In the images, it was determined that α -Al dendrites and Si crystals became smaller. Additionally, from SEM/EDS point and regional analyzes of the alloy, it was observed that there were intermetallic phases consisting of Al, Si and Fe elements.

Suggestions;

Based on the results obtained as a result of experimental studies, the following suggestions can be offered to researchers who will work on similar subjects:

The effects of titanium + strontium addition at different rates on the AlSi10(Fe) alloy used in this study on the corrosion properties of the alloy can be examined.

The mechanisms can be explained more clearly by examining in detail the microstructure and mechanical properties obtained by grain refinement using different microstructure characterization techniques such as transmission electron microscopy.

The effects of alloys containing different amounts of strontium and phosphorus added to the AlSi10 (Fe) alloy on the microstructure and mechanical properties studied in this study can be investigated.

In this study, high pressure casting method was used in the production of the alloy. Apart from this method, the effect of pressure on microstructure and mechanical properties can be examined in alloys produced by low pressure casting methods such as sand and gravity mold casting with the same composition.



1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Tez çalışmasında ötektik alüminyum-silisyum alaşımında mukavemeti artırma ve kalıcı deformasyon uzamasını azaltmaya yönelik master alaşım elementleri ilave ederek primer alüminyum dendritlerinin inceltilmesi ve ötektik Si kristalleri modifikasyonun mekanik özelliklere etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılan Ti ve modifikasyon için kullanılacak Sr elementlerinin etkisiyle beraber malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamak hedeflenmiştir. EN AC 44300[AlSi12(Fe)] serisi alüminyum alaşımlarında belirli yük altında istenilen mukavemeti karşılayabilmek için düşük sıcaklıklarda presleme yaparak mukavemette artış sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada soğuk şekillendirmeye maruz kalmadan özellikle stronsiyum ve titanyum elementleri kullanılarak yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri optimize edildi. Ti ve Sr elementlerinin değişik oranlarda tane inceltici ve modifiye edici olarak alüminyum alaşımlarına ilave edilerek bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirildi ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları geliştirildi.

1.2. Literatür Araştırması

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Al-Mg-Si alaşımının şekillendirilebilirliğini, üretim verimliliğini ve mekanik özelliklerini geliştirmek için homojenleştirilmiş kütüklerden ekstrüde edilmiş Al alaşımı sırasıyla döküm, fırın soğutma ve hava soğutmalı yöntemi uygulamıştır. İşlem yapılmamış kütüğe uygulanan ekstrüzyon parametrelerinin ve katılaşma işleminin profilin şekillendirilebilirliği, mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. Döküm ve fırın soğutmalı homojenleştirilmiş kütüklerdeki ikinci aşamaların, ekstrüzyon sırasında yalnızca gevrek çatlak oluşturmadığı, aynı zamanda tane boyutunu da incelttiği rapor edilmiştir.

Dökme ve hava soğutmalı homojenleştirilmiş kütüklerden ekstrüde edilen profillerin mukavemetleri eşdeğer bulunduğundan, Al alaşımlı profillerin çoğu, homojenizasyon işlemi olmadan doğrudan döküm kütükten ekstrüzyona tabi tutularak üretim verimliliğini artırılmıştır. Fırın soğutmalı homojenleştirilmiş kütük en düşük akış stresine sahip olduğu ve bu nedenle ekstrüzyonu etkinleştirmek için daha düşük kırılma kuvveti gerektiği işaret edilmiştir. Fırın soğutmalı homojenleştirilmiş kütükten ekstrüde edilen profilin mukavemeti, hava soğutmalı homojenleştirilmiş kütükten daha yüksek olduğu ve bu nedenle karmaşık kesitli veya daha yüksek performanslı profil için fırın soğutmalı homojenleştirilmiş kütük kullanılması önerilmiştir [1].

Zupanic ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile yeni bir Al-Mg-Si alaşımı AA 6086'nın mikro yapısı ve özellikleri, adlı çalışmada, yeni bir yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı olan AA 6086'nın mikroyapı, mekanik ve yorulma özelliklerinin kapsamlı deneysel incelemesini sunmuştur. Yeni alaşım, daha yüksek bir Si içeriğine sahiptir ve ayrıca Cu ve Zr elementleri içermektedir. Alaşım, homojenizasyon, ekstrüzyon ve T6 ısıtım işleminden sonra döküm haldeki durumu karakterize edilmiştir. Yarı statik ve yorulma testleri, mekanik bir ekstensometre ile servo-hidrolik test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen alüminyum alaşımının yarı statik mukavemetinin, diğer bazı alüminyum alaşımlarıyla karşılaştırıldığında çok daha yüksek olmasına rağmen süneklik değerlerinin aynı seviyelerde kaldığı belirtilmiştir. Düşük Döngülü Yorulma (LCF) ve Yüksek Döngülü Yorulma (HCF) rejimindeki kapsamlı yorulma testlerinde elde edilen sonuçlar, yeni yüksek mukavemetli alüminyum alaşımın yorulma direncinin oldukça arttığını göstermektedir [2].

Kadkhodapour ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, eklemeli olarak üretilen alüminyum-silisyum alaşımları için mikroyapı ve mekanik özellik korelasyonu, eklemeli olarak üretilen metallerin kalite analizi, simülasyon yaklaşımları, süreçler ve mikroyapı özellikleri adlı çalışmada, üretilen metallerin kalite analizi, simülasyon yaklaşımları, süreçler ve mikroyapı özelliklerini incelenmiştir. Otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki uygulamalar için popüler bir seçim haline gelmiş ve nispeten düşük maliyetlerle hataya dayanıklı işlenebilirlikleri ve saygın statik özellikleriyle kendilerini kanıtlamıştır. Ancak bu alaşımlar, lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) yoluyla işlendiğinde üstün özelliklere sahiptir. Her ne kadar ince dağılmış silisyum çökeltileri, döküm muadillerine kıyasla daha üstün özellikleri sağlayan ince taneli mikroyapılar elde edilmesini ve yapının güçlenmesini sağlamakla beraber, katmanlı birikim yoluyla

yönlü zayıf bağlantılara neden olduğunu belirtilmiştir. Bu durum alaşımlarda kesme ve çatlak toleransını azaltarak yapının aynı noktada zayıflatmıştır. LPBF ile üretilecek alüminyum alaşım parçaları tasarlanırken bu etkilerin dikkate alınması gerekmekte olduğu, uygulanan ısıtma işlemlerin süneklik ve yorulma direnci gibi temel özellikleri geliştirmekle beraber, alaşımın statik malzeme mukavemetini azalttığı rapor edilmiştir [3].

Al-Zubaydi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yüksek basınçlı burulma ile işlenen, eklemeli olarak üretilen, nanoyapılı Al-%9Si-%3Cu alaşımı, doğrudan metal lazer sinterlenmiş ve ardından yüksek basınçlı burulma işlemi ile işlenmişlerdir. Dislokasyon yoğunluğuna paralel olarak 60 nm gibi önemli derecede tane incilmesi sağlanmıştır. Alaşımın yatay ve dikey kesitlerinden alınan sertlik ölçümleri, 10 tur yüksek basınçlı burulma işlemi ve sonrasında işlenen numunelerin mukavemet homojenliğinde iyileşme sağlanmıştır. Bu çalışma ile kontrol edilebilir bir ultra ince taneli mikroyapının, metal lazer sinterleme imalatı ve hemen ardından etkili plastik deformasyon prosesi ile elde edilebileceği görülmüştür [4].

Altuntaş ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Al 7075 alaşımı ASTM-E23 standartlarına göre hazırlanan Charpy darbe testi numuneleri vakum atmosferde 480°C'de 1 saat çözdürüldükten sonra su verme işlemi ile hızlı soğutulmuş ve daha sonra 120°C'de 24 saat yapay yaşlandırılmıştır. Bu yaşlandırma işleminin ardından numuneler 180°C'de 5-50 saat sürelerde ikinci kez yaşlandırılmışlardır. Numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu ve kırılma yüzeyi analizleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile çökelek fazların kristalografik analizleri ise XRD (X-ışını difraksiyon spektroskopisi) ile gerçekleştirilmiştir. Çift yaşlandırma ısıtma süresinin artışına paralel η_1 fazı ($MgZn_2$) miktarı artmakta ve alaşımın mukavemetinin artmasında etkili olmaktadır. 10 saatlik çift yaşlandırma ısıtma işlemi sonrasında darbe tokluğu değeri tek yaşlandırma durumuna göre %300 oranında arttığı rapor edilmiştir [5].

Zheng ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, öncelikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının hazırlanmasındaki mevcut problemleri analiz etmekte, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarındaki mukavemetlendirme ve toklaştırma mekanizmalarını özetlemekte ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarını mukavemet ve tokluk açısından karşılaştırmanın fizibilitesini analiz etmektedir. Proses parametrelerinin ayarlanması ve sonuçta ortaya çıkan mekanik özelliklerin yanı sıra yüksek mukavemetli alüminyum üzerine araştırmalar için yeni fikirler de dahil olmak

üzere, teorik analiz ve deneysel doğrulamaya dayalı olarak yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları teknolojisinin ayarlanmasına yönelik araştırma ilerlemesini özetlemektedir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi ve toklaştırılmasına yönelik çözülmemiş ana problemler, zorluklar ve gelecekteki araştırma yönleri de sistematik olarak vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, yüksek güvenilirliğe ve uzun hizmet ömürlüğe sahip, yüksek mukavemetli ve yüksek tokluklu alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine dair uygulanabilir yeni fikirlere yer verilmiştir [6].

Hua ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ön yaşlandırma ve sıcak dövme ile işlenmiş 6082 alüminyum alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri adlı çalışmasında, alüminyum alaşımları için istenilen mekanik özellikler sağlanırken zaman ve enerji tüketiminde tasarruf sağlayabilen yeni dövme işlemi önerilmektedir. Bu süreçte kütük katı çözeltide önceden dövülerek sıcaklıkta bir ön işlemden geçirilmekte ve ardından 200°C’de sıcak dövme yapılmaktadır. Önceden hazırlanmış numunelerin basma sırasındaki akış davranışı ve oluşturulan numunelerin mekanik özellikleri, basma testleri ile incelenmiştir. En iyi performans, 120°C’de 4 saat ön hazırlık ve 200°C’de 10 dakika bekletme sonrasında elde edilmiştir. Geleneksel prosese göre daha yüksek Vickers sertlik değerleri elde edilmiştir. 200°C’de oluşturulan numunelerde yağış ve dislokasyon güçlendirmesi iyileştirilmiştir. Bu dövme işlemi ile kısa sürede tüketim ve düşük enerji tüketimi gibi avantajların yanında şekillendirme sonrası alaşımın mukavemet ve üretim verimliliğini etkili bir şekilde artırabilmektedir [7].

Abushanad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, farklı uçucu kül ve vanadyum karbür içeriklerinin ötektik Al-Si alaşımları esaslı hibrit nanokompozitlerin çeşitli özellikleri üzerine etkisi adlı çalışmasında, alüminyum alaşımlarının mukavemet, elastik modül, aşınma ve korozyon gibi çeşitli özelliklerinin geliştirilmesine yönelmiştir. Alüminyum alaşımlarının mukavemet, elastik modülü, aşınma ve korozyon gibi özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bakımdan, iki tür seramik takviyesi içeren hibrit nanokompozitlerin hazırlanması, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere yukarıda belirtilen özelliklerin geliştirilmesi için umut verici bir stratejidir. Bu nedenle, farklı ağırlık yüzdelerinde vanadyum karbür (VC) ve uçucu kül (FA) parçacıklarıyla Al-Si matrisinden hibrit nanokompozitler üretmek için toz metalurjisi tekniğini kullanılmıştır. Daha sonra hazırlanan tozların mikroyapı ve tane boyutu dağılımları SEM tekniği ve lazer kırınım yöntemiyle ile

incelenmiştir. Hazırlanan tozlar argon atmosferinde sinterlenerek fiziksel, elastik ve mekanik özellikleri ile aşınma ve korozyon davranışları ölçülmüştür. Sonuçlar, ağırlıkça %10 VC ve ağırlıkça %10 FA nanoparçacıklarının eklenmesinin, Al-Si alaşımı parçacık boyutlarında 47,8 nm'ye kadar incelmeye yol açtığını ve mikrosertlik değerini, mukavemetini ve elastisite modülünü sırasıyla % 161, 145 ve 64'e kadar iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, aşınma ve korozyon dirençlerini artırılmış ve bunların kayıpları sırasıyla %40 ve %67'ye düşürmüştür [8].

Hatihat ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tane inceltmenin Al-Mg alaşımının dinamik, mekanik özellikleri ve korozyon davranışlarına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, Al-%2,5Mg alüminyum döküm alaşımı, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin yanı sıra dinamik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için ağırlıkça %0,5 Ti ve ağırlıkça %0,1 B değiştiriciler eklenerek modifiye edilmiştir. Dinamik özellikler, serbest titreşim darbe testi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada, incelenen alaşımların mikroyapısını analiz etmek için yüksek çözünürlüklü polarize optik mikroskop ve geliştirilen fazları belirlemek için XRD analizi kullanılmıştır. Mikroyapı ve mekanik özellikler çoğunlukla katılaşma sırasında tane inceltmesi ve metal ayırma işlemi yoluyla geliştirilmiştir. Modifiye edilmiş alaşımın mikroyapı analizi, tane inceltmesinde önemli bir gelişme göstermiş ve döküm alaşımından 10 kat daha ince taneler elde edilmiştir. Modifiye edilmiş Al-%2,5 Mg/Ti-B alaşımı, Al-%2,5 Mg standart döküm alaşımına göre taneler arası korozyonun (IGC) azaldığını göstermiştir. Dökme Al-Mg alaşımının bileşimine Ti-B elementlerinin dahil edilmesiyle, nihai çekme mukavemeti, gerinim ve sertlik değerleri sırasıyla %30,5, %100 ve %18,18 oranlarında artırmıştır. Modifiye edilmiş alaşımın dinamik özellikleri rezonans bir artış göstermiş ve sönümlenme oranını sırasıyla %7 ve %68 artırmıştır. İncelenen alaşımların tahmin edilen rezonans frekansları deneysel dinamik testlere yakın değerler elde edilmiştir [9].

Moustaf ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, silisyum karbür ve alümina nanopartiküllerle güçlendirilmiş yüzey nanokompozit metal matrisin mikroyapısı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiştir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek mukavemet/ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılırken, düşük aşınma direnci nedeniyle uygulama sınırlamaları bulunmaktadır. Alüminyum alaşımlarının aşınma direncinin artırılması nanoseramiklerle beraber kullanılması ile çözülebilir. Mevcut çalışmada, Al-Mg sistem alaşımı nano silisyum karbür (SiC) ve

nano alüminyum oksit parçacıklar sürtünme karıştırma işlemi (FSP) ile güçlendirilerek alaşımın aşınma direncini ve sertliği geliştirilmiştir. Sonuçlar, AA5250 alaşımının nanoseramiklerle güçlendirilmesinin, mikroyapıda tanelerin inceltiği ve Al_2O_3 kullanıldığında karıştırılan bölgedeki sertliği %190 ve %230 oranında arttırmıştır. Üretilen her iki yüzey nanokompozitinin aşınma direnci önemli ölçüde arttı; ancak AA5250/SiC ile güçlendirilmiş yüzey nanokompoziti, AA5250/Al'den 5,7 kat daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir [10].

Zhu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çözelti işleminden hemen sonra ticari bir üretim hattında bobin soğutma adımı yoluyla termomekanik ön yaşlandırma işleminin eklenmesinden kaynaklanan kümelenme durumundaki değişiklikleri ayrıntılarıyla anlatılmaktadır. Bu ön yaşlandırma adımı, çözelti işleminden sonra ve son boya-piştirme adımından önce doğal yaşlanmanın mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkilerini etkili bir şekilde giderdiği ifade etmiştir. Ön yaşlandırma artı boya piştirme işlemine maruz kalan malzemedeki mükemmel özelliklerden Mg-Si ortak kümelerinin sorumlu olduğu belirtilmiştir. Simülasyonlarda, boş alanların tek tür Si kümelerini etkili bir şekilde stabilize edebildiğini, bunların daha fazla çözünen madde çekmesine imkân sağladığını ve alaşım özellikleri açısından çok faydalı olan daha büyük Mg-Si ortak kümelerinin oluşumuna yönelik bir yol görevi görebildiği belirtilmiştir. Simülasyonlar ayrıca en yakın komşu konfigürasyonlarının kümelerin istikrarı açısından kritik bir husus olduğunu ortaya çıkarmıştır [11].

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Al-Mg-Si alaşımlarının sıcak deformasyon davranışı 400°C sıcaklık aralığında izotermal sıkıştırma testleri ile incelemiştir. Akış davranışları araştırılmış ve işlem haritası oluşturulmuştur. Deforme olmuş numunelerin mikroyapısı, elektron geri saçılımlı kırınım teknikleri ile karakterize edilmiştir. Dinamik yeniden kristalleşme mekanizmalarını araştırmak amacıyla geometrik olarak gerekli dislokasyon yoğunluğu ve tane oryantasyonu yayılımı haritaları hesaplanmıştır. Deforme olmuş mikroyapının Zener-Hollomon (Z) değerlerine güçlü bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Hem alt tane boyutu hem de dinamik yeniden kristalleşme fraksiyonu, $\ln Z$ 'nin azalmasıyla artmıştır. Hem dinamik geri kazanım hem de dinamik yeniden kristalleşme, yüksek sıcaklıklarda deformasyon sırasında meydana gelmiştir. Yüksek $\ln Z$ 'de dinamik geri kazanım hâkim olurken, düşük $\ln Z$ 'de dinamik yeniden kristalleşme hakim olmuştur. Sürekli dinamik yeniden kristalleşme, süreksiz dinamik yeniden kristalleşme ve geometrik dinamik yeniden

kristalleşme olmak üzere üç farklı dinamik yeniden kristalleşme mekanizması gözlenmiştir. Ana dinamik yeniden kristalleşme mekanizması $\ln Z$ 'ye bağlıydı, yani geometrik dinamik yeniden kristalleşme düşük $\ln Z$ 'de hakim olmuş, sürekli dinamik yeniden kristalleşme orta $\ln Z$ 'de hakim olmuş, süreksiz dinamik yeniden kristalleşme ise yüksek $\ln Z$ 'de hakim olduğu gözlenmiştir [12].

Hitzler ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, lazer toz yataklı füzyon, kontura yakın entegre soğutma kanallarına sahip kesici miller gibi parçaların tasarımı için yeni imkanlar getirmiştir. Çok daha büyük bir bileşen veya alt tabaka üzerinde ısı emici görevi gören nispeten küçük bir eriyik havuzu nedeniyle lazer toz yataklı füzyonda elde edilen hızlı soğutma oranları, ince taneli mikroyapılara ve alüminyumdaki alaşım elementlerinin yüksek oranda aşırı doygunluğuna neden olmuştur. Böylece Al-Si- Mg alaşımları etkili bir şekilde çökeltmeyle sertleştirilebilir. Ayrıca, katılaşmış malzeme kendine özgü bir ısıtma işlemine tabi tutulurken, yukarıdaki katmanlar ısıtılır ve yerleşik bölmedeki yüksek sıcaklık, bir tarama izi oluşturulduktan hemen sonra alaşım elementlerinin kümelenme sürecini başlatır. Bu silisyum-magnezyum kümeleri, inşa edilmiş numunelerde atom prob tomografisi ile gözlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda benzer faydalı kümelenme davranışı, döküm numunelerindeki doğrudan yaşlandırma yaklaşımından bilinmektedir; burada yapay yaşlandırma, çözelti tavlama ve söndürmeden hemen sonra gerçekleştirilir. Bu yaklaşımın olası bir ısıtma işlemi sonrası olarak lazer toz yataklı füzyon örneklerine aktarılması, doğrudan yaşlandırmadan sonra bile, yapım aşamasındaki olağanüstü sertliğin en iyi ihtimalle karşılanabileceğini, ancak çoğu durumda bunun önemli ölçüde daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Araştırmalar, lazer toz yataklı füzyon Al-Si-Mg'nin su verme oranına yüksek bir bağımlılık sergilediğini göstermiştir; bu, benzer sertlik sonuçları elde etmek için çözelti tavlamasından sonra iki ila üç kat daha yüksek su verme hızı gerektiren, döküm referans numunelerine göre çok daha belirgindir. Bu, lazer toz yataklı füzyon tarafından üretilen Al-Si- Mg'deki daha ince mikroyapı ve daha kısa difüzyon yolu nedeniyle çökelme sertleşmesi için gerekli olan yarı kararlı bir aşırı doygunluğun elde edilmesinin daha zor olduğunu göstermektedir [13].



2. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Saf Alüminyum

Alüminyumun sembolü Al'dir. Atom numarası 13'tür. Al genellikle doğada serbest metal olarak bulunmamaktadır. Al oksidasyona karşı mükemmel bir dirence sahiptir ve doğada yaygın olarak boksit cevheri formunda bulunmaktadır. Alüminyum birçok endüstride binlerce farklı üründe yapısal bileşen olarak kullanılmakta ve küresel ekonomide çok önemli bir rol oynamaktadır. Alüminyum hafiftir ve aynı hacimdeki çeliğin yaklaşık üçte biri ağırlığındadır. Alüminyumun ışığı yansıtma konusunda güçlü bir yeteneği vardır. Alüminyum manyetik değildir ve normal koşullar altında suda çözünmemektedir. Yerkabuğunda oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan elementtir [14]. Tablo 2.'de alüminyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Alüminyum ani darbelere dayanabilen elastik bir malzemedir ve düşük sıcaklıklarda dahi dayanıklılığı azalmamaktadır. Alüminyumun en büyük avantajı hafifliği ve aşınma direncidir. Havayla temas ettiğinde yüzeyinde oluşan çok ince bir alüminyum oksit tabakasının daha sonraki oksidasyonu engellemesi nedeniyle aşınmaya karşı dayanıklıdır. Alüminyum işlenmesi çok kolay bir metaldir. Alüminyum da tıpkı bakır gibi elektriği ve ısıyı iletmektedir. Alüminyum metale şekil vermek için dövme, döküm, haddeleme, presleme, çekme ve ekstrüzyon gibi tüm işlemler uygulanabilmektedir. En güçlü alüminyum alaşımı, güçlü ve dayanıklı kılmak için az miktarda başka elementlerin eklenmesiyle yapılan bakır alaşımıdır. Alüminyum alaşımları dövülebilir, işlenebilir, kaynaklanabilir, boyanabilir ve cilalanabilir. Çoğu kimyasal maddeye ve bazı asitlere karşı dayanıklı olmakla birlikte alkaliler ve hidroklorik asit ile oldukça aktiftirler [15].

Tablo 2.1. Alüminyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [15].

Açıklama	Sembolü
Sembolü	Al
Görünüş	Gümüşü beyaz metal
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26.98 g/mol
Grup, periyot, blok	13, 3, p
Renk	Gümüş
Enerji seviyesi başına elektronlar	2, 8, 3
Yoğunluk (20°C de)	2,6989 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	660,32°C, 933.47°K, 1220.58°F
Kaynama sıcaklığı	2519°C
Ergime ısısı	10,71 kJ/mol
Buharlaşma ısısı	294 kJ/mol
Isı kapasitesi	24,2 j/mol·K
Kristal yapısı	YMK Yüzey Merkezli Kübik
Kafes sabiti	4.050 Å
Atom Hacmi	10.0 cc / mol
Yükseltgenme seviyesi	+3
Elektronegatifliği	1,61 Pauling ölçeği
İyonlaşma enerjisi	577,5 kJ/mol
Atomik yarıçapı	1.43 Å
Kovalent yarıçapı	118 pm
Elektrik direnci (20°C’de)	26,50 nΩ·m
Elektrik iletkenliği (saf Al 2°C’de)	% 64,94 IACS
Isıl iletkenlik	237 W/(m·K)
Isıl genleşme (25°C’de)	23,1 µm/(m·K)
Mohs sertliği	2,75
Brinell sertliği (E)	245 MPa (HRC: 167 MPa)
Elastik modülü	7.2 . 10 ³ kp/mm ²
Kayma modülü (G)	2.7 . 10 ³ kp/mm ²

Yüzeyindeki alüminyum oksit filmi bu alkali ortamda çözünmektedir. Alüminyum oksijenle birleştiğinde büyük miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Alüminyum 19. yüzyılın sonlarında keşfedilmiştir. Ancak günümüzde tüm teknik uygulamalarda çok önemli bir metal olarak çelik ile birlikte kullanılmaktadır [15].

2.2. Elektrik ve Isı İletimi

Alüminyum, saf alüminyum için 34 m/Ohm mm² olan yüksek bir elektrik iletkenliğine sahiptir. Alüminyum manyetik değildir. Bu özellik elektrik mühendisliği, elektronik ve mekanik alanlarında çok önemlidir. Alüminyum yüksek ısı iletkenliğine sahiptir ve ısıtma ürünleri ve güç dağıtımı için hammadde olarak tercih edilmektedir. Dünyada üretilen alüminyumun bir kısmı inşaat ve taşımacılık gibi sektörlerde kullanılırken büyük bir kısmı gıda ambalajı ve ev tipi ürünlerin üretilmesinde kullanılmaktadır.

Alüminyum, toksik olmadığından gıdaları güvende tutar ve gıdaların ısıdan ve güneş ışığından korunmasına yardımcı olur. Elektronik markalı ürünlerde kullanılan çelik ve plastiğin yerini hammadde olarak alüminyum almaya başlamıştır. Bunun nedeni alüminyumun plastikten daha güçlü ve çelikten daha hafif olmasıdır. Ayrıca alüminyum, teknoloji ürünlerinin çalışması sırasında oluşan ısıyı dağıtabilmektedir. Örneğin, asenkron motorların kafesli rotorlarında genellikle alüminyum çubuklar kullanılmaktadır. Motor soğutma fanı gibi gövde bileşenleri de alüminyumdan yapılmıştır. Alüminyumun yüksek ısı iletkenliği, esnetilme, katı veya içi boş şekillerde kalıplanma kolaylığı, onu soğuk plakalar için ideal bir malzeme haline getirmektedir. Yarı iletken bileşenler ve transformatör ambalajları bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun elektriksel iletkenliği iki kısma ayrılır. Alüminyum Çelik Takviyeli İletken (ACSR) çelik takviyeli alüminyum ve ACAR (güçlendirilmiş alüminyum alaşımı) alaşım takviyeli alüminyum iletkenleridir. Alüminyum Çelik Takviyeli İletken havai hat iletkenleri olup dünya çapında güç dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadır. Bimetalik korozyon riskinin ortadan kaldırılması ve belirli bir kesit için yüksek elektrik iletkenliğinin sağlanması nedeniyle çelik çekirdekli alüminyum örgülü telin kullanımı artmıştır. Kontak kablolarını desteklemek için ACAR katener iletkenleri, bakıra kıyasla daha hafif olmaları ve korozyon riskinin daha düşük olması nedeniyle demiryolu katener elektrifikasyon sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır [15, 16].

2.3. Alüminyumun Doğada Bulunuşu

Genellikle doğal olarak boksit minerali olarak bulunur ve mükemmel antioksidan özellikleriyle bilinmektedir. Bu direncin temeli pasifleştirme özelliklerinde yatmaktadır. Birçok sektörde kullanılmakta, milyonlarca farklı ürün üretilmekte ve küresel ekonomide çok önemli bir rol oynamaktadır. Eski Yunanlılar ve Romalılar, rengi stabilize etmek ve hemostatik bir ajan olarak alüminyum tuzlarını kullanmışlardır. Alüminyum modern tıpta hala büzücü ve vazokonstriktör olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, feldispatlarda, sıcak kayalarda, mikada, kilde, demir açısından zengin lateritte ve boksitte alüminyum silikat olarak oluşmaktadır. Boksit, %52 alümina içeriğine sahip birincil alüminyum cevheri olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.1'de verilen alüminyumun hammaddesi olan boksit kayasının görünümü, bileşimine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Rengi sarımsı beyazdan griye veya pembeden koyu kırmızıya kadar değişir. Her ne kadar 1827 yılında susuz

alüminyum klorürü potasyumla karıştırarak alüminyumu ilk izole eden kişinin Friedrich Wöhler olduğu bilinse de, metal Danimarka'lı kimya ve fizikçi Hans Christian Orsted tarafından çok daha az saf olmayan bir formda üretilmekteydi. Alüminyum birçok mineralin bileşeni olmasına rağmen onu metal olarak izole etmek kolay değildir. Alüminyum sanayide sadece ikiyüz yıldır kullanılırken, demir çok eski çağlardan beri bilinmekte ve kullanılmaktadır. Alüminyum, benzer özelliklere sahip diğer metallere göre daha ucuz ve kolay bulunabilmesi nedeniyle günümüzde dünyada en çok kullanılan ikinci metaldir [15, 16].



Şekil 2.2. Alüminyumun hammaddesi olan boksit cevheri [17].

2.4. Alüminyumun Tarihçesi

Saf alüminyum ilk kez 1825 yılında Danimarkalı kimyager ve fizikçi Hans Christian Orsted tarafından elde edilmekteydi. Alüminyum 200 yılı aşkın bir süredir varlığı bilinmektedir. Alümina kilinin eski çağlardan beri tekstilde ve ilk yardımda kullanıldığı, 19. yüzyılda nadir bulunması nedeniyle altın ve gümüşten daha değerli sayılıyordu. Şap ve alüminyum tuzu Sümerler, eski Mısırlılar ve Hititler tarafından kumaş boyamak ve deri yapmak için kullanılan boya türleridir. Alüminyum cevheri binlerce yıldır çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Alüminyum %100 geri dönüştürülebilir ve 1980'lerden bu yana ambalaj, otomotiv, enerji, kaplama, inşaat, savunma, ulaşım, nanoteknoloji ve havacılık gibi birçok endüstride kullanılmaktadır [15, 16, 17].

2.5. Alüminyumun Elde Edilişi

Alüminyum keşfedildiğinde cevherinden ayrılması çok zor bir metaldir. Alüminyum eldesi, iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada, Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina elde edilir. İkinci aşamada ise, elektroliz ile alüminadan alüminyum elde edilir. Alüminyum temizlenmesi en zor metallerden biridir. Bunun nedeni, çok hızlı oksitlenmesi, çok dayanıklı bir oksit tabakası oluşturması ve pastan farklı olarak yüzeyden soyulmamasıdır. Boksit, alüminyum üretiminde kullanılan alüminyum oksit ve hidroksitlerin karışımı olan bir cevherdir. Alümina (Al_2O_3), Boksit cevherinin saf alüminyum üretmek üzere zenginleştirilmiş halidir. Alümina elektroliz yöntemi ile saf Alüminyuma (birincil alüminyum) dönüştürülür (Şekil 2.3). Saf alüminyum daha sonra alaşım malzemeleri katılarak farklı kullanım alanları için mamul ve yarı mamul hale getirilmektedir [16, 17].

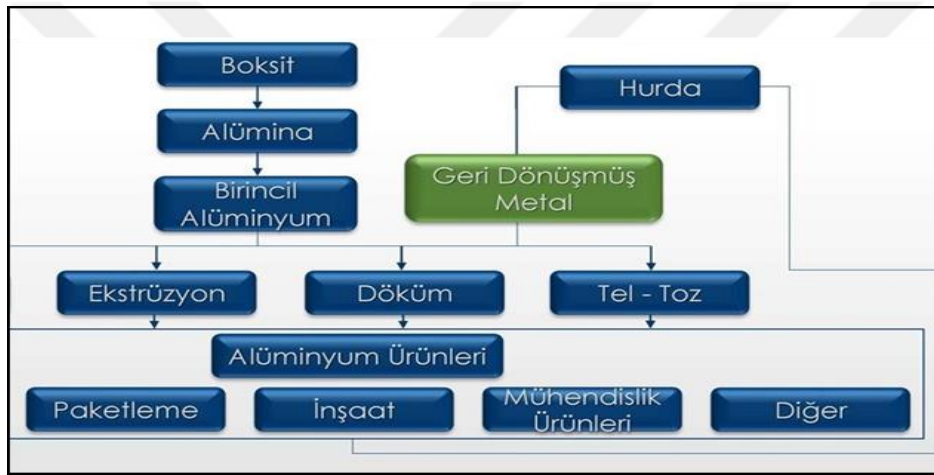


Şekil 2.4. Alüminyum üretimi aşamaları [17].

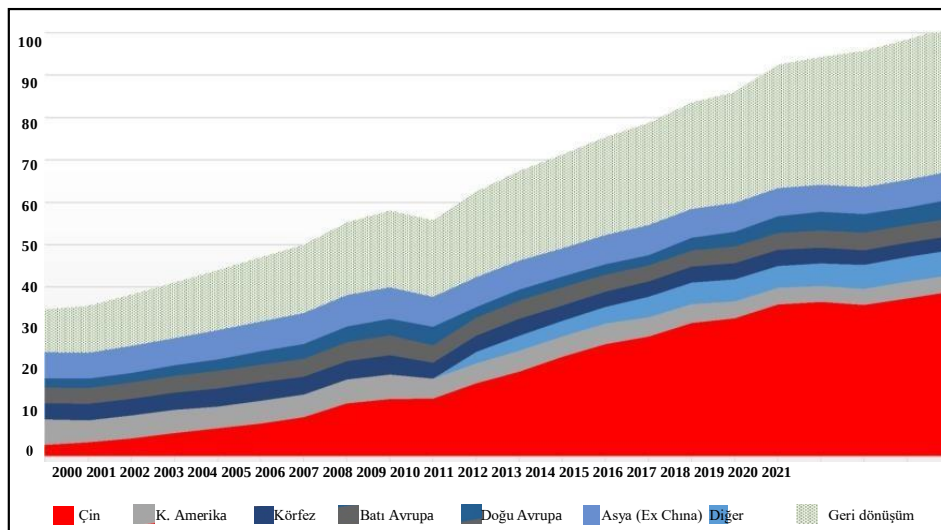
Alüminyum yaygın bir element olmasına rağmen, tüm alüminyum cevherleri ekonomik olarak uygun metal kaynakları değildir. Amerikalı Charles Martin Hall, 1886 yılında alüminyumun elektrolitik üretimi için patent başvurusunda bulunmuştur. Aynı yıl Fransız Paul Héroult teknolojiyi Avrupa’da geliştirdi ancak Hall’un icadından haberi bulunmamaktadır. Bu nedenle adını iki bilim insanından alan Hall-Héroult süreci, bugün dünya çapındaki cevherlerden alüminyumun çıkarılmasında temel yöntemdir. Neredeyse tüm alüminyum metalleri boksit mineralinden ($\text{AlOx}(\text{OH})_{3-2x}$) yapılır. Alüminyum üretimi çok fazla enerji gerektirir, bu nedenle üreticiler izabe tesislerini elektriğin bol ve ucuz olduğu yerlere yerleştirmektedirler. 2019 itibarıyla

dünyanın en büyük alüminyum izabe tesisleri Çin, Hindistan, Rusya, Kanada ve Birleşik Arap Emirlikleri'nde bulunmaktadır ve Çin, küresel alüminyum üretiminin %55'ini oluşturarak açık ara en büyük alüminyum üreticisidir [15, 16, 17].

Alüminyum üretimi ve kullanımı Şekil 2.5'de verilmiştir. Dünya alüminyum talebi son 20 yılda ortalama %5,26 büyümüştür. 2021 yılı birincil alüminyum üretimi %3,1 artarak 67,3 Milyon ton olarak gerçekleşmiş, geri dönüşüm ile birlikte küresel alüminyum talebi 101 milyon ton olmuştur. Çin küresel birincil alüminyum üretiminin %58'ini gerçekleştirmektedir. Alüminyum geri dönüşümü sağladığı yüksek enerji verimi ile güçlü bir şekilde büyümektedir. Şekil 2.6'de dünya alüminyum talebi (milyon ton) gösterilmektedir [17].



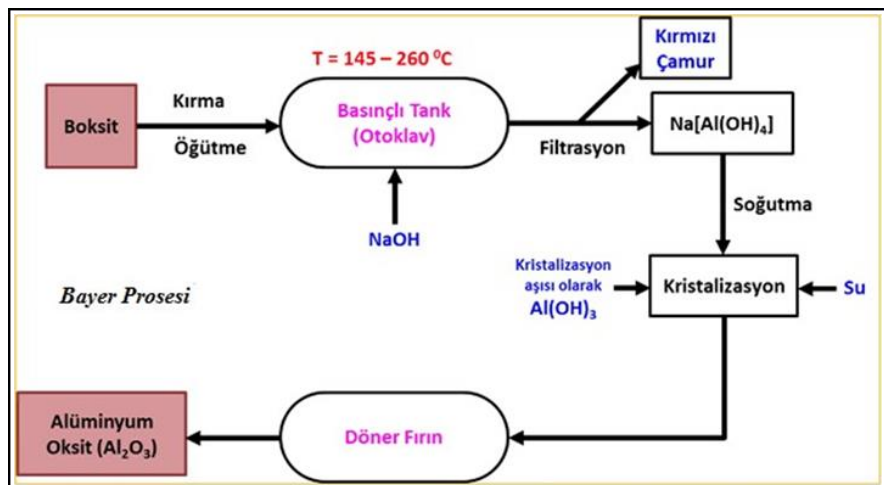
Şekil 2.7. Alüminyum üretimi ve kullanımı [17].



Şekil 2.8. Dünya alüminyum talebi (milyon ton) [17].

2.5.1. Birincil alüminyum üretimi

Bayer prosesi, alümina (alüminyum oksit) üretmek için boksitin rafine edilmesinin başlıca endüstriyel yoludur ve Carl Josef Bayer tarafından geliştirilmiştir. Alüminyumun en önemli cevheri olan boksit, yalnızca %30-60 oranında alüminyum oksit (Al_2O_3) içermektedir; geri kalanı silika, çeşitli demir oksitler ve titanyum dioksit karışımıdır. Alüminyum oksit, alüminyum metaline dönüştürülmeden önce daha da saflaştırılmalıdır. Bayer süreci sırasında “Kırmızı Çamur” üretilir. Bu işlemle boksitlerden alüminyum (oksi) hidroksitleri çıkararak alümina elde edebiliriz, bu da sonunda eritilip alüminyum elde edilebilmektedir. Bayer süreci döngüsel bir süreçtir ve genellikle Bayer döngüsü olarak adlandırılır (Şekil 2.9). Dört adımdan oluşur: kırma ve ufalama, berraklaştırma, çöktürme ve kalsinasyondur. Bayer prosesi aynı zamanda düşük ekstraksiyon verimine rağmen yan ürün olarak galyumun da ana kaynağıdır. 1 ton alüminyum oksit üretmek için 1,9-3,6 ton boksit (boksitin alümina içeriğinin yaklaşık %90’ına karşılık gelir) gereklidir. Bunun nedeni, cevherdeki alüminyumun çoğunluğunun işlem sırasında çözünmesidir. Enerji tüketimi 7 GJ/ton ila 21 GJ/ton arasındadır (proseslere bağlı olarak), bunun çoğu termal enerjidir. Üretilen alüminyum oksidin %90’ından fazlası (%95-96) alüminyum üretmek için Hall- Hérault işleminde kullanılır. Aşağıda Bayer Prosesi şematik olarak gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.10. Alüminyum üretiminde Bayer süreci [17].

2.5.2. İkincil alüminyum üretimi

Alüminyum, günümüzde kullanılan en kolay geri dönüştürülebilir malzemelerin başında gelmektedir. Ömrünün sonuna kadar sonsuz geri dönüştürülebilir bir malzeme olan alüminyum, sürdürülebilir bir yaşam için özel bir metaldir. Günümüzde

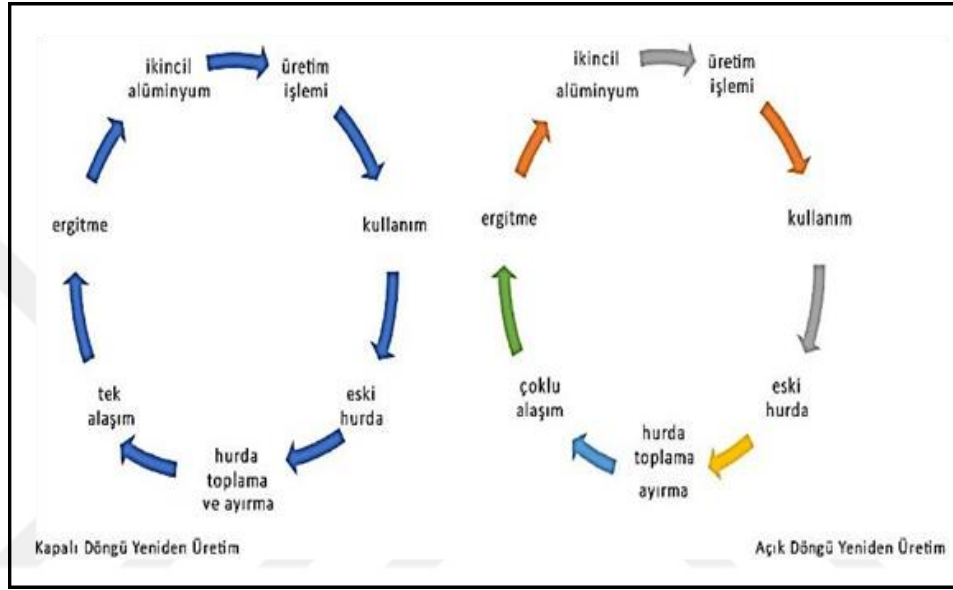
endüstriler sürdürülebilir bir gelecek tasarlarlarken alüminyum, bu noktada benzersiz bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Alüminyum, geri dönüşümü kolay malzemelerden biridir. Alüminyumun yeniden üretimi birincil alüminyum, geri dönüştürülmüş alüminyum ise ikincil alüminyum olarak tanımlanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar üretilen alüminyumun yaklaşık %75'i geri dönüşüm ile günümüzde kullanılmaktadır. Alüminyum geri dönüşümü birçok sektörde tercih edilmektedir. Alüminyum, hafif, güçlü, korozyona dayanıklı olmasının yanı sıra sonsuz geri dönüştürülebilir yapısı ile birçok sektörde kullanılmaktadır. Son derece dayanıklı bir metal olan alüminyum %100 geri dönüştürülebilir. Doğal değerini kaybetmeden tekrar tekrar geri dönüştürülebilen alüminyum sonsuz döngüsüyle tekrar tekrar kullanılabilir. Şekil 2.11'da alüminyum yarı mamul ve mamul üretim döngüsü gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.12. Alüminyum yarı mamul ve mamul üretimi [17].

Artan alüminyum geri dönüşümü, daha az enerji kullanımı ve düşük karbon etkisi anlamı taşımaktadır. Şekil 2.13'de aşamaları verilen alüminyumun geri dönüşümü, karbon ayak izinin azaltılması ve sürdürülebilir bir gelecek için kritik öneme sahiptir. Saf alüminyum üretmek önemli miktarda enerji gerektirmektedir. Bu nedenle geri dönüştürülen alüminyum, saf alüminyum elde etmek için gereken enerjiden %95 tasarruf sağlamaktadır. İşlenmemiş boksit cevherinden alüminyum çıkarmak ve rafine etmek pahalıdır ve yüksek enerji gerektirmektedir. Hurda alüminyumun geri dönüşümü işlenmemiş alüminyum üretmek için gereken enerjinin sadece %5'ini gerektirmektedir. Geri dönüştürülmüş alüminyum kullanmak %95 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu durum geri dönüşüm sektöründe nadir ve benzersiz bir döngüdür. Alüminyum, arzı etkileyen jeopolitik problemler nedeniyle son yıllarda dalgalansa da

alüminyum geri dönüşümünün geleceği parlak olarak gözükmektedir. Geri dönüşüm için oldukça ideal bir malzeme olan alüminyum, hafif ve neredeyse sonsuz geri dönüşüm potansiyeli nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Alüminyum geri kazanımı ile yüksek oranda enerji tasarrufu sağlanmasından kaynaklı karbon emisyon tasarrufu ikincil alüminyumun önemini ortaya koymaktadır. Ömrünü tamamlayan alüminyumların geri dönüştürülerek yeniden kullanıma kazandırılması hem çevresel hem de sürdürülebilirlik açısından kritik önem arz etmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.14. İkincil alüminyum üretimi [17].

2.6. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle alüminyum, günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan ikinci metaldir. Alüminyum alaşımları hafif olmaları ve oksidasyona karşı dirençleri nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadırlar. Alaşımların endüstriyel sınıflandırması, döküm veya işlenmiş alaşımlardır ve bu nedenle ısıyla şekillendirilebilir/ısıyla şekillendirilemez. Döküm alüminyum alaşımları ekonomik olmasına rağmen çekme gerilmeleri düşüktür [18, 19, 20, 21, 22, 23].

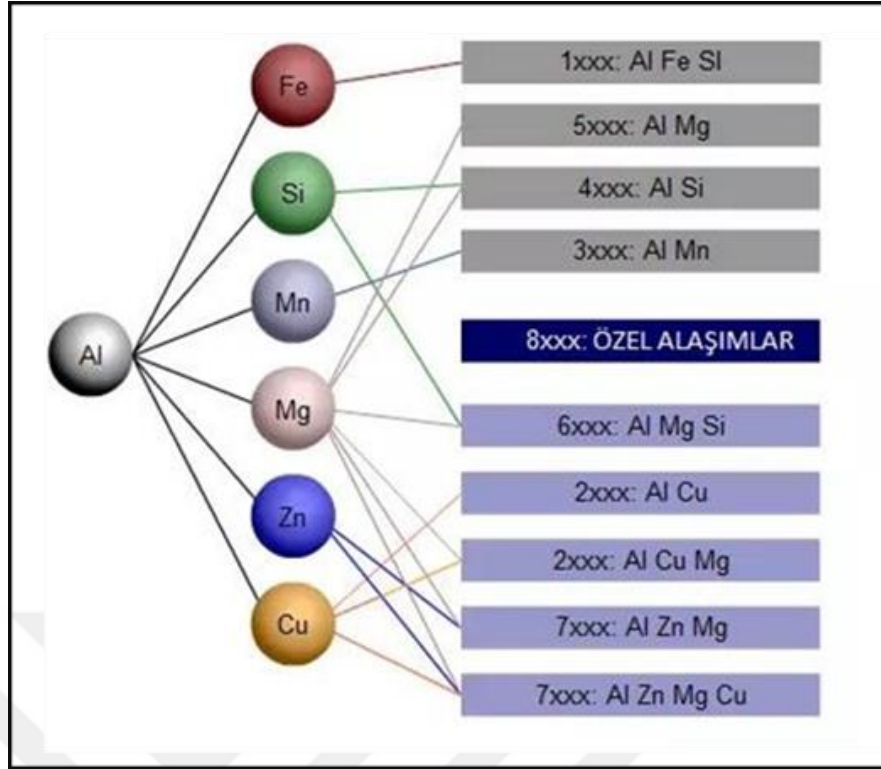
2.6.1. Dövme alüminyum alaşımı

Alüminyum alaşımı, alüminyum ve çeşitli metallerin belirli oranda karışımıdır. Dövme alüminyum alaşımları, alüminyum ve çeşitli metallerin karıştırılmasıyla elde edilen bir malzemenin ağır hizmet parçaları üretmek üzere yüksek basınç altında preslendiği, dövüldüğü veya gerildiği bir üretim prosesidir. Dokulu alüminyum alaşımları aynı zamanda inşaat ve inşaat sektörü uygulamaları için de sıklıkla ilk

tercihtir. Bunlar dövme, haddeleme, ekstrüzyon, çekme veya diğer çeşitli metal işleme süreçleri yoluyla ara ürünlere dönüştürülür. Bakır, silisyum, manganez, magnezyum ve çinko gibi metaller, özellikle alüminyum dövme tesislerinde üretilen alüminyum alaşımlarının dövülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımın içerdiği çeşitli metaller, alüminyumun mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda alüminyum malzemeye eklenen metal katkıları alüminyumun sertliğini ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Tablo 2.2 ve Şekil 2.15’de dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması, alüminyum serileri ve ana alaşım elementleri gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [15].

Alaşım	Açıklama
1xxx	Saf alüminyum
2xxx	Ana alaşım elementi bakır olup, magnezyum gibi diğer elementlerde bulunabilir
3xxx	Ana alaşım elementi mangan olan alüminyum alaşımları
4xxx	Ana alaşım elementi silisyum olan alüminyum alaşımları
5xxx	Ana alaşım elementi magnezyum olan alüminyum alaşımları
6xxx	Başlıca alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alüminyum alaşımları
7xxx	Ana alaşım elementi Zn olan Al alaşımları, ancak Cu, Mg, Cr, ve Zr gibi elementler bulunabilir
8xxx	Kalay ve biraz lityum içeren alüminyum alaşımları
9xxx	Gelecekte kullanılmak üzere belirlenmiştir



Şekil 2.16. Alüminyum serileri ve ana alaşım elementleri [17].

2.6.2. Dökme alüminyum alaşımı

Ana metali alüminyum olan alaşımlara “alüminyum alaşımları” denir. Hafif metaller olarak da adlandırılırlar. Alüminyum alaşımları bakır, çinko, silisyum, magnezyum, manganez, demir, nikel, titanyum vb. içermektedir. Elementlerin eklenmesiyle oluşturulurlar. Özellikleri hafiftirler, termal ve elektriksel olarak iletkenler, ısıtılma işlemine uygundur ve bazı kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır. Alüminyum alaşımı döküme uygundur. Ayrıca dövme, çekme ve haddeleme yoluyla oluşturulan alüminyum alaşımları da üretilmektedir. Korozyona dayanıklı olmaları ve zehirlenme riski taşımamaları nedeniyle ilaç ve gıda sanayinde koruyucu olarak kullanılırlar. Döküm yapmak için kullanılan alüminyum alaşımlı külçeleri ifade etmektedir. Dökme alaşım bileşimleri, dökümden sonra haddeleme, dövme, ekstrüzyon veya diğer şekillendirme işlemlerine yönelik değildir. Bazı alüminyum alaşımları özellikleri aşağıdaki gibidir [18, 19, 20, 21, 22, 23].

- Çinko dökülebilirliği artırır ve yüksek çinko alaşımları soğutulduğunda sıcak çatlama ve büzülme sergiler. %10’dan fazla alaşımların stresli korozyon çatlamasına karşı direnci zayıftır.
- Bakırdan alüminyuma; sertliği, direnci, akışkanlığı ve uygulama kolaylığını

garanti eder. Bakırın ötektik bileşimi %33 alüminyumdur.

- Silisyum alüminyumda çok az miktarda (%1-1,5) çözünür. Silisyum %12 alüminyum ile ötektik bir bileşik oluşturur. Kristalleri seyreltir ve onlara iyi özellikler kazandırır: Daha düşük erime noktası (565°C), artan mekanik özellikler ve ısı direnci, artan akışkanlık silisyum içeriğini ile arttıkça srtmaktadır.
- Manganezin alüminyumdaki çözünürlüğü çok küçüktür (%0,3). Erime noktasını artırmaktadır. Akışkanlığı arttırmak için demir ile birlikte kullanılır. Alaşımın tokluğunu ve sünekliğini geliştirir.
- Magnezyum. magnezyumun ötektik bileşimi %33 alüminyumdur. Düşük yoğunluğundan dolayı nüfuz ettiği alaşımın yoğunluğunu azaltır. %6'dan fazla magnezyum içeren alaşımlar çökeltme sertleşmesine tabi tutulmaktadır.
- Demir iğne benzeri yapılar şeklinde kristalleşir. İğne benzeri kristallerin oluşumu tehlikelidir. Mekanik direnci azaltır.
- Nikel korozyon direncini artırır ve parçalara uzun süreli parlaklık kazandırır.
- Alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak titanyum bor ile birlikte kullanılır.

Her ana gruptaki alaşımlar iki alt gruba ayrılır; “ısıl işleme tabi tutulabilen alaşımlar” ve “ısıl işleme tabi tutulmayan alaşımlar”dır. Isıl işlem uygulanabilen alaşımların mukavemeti yaşlandırma yoluyla artırılabilirken, ısıl işlem uygulanamayan alaşımların mukavemeti sertleştirme, katı çözelti güçlendirme ve dispersiyon yoluyla artırılabilir [18, 19, 20, 21, 22, 23].

2.7. Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları çelikten sonra tercih edilen metallerdir. Ulaşım, elektrik, güç elektroniği ve elektrik gibi günlük yaşam alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif yapısı ve dayanıklılığı nedeniyle ulaşım ve inşaat sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum dünyada en yaygın kullanılan metallerden biridir. Alüminyum yerkabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir ve günlük yaşamın birçok alanında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı alanlardan bazıları şunlardır: Alüminyum alaşımları otomobil,

uçak, kamyon, demir yolu, gemi, bisiklet gibi ulaşım araçları ve bunların parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kutular ve plastik ambalajlar alüminyumdan yapılmıştır. Alüminyum aynı zamanda inşaat sektöründe kapı, pencere, kaplama ve kablo olarak da kullanılmaktadır. Elektrik hatları ile mutfak eşyaları ve bıçakların üretiminde de kullanılmaktadır. Şekil 2.17’da dünya alüminyum talebi ve Şekil 2.10’da Türkiye işlenmemiş alüminyum tüketimi (ton) gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



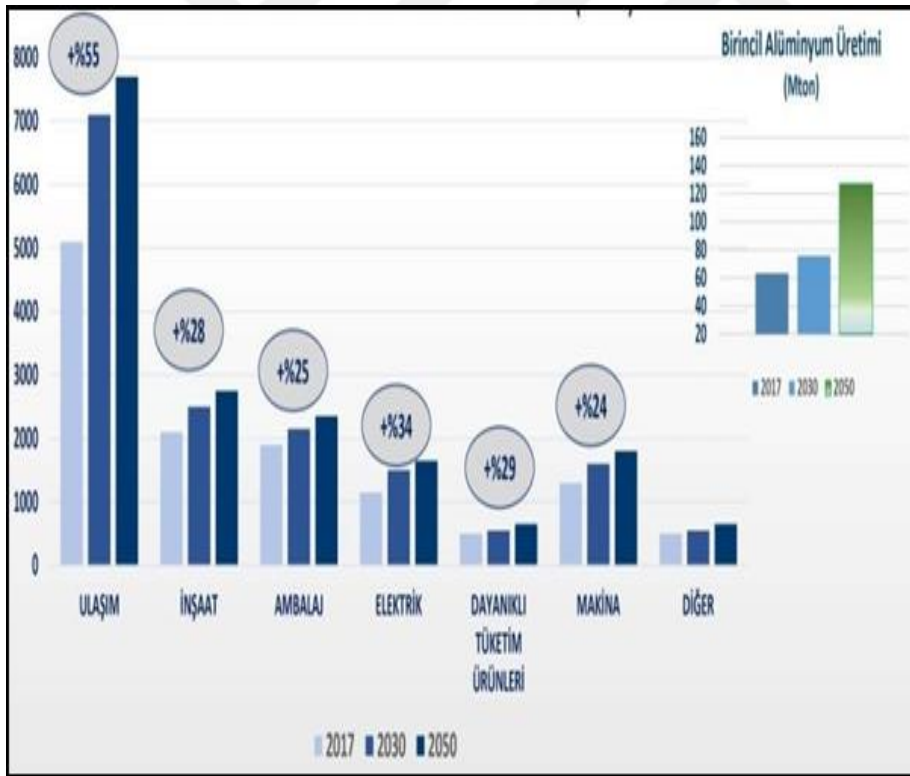
Şekil 2.18. Dünya alüminyum talebi [17].



Şekil 2.19. Türkiye işlenmemiş alüminyum tüketimi (ton) [17].

2.7.1. İnşaat sektörü ve mimari

Korozyona dayanıklı yapısı nedeniyle alüminyum çok az bakım gerektirmektedir. Alüminyum tasarımda güç ve esneklik sağlamaktadır. Ayrıca hafif yapısı kullanımı kolaylaştırır. Alüminyumun yüksek ısı iletkenliği nedeniyle binalar kışın sıcak, yazın serindir. Küresel alüminyum tüketiminin büyük bir kısmı inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Alüminyum, yüksek şekillendirilebilirliği ve mukavemeti nedeniyle değerli bir yapı elemanıdır. Günümüzde gökdelen ve köprü inşaatlarında sıklıkla alüminyum kullanılmaktadır. Ayrıca spor tesisleri, stadyumlar, binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerde, merdivenlerde, bina çerçevelerinde ve çatı çerçevelerinde de kullanılmaktadır. Açılabilir yapısı ve zarif görünümü nedeniyle pencere çerçeveleri, kapı kolları, korkuluklar, ızgaralar ve perde çubukları gibi iç dekorasyonda alüminyum kullanılmaktadır. Ancak şık görünümünden dolayı iç ve dış mekân mobilyalarında tercih edilmektedir. Şekil 2.20’de sektörlere göre alüminyum talebi gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.21. Sektörlere göre alüminyum talebi [17].

2.7.2. Ambalaj ve gıda sektörü

Alüminyumun yaklaşık beşte biri içeceklerde, yiyeceklerde, ilaçlarda vb. sektörlerde paketleme için kullanılır. Çarşaf, şişeler, teneke kutular, termoslar, mutfak eşyaları,

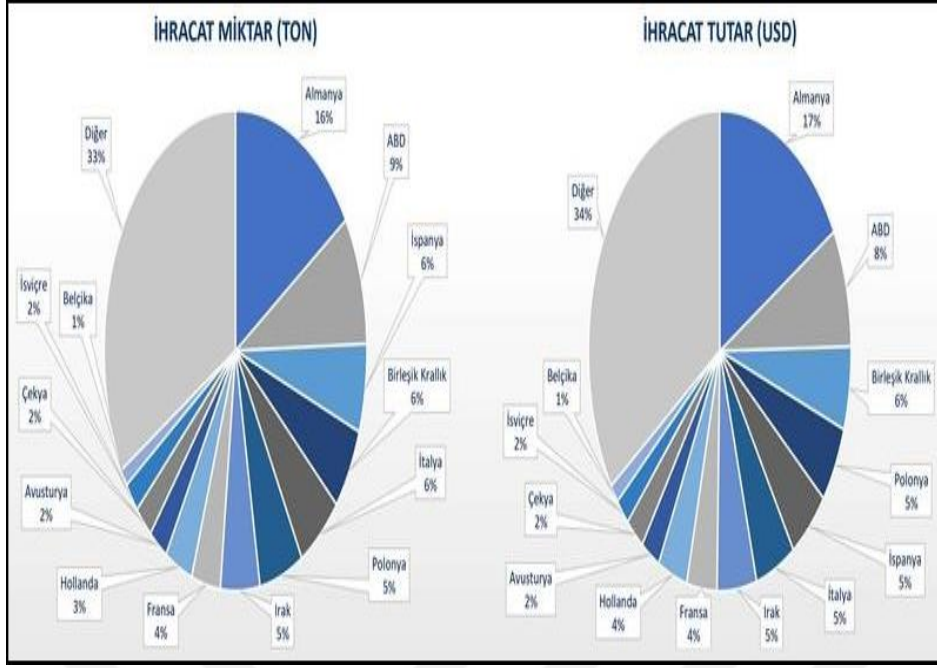
tencereler ve çaydanlıklar alüminyumun kullanıldığı malzemelerdir. Alüminyum gıda güvenliğini ve sızdırmazlığı sağlar. Korozyona dayanıklı ve su geçirmezdir. Gıdayı diğer zararlı unsurlardan korur ve ambalaj malzemesi olarak kullanılır. Alüminyum, korozyon direnci ve UV, nem ve kokulara karşı bariyer özelliğı nedeniyle gıda ambalajlarında ve filmlerde kullanılır. Alüminyum en kullanışlı ambalaj malzemelerinden biri olup, toksik olmaması ve ürünlere sızmamaması nedeniyle gıda ambalajlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 2.22’de muhtelif alüminyum ambalaj çeşitleri gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.23. Muhtelif alüminyum ambalaj çeşitleri [17].

2.7.3. Tüketici elektroniğı

Alüminyum elektronik endüstrisinde önemli bir unsurdur. Elektronik üreticileri son zamanlarda elik ve plastik yerine alüminyumunu tercih etmeye başlamışlardır. Alüminyum, yüksek ısı iletkenliğı nedeniyle elektronik cihazlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Daha yeni elektronik ekipman modelleri, alüminyum kasalara ve bileşenlere sahiptir. Alüminyum, akıllı telefonların, tabletlerin, dizüstü bilgisayarların, televizyonların, bilgisayar monitörlerinin ve elektronik cihazların imalatında tercih edilmektedir. Şekil 2.24’de ülkelere göre alüminyum ihracatımız gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.25. Ülkelere göre ihracatımız [17].

2.7.4. Elektrik sektörü

Beyaz eşya ve güç kablolarında %10 civarında alüminyum tercih edilmektedir. Bakır kabloların pahalı olması ve yüksek iletkenliği desteklemek için destek yapıları gerektirmesi nedeniyle alüminyum tercih edilmektedir. Alüminyum para tasarrufu sağlamaktadır. Korozyona dayanıklılığı, yüksek sünekliği ve düşük yoğunluğu nedeniyle yüksek voltajlı elektrik uzun mesafelere iletilebilir. Transformatör ve kablolama sistemlerinde kullanılır. Ayrıca alüminyum, muhafazalarda, montajlı bileşenlerde, televizyonlarda, ev aletlerinde, ses sistemlerinde ve iletişim ekipmanlarında kullanılmaktadır [18, 19, 20, 21, 22, 23].

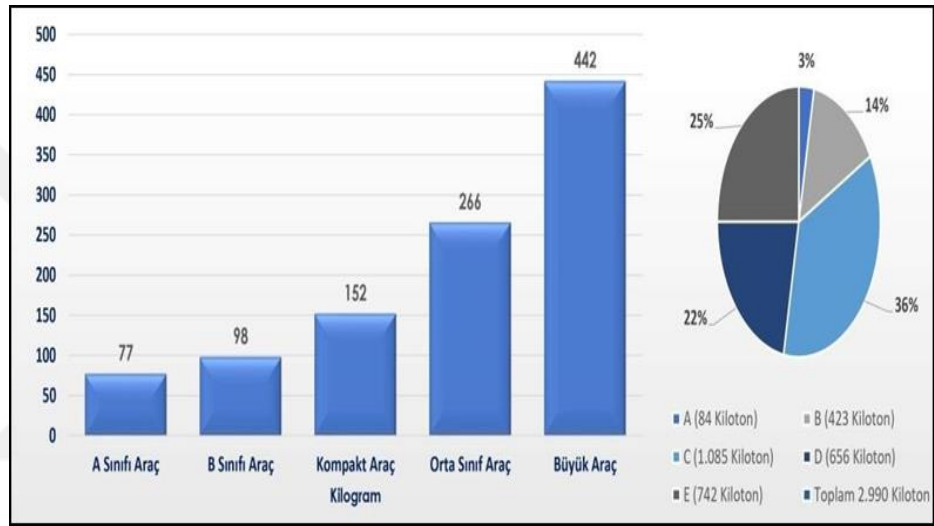
2.7.5. Ulaşım

Alüminyum, taşıma araçlarının imalatında kullanılan unsurlardan biridir. Alüminyumun yaklaşık dörtte biri ulaşımda kullanılmaktadır. Korozyona karşı dayanıklılığı ve diğer metallerle alaşım oluşturabilme özelliği, taşıma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Uçak, tekne, tren, otobüs ve diğer motorlu taşıtlar alüminyum için tercih edilen ulaşım şekilleridir. Alüminyum, uçak kanatlarının ve gövdelerinin yapımında ve ayrıca küçük deniz taşıtlarının yapımında yaygın olarak kullanılır [18, 19, 20, 21, 22, 23].

2.7.6. Otomotiv endüstrisi

Alüminyum genellikle otomobillerde kullanılır. Alüminyum otomotiv parçaları iyi

termal ve estetik özelliklere sahiptir. Alüminyum ayrıca kulplar, tabelalar, braketler, aynalar, şarj adaptörleri, karbüratör gövdeleri, fan kavrama parçaları vb. diğer parçalarda da kullanılmaktadır. Tekerlekler, motor blokları, süspansiyon bileşenleri, kaportalar ve tekerlek taşıyıcıları gibi çeşitli otomotiv parçaları alüminyumdan yapılmıştır. Alüminyum jantlar çoğunlukla otomobillerde kullanılmaktadır. Geri dönüştürülebilirliği nedeniyle alüminyum diğer tüm malzemelerden daha iyi performans gösterir. Çünkü alüminyum hiçbir kalite kaybı olmadan geri dönüştürülebilir. Şekil 2.26'de otomobil segmentlerine göre ortalama alüminyum kullanımı (kg) gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.27. Otomobil segmentlerine göre ortalama alüminyum kullanımı (kg) [17].

2.7.7. Havacılık endüstrisi

Havacılıkta sürtünme, kaldırma, iniş yükleri, ani hızlanma veya yavaşlama, geri tepme atışları, aerodinamik yükler ve uçağın kendi ağırlığı gibi kuvvetler altında çalışan bu uçaklar için güvenilirlik ve güvenlik çok önemli unsurlardır. Bu alanda üretilen parçaların her türlü çalışma koşulunda amaçlanan gereksinimleri karşılayabilmesi gerekmektedir. Alüminyum aynı zamanda havacılık endüstrisinde de kullanılmaktadır. Alüminyum, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sünekliği ve korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Alüminyumun korozyon direnci, hava yolculuğu sırasında uçakların ve yolcuların güvenliğini etkili bir şekilde sağlamaktadır. Kargo ve yolcu uçaklarının yapımında alüminyumun kullanılması, daha fazla ağırlık kapasitesi ve daha iyi yakıt verimliliği sağlamaktadır. Şekil 2.28'de çeşitli alüminyum kullanım alanları gösterilmektedir [18, 19, 20, 21, 22, 23].



Şekil 2.29. Alüminyum kullanım alanları [17].

2.8. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Alüminyum, iyi bilinen birçok olumlu özelliğine ek olarak, zayıf mekanik ve dökülebilirlik özelliklerine de sahiptir. Bu istenmeyen özellikleri iyileştirmek için alüminyuma ilave alaşım elementleri eklenmektedir. Uygulama alanına göre bir alaşım seçebilmek için alaşım elementlerinin alüminyum üzerindeki etkisini anlamak gerekir. Şekil 2.30'da elementlerin alüminyum üzerine olan etkileri gösterilmektedir [21, 22, 23].

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ti	Cr	Ni	Li	Zr	V	Sn	B	Bi	Pb
Yoğunluk	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
Aloşkanlık	↓	↑	↑	↓	↓	=	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sertleşme	↑	↑	↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-	↓
Mukavemet Sürtünme Muk.*	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑↑↑	↑↑	-	↑	-	-	-	↑	↑	-	-
Elektrik İletkenliği	↓	↓↓	↓↓	↓↓↓	↓↓	↓	↓↓↓	↓↓↓	↓	↓↓↓	↓↓	↓↓	=	↑↑↑	=	-
Korozyon Mukavemeti	-	↑	↑↑↑	↑↑	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	↓	-	↓	↓
Isıl Genleşme Katsayısı	-	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	-	-	-

= Değişmez
* Bilinmiyor veya karakteristik değil

Şekil 2.31. Elementlerin alüminyum üzerine etkisi [15].

2.8.1. Bakır elementinin alüminyuma etkisi

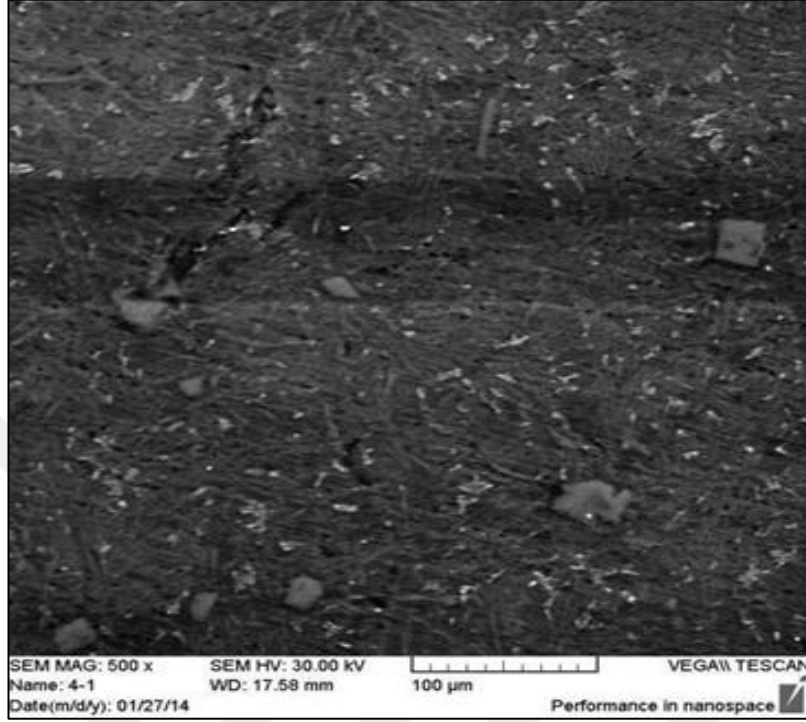
Bakır (Cu), alüminyuma katkı maddesi olarak eklenen temel alaşım elementlerinden biridir. Katılım seviyeleri %1 ile %12 arasında değişmektedir. Alaşımdaki Cu içeriği arttıkça alaşımın akışkanlığı, çekme mukavemeti ve sertliği artmaktadır. Cu, iç büzülmeyi azaltan ve alaşımın işlenebilirliğini artıran bir alaşım elementidir. Ayrıca sıcak yırtılma mukavemetini azalttığı için kalıplamayı daha da zorlaştırmaktadır. Cu, plastik alaşımların üretiminde %3 ila %5 oranlarında kullanılır. Cu içeriği %5'in üzerindeyse malzemenin işlenmesi zorlaşmaktadır. Aynı zamanda korozyon direncini azaltır ve elektrik iletkenliğini azalmaktadır. Dökme alaşımlarda %12'ye kadar kullanılabilse de genellikle %10'dan fazlası tercih edilmemelidir. Tablo 2.4'de farklı Cu ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi gösterilmektedir [22, 23, 36].

Tablo 2.5. Farklı Cu ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi gösterilmektedir [18].

Alaşım No	Alaşım Tipi	Çekme mukavemeti (MPa)	Verim gücü (MPa)	Gerilme	Sertlik HV	Uzama %'si	Azaltma Alanı %
1	Al-12wt%Si	111	20	0.062	34.734	6,2	5,84
2	Al-12wt%Si +1wt%Cu	135	32	0,0595	45.788	5,95	5,62
3	Al-12wt%Si +2wt%Cu	166	44	0,0586	63,0987	5,86	5,53
4	Al-12wt%Si +3wt%Cu	172	49	0,0576	66,5356	5,76	5,45

Abdulsahib ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, farklı Cu ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara baktığımızda; Abdulsahib, (2014), alüminyum alaşımlarının düşük ağırlıkları ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada büyük önem taşımakta olduğunu ifade etmektedir. Metalurji endüstrisinde ve çeşitli teknik uygulamalarda kullanılan metallerin ve alaşımların, özellikle de alüminyum alaşımlarının düşük erime noktaları ve kullanımı nedeniyle geri dönüştürülmesine büyük ihtiyaç olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada, farklı yüzdelerde bakır ilavesinin Al-Si alaşımının (pistonun kazıyıcı görevi gören kısmı) mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çekme, sertlik, mikroyapısal SEM ve XRD testleri yapılmıştır. Sonuçlar, alaşıma bakır eklenmesinin (Al-%12Si) mekanik özelliklerini (gerilme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik)

iyileştirdiğini ve aynı zamanda baz alaşımla karşılaştırıldığında Al-Si alaşımının mikroyapısını değiştirdiğini gösterdiği ifade edilmektedir. Şekil 2.32’de Al-12wt%Si alaşımı için SEM görüntüsü verilmiştir [24, 37].



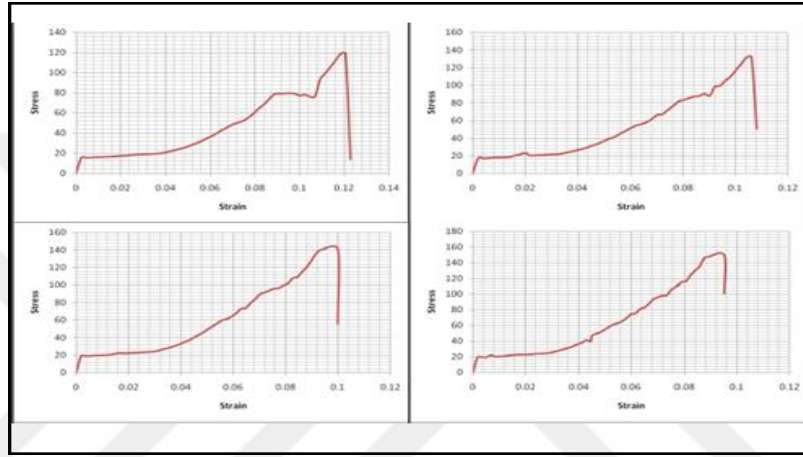
Şekil 2.33. Al-12wt%Si alaşımı için SEM görüntüsü [24].

2.8.2. Silisyum elementinin alüminyuma etkisi

Silisyum (Si), Alüminyum %20’ye kadar (hipereutektik) miktarlarda eklenebilir. Bir miktar Mg ve Si ekleyerek Al-Si alaşımını ısıl işlenebilen bir döküm haline getirilebilmektedir. Bu alaşımların çekme mukavemeti çok yüksek değildir ve 13,6 ile 15,4 kg/mm² arasında değişmektedir. Yüksek korozyon direncine, termal ve elektriksel iletkenliğe ve düşük genleşmeye sahiptirler. Bu alaşımlar yüksek korozyon direncine sahip olmakla beraber işlenmesi zordur. Döküm alaşımlarındaki silisyum alaşımlarının akışkanlığını ve yüksek sıcaklık direncini %12’ye kadar artırılabilir [21, 22, 23].

Mehdi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, farklı Si ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara baktığımızda; Mehdi vd., (2015). Bu çalışmasında alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun nedeninin özellikle yakıt tüketiminin daha fazla azaltılması için ağırlık tasarrufuna duyulan gerçek ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Tipik alaşım elementleri bakır, magnezyum, manganez, silisyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımlarının yüzeyleri, koruyucu bir

alüminyum oksit tabakasının oluşması nedeniyle kuru ortamda parlak bir parlaklığa sahiptir. Başlıca Mg ve Si elementel katkılarını içeren 4xxx, 5xxx ve 6xxx serisi alüminyum alaşımları artık çeşitli otomobil endüstrilerinde çelik panellerin yerine kullanıldığını ifade etmektedirler. Çalışmada Si yüzdesini değiştirerek alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Sonuçlar, S içeriğinin artmasıyla katılma süresinin arttığını ve aynı zamanda sıvı sıcaklığının azaldığını göstermiştir. Alüminyum alaşımının çekme mukavemeti, Si içeriğinin %6'ya kadar arttırıldığını belirtilmektedir. Alüminyum alaşımı için gerilme şekil değiştirme diyagramı aşağıda verilmektedir [25, 38]. Şekil 2.18 (a) Si-%1,5, (b) Si-%3, (c) Si-%4,5, (d) Si-%6 olarak belirtmektedir.



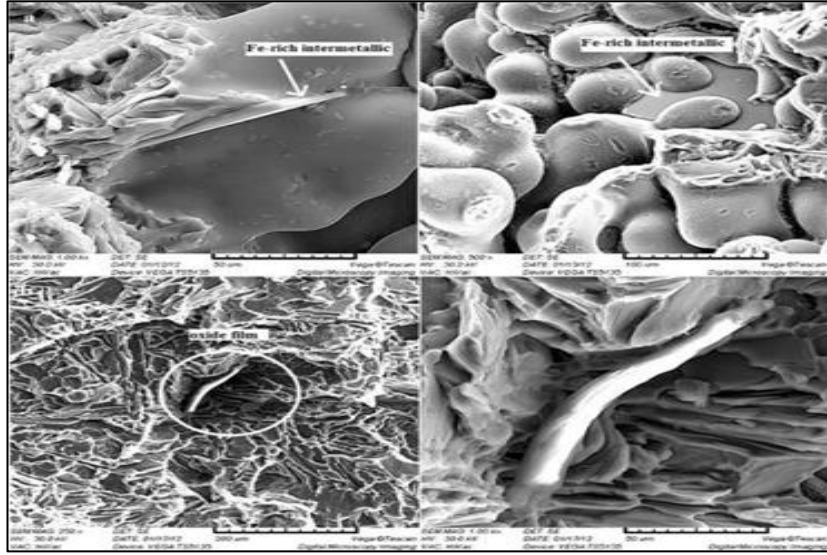
Şekil 2.34. Alüminyum alaşımı için gerilme şekil değiştirme diyagramı [25].

2.8.3. Magnezyum elementlerinin alüminyuma etkisi

Magnezyum (Mg), cüruf oluşumu nedeniyle alüminyum alaşımı dökümünü daha zor hale getirmektedir. Bunu önlemek için malzemeye Berilyum (Be) eklenmektedir. Özel dökümleri yeniden şekillendirirken dikkatli olunmalıdır. Aslında malzeme oksidasyona ve magnezyum kaybına karşı hassastır. Sistemde genellikle oluşan oksitlerin uzaklaştırılması için sağlığa zararlı olan klor ilave edilmektedir. %8 magnezyum içeren alüminyum alaşımları yüksek korozyon direncine ve iyi eloksal (anodize kaplama) özelliklerine sahiptir [21, 22, 23].

Yıldırım ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [24], farklı Mg ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, bu çalışmada A356 alüminyum alaşımına farklı miktarlarda Mg ilavesinin, alaşımın mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada farklı oranlarda Mg ilavesinin etkileri (%0,43, %0,67, %0,86) mikroyapı ve mekanik özelliklere göre A356 alüminyum alaşımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar alaşımların yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Mg miktarı ile çeşitli miktarlarda Mg ilişkilendirilmiş ve ortaya çıkan gözeneklerin oranına bağlı olarak döküm işlemleri SEM

incelemeleri ikincil fazın boyutlarını gözlemlenmiştir. Yaşlanmaya bağlı olarak yapıda oluşan çöktürler (Mg_2Si) değişkenlik göstermekte olup 10 ila 35 μm arasındadır. Metallerarası bileşikler (Mg_2Si , Al_5FeSi , $Al_8Si_6Mg_3Fe$) bileşenleri tespit edilmiştir. Mikroyapıda bulunan ve SEM görüntülerinden gözlemlenen XRD incelemeleri ile belirlenmiştir. Demir alaşımı bakımından zengin olduğu belirlenmiş, mikroyapıda oluşan intermetalik bileşikler Farklı Mg miktarlarına bağlı olarak, ısıtıl işlem öncesi yapılan sertlik ölçümleri ve tüm numuneler için T6 ısıtıl işlem prosesinin takip edilmesi T6 ısıtıl işlem görmüş numunelerin sertlik değerlerinin ısıtıl işlem görmemiş numunelere göre 2,5 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Alaşıma eklenen Mg miktarı arttıkça alaşımın sertliğinde de artış tespit edilmiştir. Mg miktarındaki artışa paralel olarak çekme mukavemeti alaşımın arttığı ve yüzde uzama değerlerinin azaldığı görülmüştür. SEM incelemelerinde kırılma yüzeyinde belirlenerek arasında demir açısından zengin intermetalik bileşiklerin tespit edildiği mikroyapıda oluşan alüminyum dendritler ve oksit filmler malzemenin mukavemetini azaltmıştır. Aşağıda dendrit kolları ile ilgili bileşiğin görüntüleri verilmektedir [26, 39]. Şekil 2.19’da (a) ile oksit filmi (b) arasında oluşan demir açısından zengin intermetalik bileşiğin görüntüleri verilmiştir.



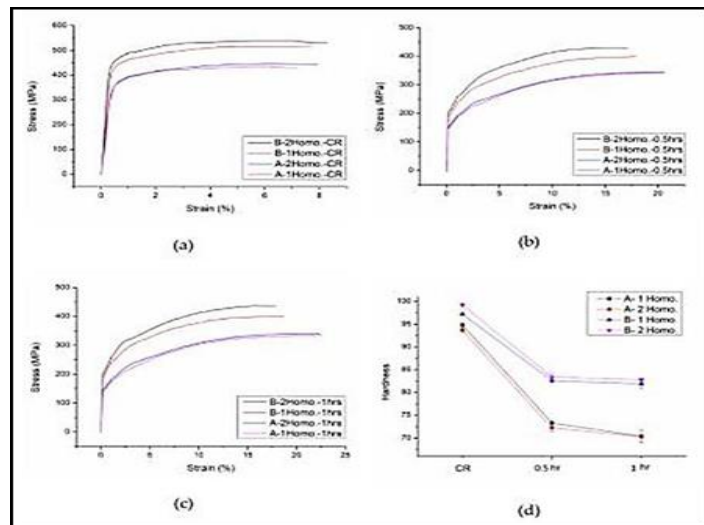
Şekil 2.35. Dendrit kolları [26].

2.8.4. Mangan elementinin alüminyuma etkisi

Mangan (Mn) tane boyutunda azaltıcı rol oynamaktadır. Alaşımın korozyon direncini azaltmadan çekme mukavemetini artırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta füzyon direncini arttırmak için bakır ve silisyum alaşımlarına eklenmektedir. Manganese demirle reaksiyona giremez. Aksi halde oluşan büyük parçacıklar alaşımın mukavemetini azaltacaktır. Mn elementinin ısıtıl işlem etkisi yoktur. Alüminyum- mangan alaşımlarına ısıtıl işlem uygulanmamaktadır. Mn elementi alaşımın erime noktasını arttırdığı gözlemlenmiştir [21, 22, 23].

Chiu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [27], farklı Mn elementi ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında. Mn ilavesinin ve iki aşamalı homojenizasyon ısısının etkisi araştırılmıştır. Alaşımın mikroyapısını gözleyerek Al–7Mg–0.15Ti (B535.0) alaşımı üzerinde işlem ve mekanik özelliklerin test edilmiştir. Al–7Mg–0.15Ti (B535.0) alaşımının sıcak plastik ve soğuk plastik işlenebilirliği iyi olduğu ve başarılı bir şekilde dövme alaşıma dönüştürülmüştür. Al–7Mg–0.15Ti alaşımının homojenizasyon ısı işleminden sonra 0.8Mn ilavesi döküm halindeki dendritik taneler tamamen ortadan kalktığı ayrıca alüminyum matriste Al_4Mn dispersoidleri çökeldiği görülmüştür. Tek aşamalı homojenleştirme ile iki aşamalı homojenizasyon, daha ince ve daha yoğun bir şekilde dağılmış olan çökeltiler olduğu tespit edilmiştir. Al_4Mn dispersoidleri alaşım tane sınırlarının hareketini engellediği ve rafine edildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, iki aşamalı homojenleştirme ve tavlama işleminden sonra, manganez içeren Al–7Mg–0.15Ti alaşımı en ince tanelere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Alaşıma Mn eklenmesi, döküm ve yeniden kristalleştirmenin iyileştirilmesiyle sonuçlanmış, taneler ve alaşımın iletkenliğini azalttığı belirtilmektedir. Ayrıca soğuk haddelenmiş iki aşamalı homojenizasyona tabi tutulan Mn içeren alaşım, en yüksek çekme mukavemeti sahip olduğu görülmüştür. Aşağıda mangan içeren alaşıma ait mekanik özelliklerin sonuçları gösterilmektedir [27, 40, 41].

Şekil 2.20’de (a) soğuk haddelenmeden sonra çekme eğrileri; (b) çekme 400°C’de 0,5 saat tavlama sonrasında eğrileri; (c) 400°C’de 1 saat tavlamanın ardından gerilme eğrileri; (d) sertlik eğrileri verilmiştir.

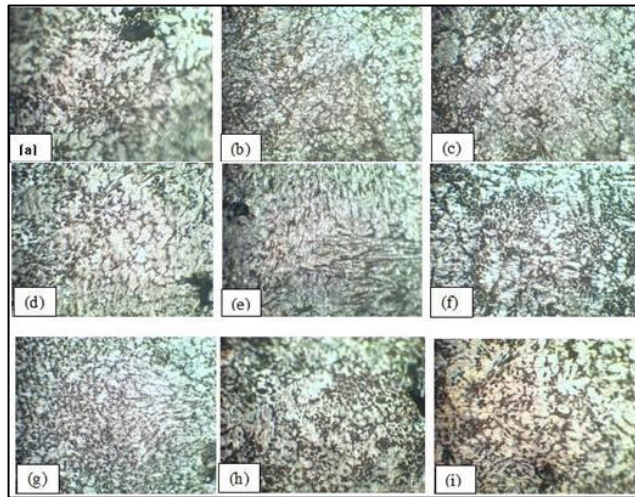


Şekil 2.36. Alaşımı A (0Mn) ve Alaşımı B’nin (0.8Mn) mekanik özellikleri [27].

2.8.5. Çinko elementinin alüminyuma etkisi

Çinko (Zn), bazı alüminyum alaşımlarında istenmeyen bir yabancı madde elementidir. Zn miktarı arttıkça alaşımın akışkanlığı artar ancak yüksek sıcaklık dayanımı azalır. Soğudukça önemli ölçüde çekilmeler ve çekmeler meydana gelir. Başarılı bir sonuç elde etmek için dökümün hızlı bir şekilde soğutulması ve büyük çıkıcılar (şışlar) kullanılması gerekir. Zn elementi ilavesi tüm alüminyum alaşımlarının öğütülebilirliğini artırır. Mg ile birleştiğinde yumuşaklığı artırır, yüksek esneme ve darbe dayanımı sağlar [21, 22, 23].

Agbeleye ve arkadaşlarının [28] farklı Zn ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmada, çinko parçacıklarının takviye edilmesinin veya eklenmesinin alüminyum matris üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Alüminyum numuneler farklı oranlarda (ağırlıkça %0 ila 2) Zn parçacıklarıyla dökülerek güçlendirilmiştir. Kompozitlerin morfolojisi (mikroyapı) ile mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, mikrograflarda koyu fazların açık fazlarla değiştirilmesiyle gösterilen alüminyum matris içindeki çinko parçacıklarının dispersiyonunu ve çözünmesini gösterdiğini tespit etmişlerdir. Mekanik özellikler, ağırlıkça %1 çinko takviyesinde numunenin sertliğinde bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Zn konsantrasyonunun daha da artırılması numunelerin sertliğini arttırdığı ifade edilmektedir. Çekme mukavemeti de Zn ilavesiyle artmış ancak ağırlıkça %0,75 çinko ilavesiyle yaklaşık 97,2 MPa'ya düştüğü belirtilmektedir. Numunelerin sünekliği, darbe enerjisi ve korozyon direnci çinko konsantrasyonunun artmasıyla sonuçlanmıştır. Aşağıda Zn takviyesinin değişen ağırlık yüzdesinde numunelerin optik mikrografları gösterilmektedir [28, 42]. Şekil 2.21'de (a) 0; (b) 0,25; (c) 0,5; (d) 0,75; (e) 1; (f) 1,25; (g) 1,5; (h) 1,75 ve (i) 2x100 değerleri verilmiştir.

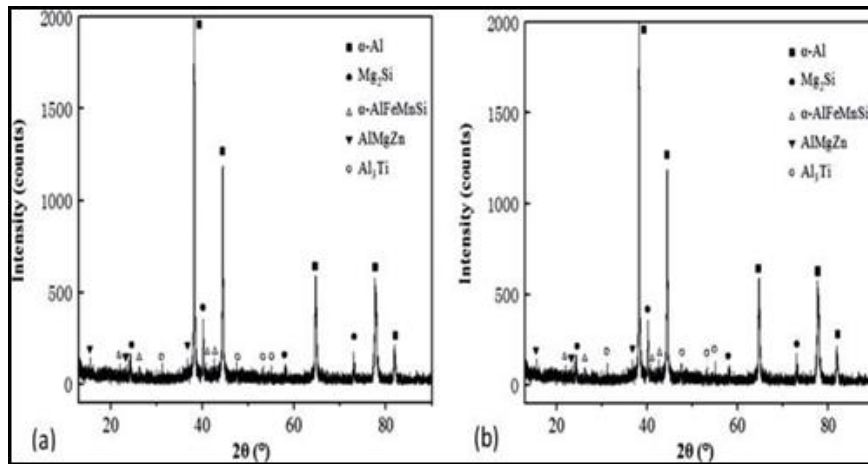


Şekil 2.37. Zn takviyesinin değişen ağırlık yüzdesinde numunelerin optik mikrografları [28].

2.8.6. Titanyum elementinin alüminyuma etkisi

Titanyum (Ti) alüminyum alaşımlarında tane büyüklüğüne etkisi bulunmaktadır. Ekleme düzeyi %0,05 ila 0,250'dir. Basınçlı döküm alaşımlarına titanyum eklemek zararlı olabilmektedir. Ti elementi eklemek akışkanlığı azaltmakta ve dökümü zorlaştırmaktadır. Basınçlı dökümler hızla soğutulduğunda kendiliğinden küçük taneler oluştuğu bilinmektedir. Ti elementi çekme mukavemetini ve sünekliği artırdığı ancak termal iletkenliği azalttığı ifade edilmektedir. Endüstriyel olarak titanyum bor (AlTiB) ile birlikte kullanılmaktadır [21, 22, 23].

Zhang ve arkadaşlarının [29] yaptığı farklı Ti ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili çalışmalarında, Al-11.0Mg-2.6Si-4.0Zn-0.6Mn (ağırlıkça%) alaşımı, otomobil ve otomotiv endüstrilerindeki yapısal parçalar için kullanılabilen yeni geliştirilmiş yüksek mukavemetli bir basınçlı döküm alaşımı olduğunu ifade etmektedirler. Çalışmada, farklı miktarlarda Ti'nin dökme Al-11.0Mg-2.6Si-4.0Zn-0.6Mn alaşımının (ağırlıkça %) ve T6'nın mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin gelişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ti ilavesi, Al_3Ti intermetalik fazın oluşumuna yol açar ve titanyum içeriğinin artmasıyla hacim oranı ve oluşum sıcaklığının arttığı gözlenmiştir. Alaşımın sahip olduğu en iyi mekanik özellikler, ağırlıkça %0,1 Ti eklenerek elde etmişlerdir. Isıl işlem sonrasında akma mukavemeti (YS), çekme mukavemeti (UTS) ve uzama sırasıyla 350 MPa, 440 MPa ve %3,29'a ulaştığı belirtilmektedir. Sonuç olarak Ti içeriğinin %0,10'dan az olması gerektiğini ifade edilmektedir. Aşağıda Ti eklenen Al-Mg-Zn-Si basınçlı döküm alaşımının XRD spektrumları gösterilmektedir [29, 43]. Şekil 2.22'de (a) ağırlıkça %0,10; (b) ağırlıkça %0,20 değerleri verilmiştir.

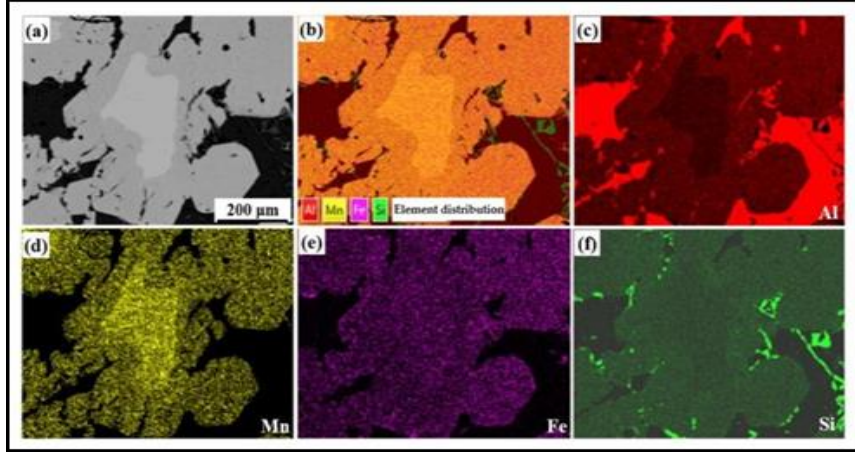


Şekil 2.38. Ti eklenen Al-Mg-Zn-Si basınçlı döküm alaşımının XRD spektrumları [29].

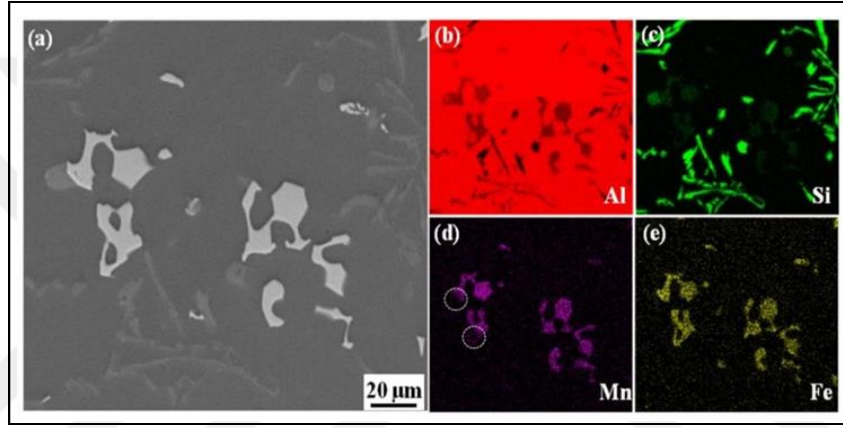
2.8.7. Demir elementinin alüminyuma etkisi

Demir (Fe) elementi Al-Fe alaşımları olarak yaygın kullanılmaz. Fe, alüminyum alaşımlarındaki bir safsızlıktır ve içeriği değişiklik gösterir. Bazı uygulamalarda demir, yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve sertliğin artırılması da dahil olmak üzere alaşım özelliklerini iyileştirebilir. Ayrıca sürekli döküm kalıbının sıcak çatlamaya karşı direncini artırır. Yoksunluk semptomlarını azaltmak için bazen demir eklenir. Demirin bir diğer özelliği de tane boyutunu küçültme yeteneğidir. Bununla birlikte, yüksek silisyumlu alaşımların yüksek demir içeriği kaba tanelere ve kırılğan yapılara neden olur [21, 22, 23].

Song ve arkadaşları [30] tarafından farklı Fe ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarında, başlangıçtaki Fe içeriğinin demir giderme verimliliği, Fe açısından zengin faz morfolojisinin gelişimi ve eriyik tutma sırasında geri dönüştürülmüş Al-7Si-xFe-1.2xMn alaışımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, bir optik mikroskop ve bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiştir. SEM ve çekme testlerinin sonuçları, başlangıçtaki Fe içeriğinin artmasıyla alaşımların artık Fe konsantrasyonunun kademeli olarak arttığını ve buna karşılık gelen Fe giderme verimliliğinin kademeli olarak %77.67'ye yükseldiğini gösterdiğini ifade etmektedirler. Başlangıçtaki Fe içeriğinin artmasıyla alaşımdaki Fe açısından zengin faz türü değişti tek tip -Fe'den karışık tip -Fe ve -Fe'ye olacak şekilde başlangıçtaki Fe içeriğinin artmasıyla Fe açısından zengin fazın morfolojisi cüruf çokgen bir şekilden iki katmanlı düzensiz bir şekle dönüştü yaptığı belirtilmektedir. Yüksek Mn içeriğine sahip iç tabakanın oluşması ve artması alaşımdaki Fe içeriğinin artmasının ana nedeni düzensiz şekilli fazların olduğu ifade edilmektedir. Başlangıçtaki Fe içeriğinin artmasıyla birlikte alaşımların esnekliğinin de açıkça arttığı, ancak daha yüksek Fe içeriğinde plaka benzeri morfolojiye sahip β -Al₅FeSi oluşumu alaşım plastisitenin daha da geliştirilmesini engelleyebileceği sonucuna varmışlardır. Aşağıda cüruftaki tipik Fe açısından zengin fazın element haritalaması ve tipik morfolojiye sahip Fe açısından zengin fazın SEM görüntüsü ve bileşim dağılımı gösterilmektedir [30, 44]. Şekil 2.23'de SEM görüntüsü; (b) kapsamlı dağılım; (c) Al; (d) Mn; (e) Fe; (f)Si görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.24'de ise SEM; (b) Al; (c) Si; (d) Mn; (e) Fe görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.39. Cüruftaki tipik Fe açısından zengin fazın element haritalaması [30].



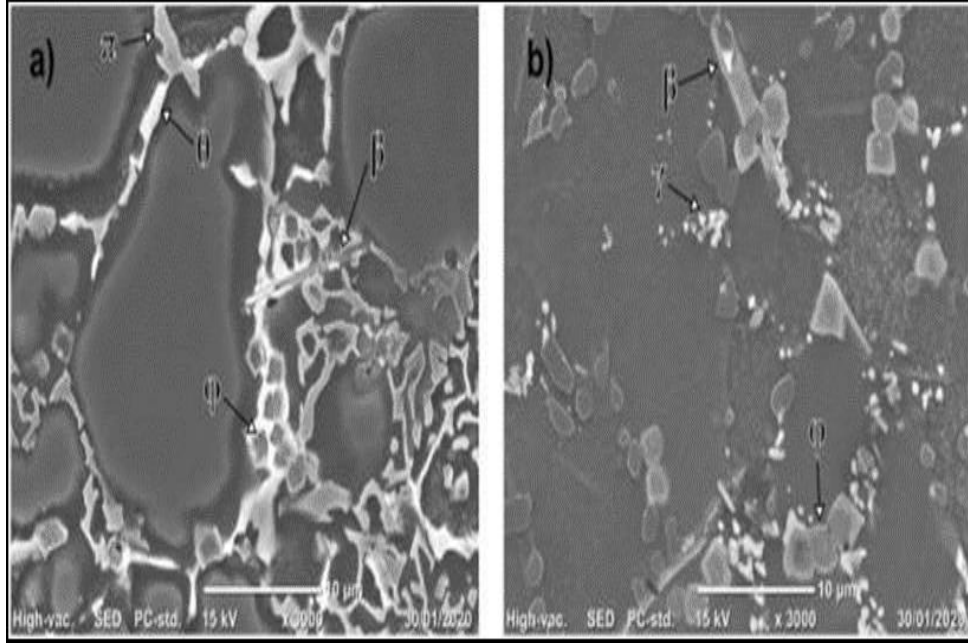
Şekil 2.40. Tipik morfolojiye sahip Fe açısından zengin fazın SEM görüntüsü ve dağılımı [30].

2.8.8. Ni elementinin alüminyuma etkisi

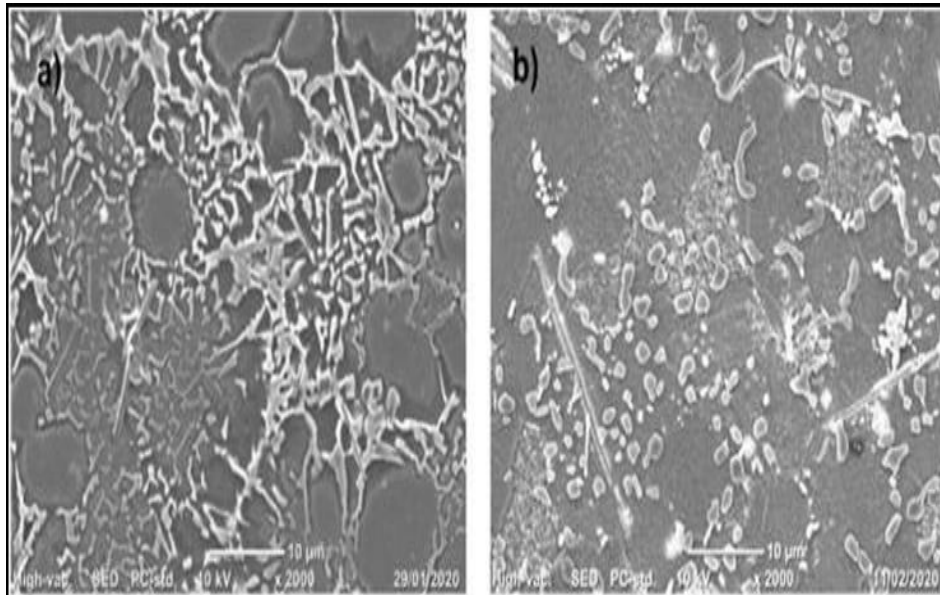
Nikel (Ni), alüminyum alaşımına az miktarda eklendiğinde tıpkı bakır gibi mukavemeti ve sertliği artırır. Alaşıma Ni ilavesi parlaklık ve yüzey kalitesini artırır. HSR içeriğinin olumsuz etkilerini dengeleyin. Genellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren alaşımlara eklenir. Alaşımın nikel içeriği %0,5 ila %3,0 arasında değişir [21, 22, 23].

Demirtaş ve arkadaşları [31] tarafından farklı Ni ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda HPDC döküm A384 alüminyum alaşımının eritme ve ısıtım işlem koşullarında Ni içeriği ile özellikleri arasındaki ilişkiyi anlamak için araştırma yapmıştır. Alaşımın Ni içeriğine bağlı olarak Ni içeren farklı metallerarası elementler oluşmuştur. Bir dizi deneyden sonra, optimum mekanik özellikleri elde etmek için uygun ısıtım işlem koşulları seçilmiştir. Ni içeren intermetalik bileşiklerin çoğunun çözelti sıcaklıklarında stabil olduğu gösterilmiştir; bu durum, doğal ve yapay yaşlandırma sonrasında alaşımların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmektedir. Sonuçlar, ısıtım işlem

sonrasında daha düşük Ni ilavesinin daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmada daha faydalı olduğunu göstermiştir. Aşağıda Nikel elementinin 0.2Ni, 0.5Ni ve 0.9Ni SEM mikrografları gösterilmektedir [31, 45]. Şekil 2.25’de (a) dökülmüş olarak ve (b) solüsyonla işlenmiş (510°C-30 dakika) numuneye eklenmiştir. Şekil 2.26’da (a) döküm halindeki ve (b) çözeltiyle işlenmiş (510°C-30 dakika) numuneye eklenmiştir.

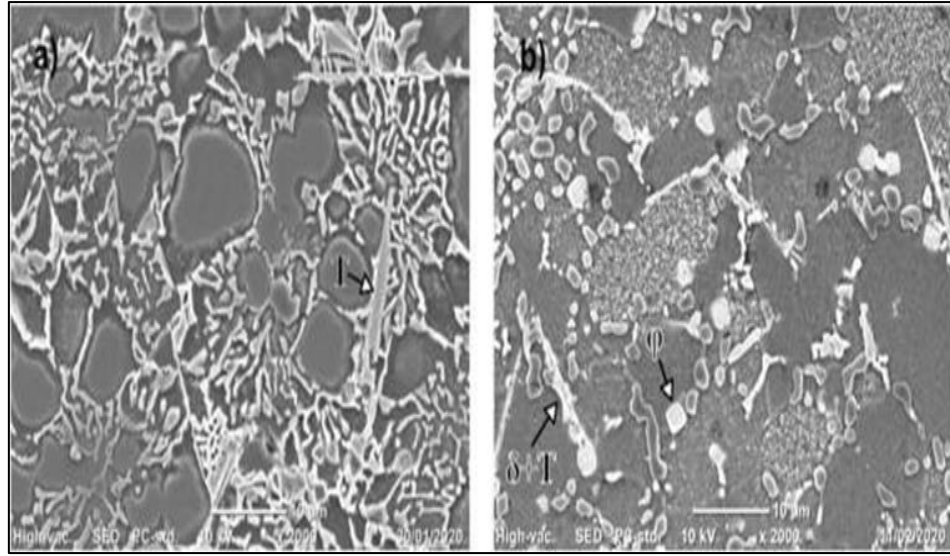


Şekil 2.41. 0.2Ni’nin SEM mikrografları [31].



Şekil 2.42. 0.5Ni ilaveli numunenin SEM mikrografları [31].

Şekil 2.27’de (a) döküm halindeki ve (b) çözeltiyle işlenmiş (510°C-30 dakika) numuneye eklenmiştir.



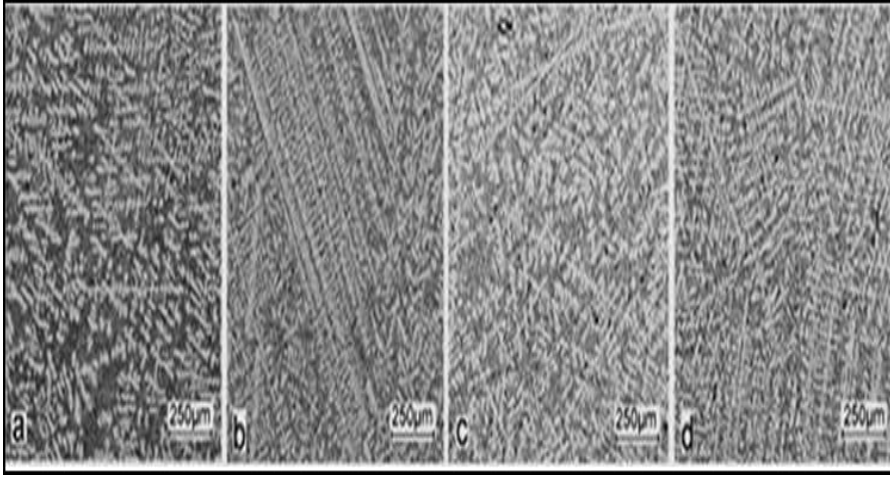
Şekil 2.43. 0,9Ni ilaveli numunenin SEM mikrografları [31].

2.8.9. Kalay elementinin alüminyuma etkisi

Kalay (Sn), alüminyum alaşımlarında, düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı direnci azaltır. Cu ve Ni ile birleştiğinde çok güçlü bir alaşım oluşturur. Bir alaşımda %0,5 ile %1,0 arasında mevcut olduğunda kırılabilirliği artırır ve alüminyuma göre daha katodik olduğundan korozyon direncini olumsuz etkiler. Sn elementinin alüminyumdaki çözünürlüğü çok düşüktür. Sn, rulman olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının en önemli bileşenlerinden biridir. Sn, basınçlı döküm alaşımlarında çok nadir bulunur [21, 22, 23].

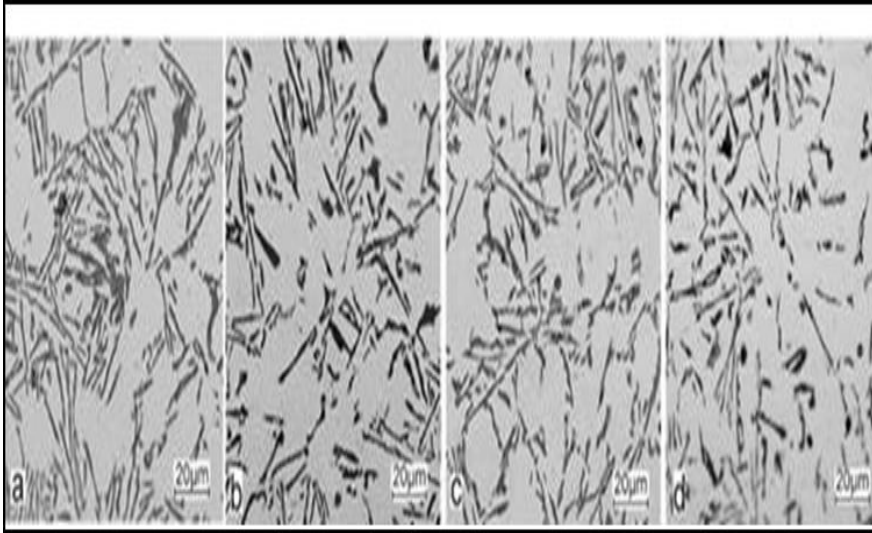
Kozana ve arkadaşları [32] tarafından farklı Sn ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, alaşım katkı maddesi olarak Sn içeren yarı-ötektik Al-Si alaşımları üzerine yapılan çalışmaların sonuçları sunulmaktadır. Sn elementi çoğu Al-Si alaşımında bir safsızlık olarak kabul edilir; bu nedenle miktarı ağırlıkça %0,3 ile sınırlıdır. Sn elementinin alüminyum alaşımlarındaki davranışı üzerine bu elementin belirli özellikler üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çalışmada ağırlıkça %1,7'ye kadar Sn içeriğinin AlSi10 alaşımı üzerindeki etkisi olduğu belirlenmiştir. Termal analizler ile erimiş ve ısıtılmış alaşımın mekanik özelliklerinin ölçümleri, metalografik gözlemler (optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu) ve EDS analizleri yoluyla kalay etkisini tam olarak tanımlanabileceğinin mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Termal analiz sonuçları, alaşımın katılaşma başlangıç noktası ve ötektik katılaşma noktasındaki azalmaya bağlı olarak α -Al çözeltisinin kristalleşme bölgesinde ve $\alpha+\beta$ ötektikte değişiklikler olduğunu gösterdiği belirtilmektedir. Sonuç olarak, AlSi10Sn1.7 alaşımının uzaması, %8,1 A5 değeri ve 200 MPa'nın üzerinde çekme mukavemeti ile iki kattan fazla yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Aşağıda Sn katkılı AlSi10 alaşımının mikroyapısı mag.50x ve mag.500x olarak gösterilmektedir [32, 46]. Şekil 2.28'de

AlSi10; (b) AlSi10Sn0.2; (c) AlSi10Sn0.4; (d) AlSi10Sn0.7 değerleri verilmiştir.



Şekil 2.44. Sn katkılı AlSi10 alaşımının mikroyapısı-mag.50x. [32].

Şekil 2.29’da (a) AlSi10; (b) AlSi10Sn0.2; (c) AlSi10Sn0.4; (d) AlSi10Sn0.7 değerleri verilmiştir.



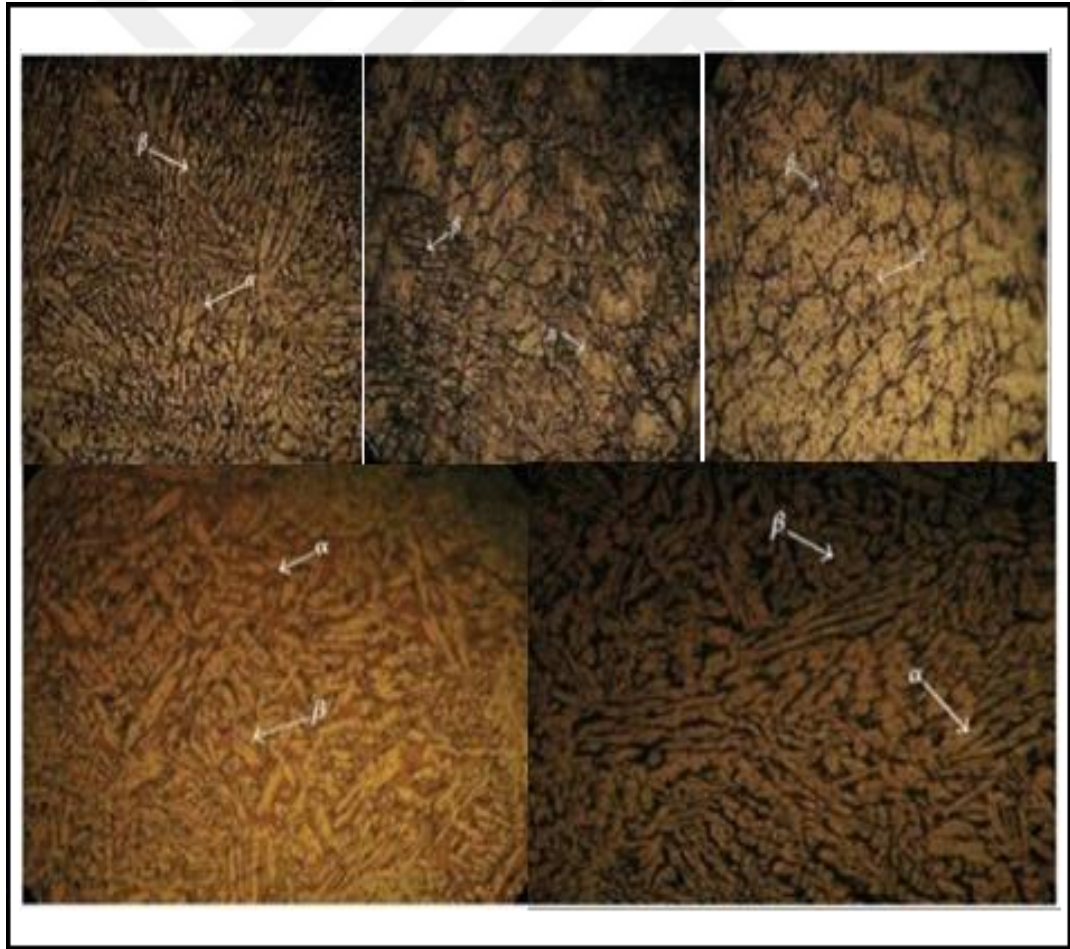
Şekil 2.45. Sn katkılı AlSi10 alaşımının mikroyapısı —mag. 500x. [32].

2.8.10. Kurşun elementinin alüminyuma etkisi

Kurşun (Pb), özellikle Sn ve Bi ile birlikte kullanıldığında alaşımın işlenebilirliğini artırır. Eklenen miktar %0,5’ten azdır. Alüminyuma göre daha katodik olduğundan alaşımlarının korozyon direncini azaltır. Alüminyumdaki çözünürlüğü önemli ölçüde azaltır [21, 22, 23].

Egole ve arkadaşları [33] tarafından farklı Pb ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek alüminyum ilavesinin ve kurşun içeren pirincin tanecik incelmesinin etkisi araştırılmış ve analiz, fiziksel özelliklerin

değerlendirilmesini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önceki deneylerle tutarlı olarak mekanik özelliklerin doğrudan mikroyapıya bağlı olduğunu göstermektedir. Al'ın alaşımlara başlangıçta eklenmesi sertlikte önemli bir artışa neden olmaz, ancak Al içeriğinin daha da arttırılması ve aşılایıcıların eklenmesi sertlikte önemli bir değişikliğe neden olduğunu ifade etmektedirler. Aynı değişim basınç ve çekme mukavemetinde de gözlemlemişlerdir. Fiziksel özelliklerle ilgili olarak, özellikle tane inceltme işleminden sonra modifikasyon sıralarında çok az fark olduğunu belirtmişlerdir. Tane inceltmesinden sonra bile elektrik iletkenliği azalmaya devam ettiğini, Ti ilavesinden sonra termal iletkenliğin de azaldığı ve ardından önemli ölçüde tekrar arttığı ifade edilmiştir. Al'ın varlığı, mikroyapının karanlık bölgelerinde gözlenen β fazının oluşumunu desteklerken Ti, eş eksenli tane oluşumunu da desteklediği belirtilmektedir. Şekil 2.46'da kontrol alaşımının mikrografi görüntüsü verilmiştir [33, 47].

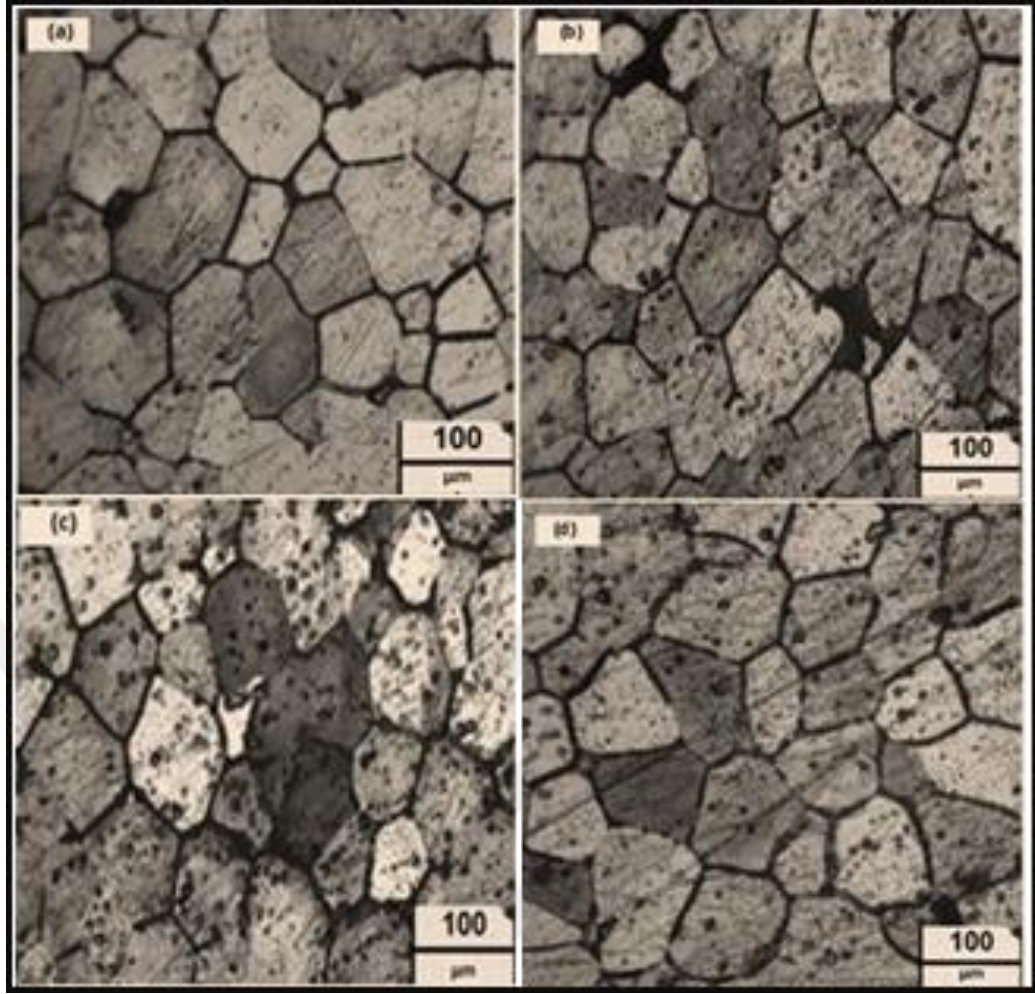


Şekil 2.47. Kontrol alaşımının mikrografi görüntüsü [33]. (a) An; (b) A1; (c) A3; (d) A4; (e) A5.

2.8.11. Krom elementinin alüminyuma etkisi

Krom (Cr), genellikle %0,10 ila %0,60 oranında eklenir. Parçacıkların azaltılmasında rol oynar. Titanyum ile birlikte kullanılır. Korozyon direncini arttırmak ve stres çatlamasını azaltmak için Al-Zn-Mg alaşımlarına eklenir. Cr elementi alüminyumdaki çözünürlüğü çok düşüktür. Burada ikinci faz yağı gözlenmedi. Bu nedenle Al-Cr alaşımına ısıtılma işlemi uygulanamaz. Yapısında oluşan Cr-Al bileşikler malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırır ve korozyona karşı direnç gösterir. Mg gibi Cr elementinde alaşımın erime sıcaklığını artırır [21, 22, 23].

Ahoraia ve arkadaşlarının [34] tarafından farklı Cr ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmada, Zr, Ti ve Cr'nin birlikte eklenmesinin ticari saf alüminyum taneciklerinin (%99,7 Al) rafine edilmesi üzerindeki etkisi, optik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağıtıcı X-ışını kırınımı spektroskopisi ile incelenmiştir. Al'a ağırlıkça %0,15 Zr ve ağırlıkça %0,025 Ti'nin ortak ilavesinin ortalama 102 µm tane boyutunda önemli bir incelmeye yol açabileceği bulunmuştur. %0,1 Zr varlığında optimum Ti ilavesi miktarının ağırlıkça %0,025 olduğu ve Ti içeriğinde ağırlıkça %0,025'in üzerindeki herhangi bir artış, kaba bir tane boyutuyla sonuçlanmıştır. Al'a ağırlıkça %0,15 Zr, ağırlıkça %0,025 Ti ve ağırlıkça %0,15 Cr'nin ortak ilavesi daha iyi tane incelmeleri elde edilmiş ve ortalama tane boyutu 75 µm olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %0,1 Zr ve çeşitli Ti veya Cr ilavelerinin ortak ilavesinden kaynaklanan tane inceltme performansı, tek başına zirkonyuma göre daha üstün olduğu belirtilmiştir. Zr ve Ti'nin eşzamanlı eklenmesiyle rafine alüminyumun merkezlerinde veya yakınında gözlemlenen çökelmiş fazların EDS ve SEM analizi, bunun Al olduğunu ortaya çıkardığı ifade edilmiştir. Bu $Al_3(Zr_{1-x}Ti_x)$ parçacıkları, katılaşma sırasında α -Al için heterojen çekirdeklenme bölgeleri görevi görür ve daha iyi tane incelmeleriyle sonuçlandığı belirtilmiştir. Aşağıda farklı ekleme seviyeleri optik mikrografları gösterilmektedir [34-48]. Şekil 2.31'de (a) 0.05; (b) 0.1; (c) 0.15; (d) 0.2 değerleri verilmiştir.



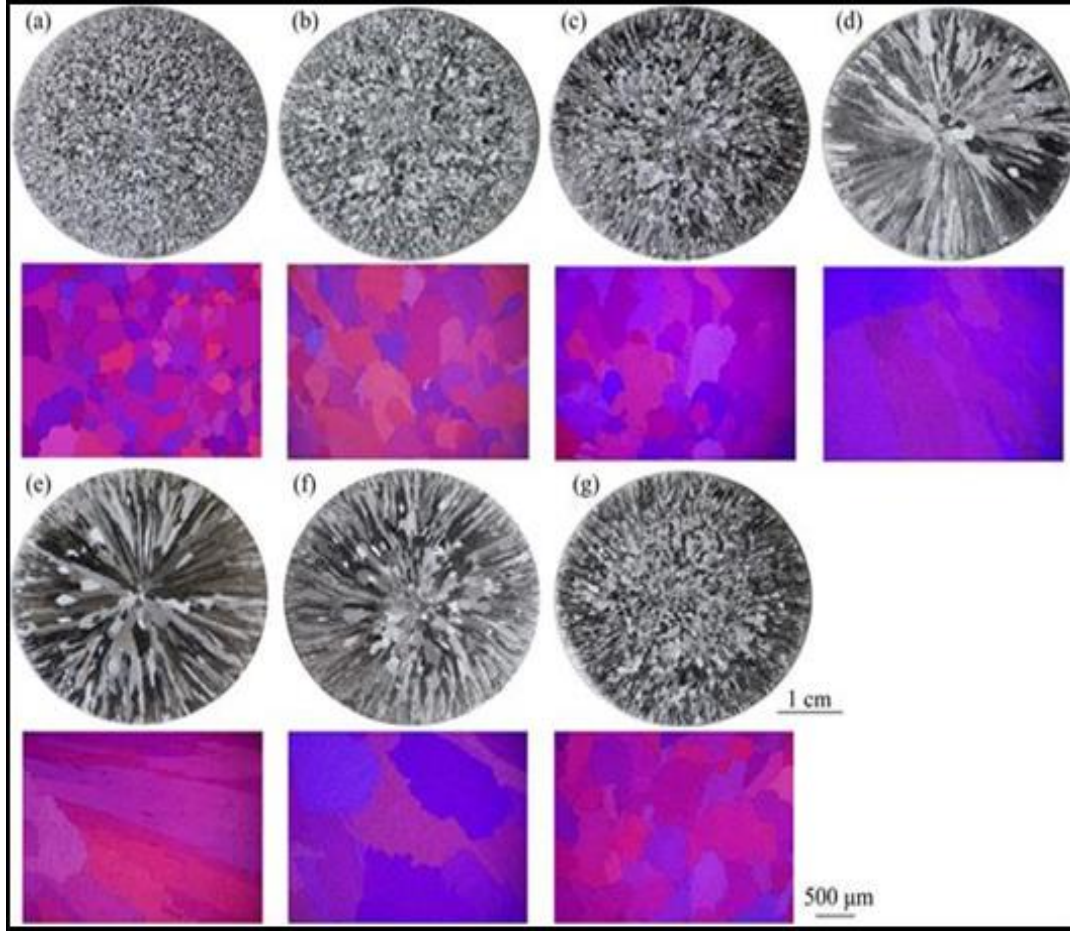
Şekil 2.48. Ağırlıkça (0.15wt.% Zr), (0.025wt.%Ti) ve (Cr) farklı ekleme seviyeleri optik mikrografları [34].

2.8.12. Bor elementlerinin alüminyuma etkisi

Bor (B), genel dozajı %0,01'dir. Titanyumla birlikte iyi bir tane azaltıcıdır. Bor kullanılmazsa yeniden eritme sırasında titanyumun tane azaltıcı etkisi azalır. Titanyum gibi bor da çekme mukavemetini ve sünekliği artırır [21, 22, 23].

Xiao ve arkadaşları [35] tarafından farklı B ilavelerinin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yapılan çalışmada bor içeriğinin ticari olarak saf alüminyumun Al-5Ti-1B ile tane incelmesi üzerindeki etkisi niceliksel olarak değerlendirilmiştir. Bor içeriği ağırlıkça %0,03'ten az olduğunda, bor içeriği arttıkça Al-5Ti-1B'nin rafinasyon performansı kademeli olarak zayıfladığı ifade edilmektedir. Bu durum, borun TiB_2 üzerindeki Al_3Ti ara katmanı ile reaksiyonuna ve çözünen Ti tüketimine atfedilmektedir. Aksine, bor içeriği ağırlıkça %0,03'ü aştığında, Al-5Ti-1B'nin rafinasyon performansı artan bor içeriğiyle birlikte kademeli olarak iyileştiğini; bu, ilave çekirdek substratları sağlayan birincil AlB_2 parçacıklarının oluşumuyla ilişkili

olduğu belirtilmektedir. Aşağıdaki şekilde makrografları ve mikrografları gösterilmektedir [35, 49]. Şekil 2.32’de (a) 0% B; (b) 0.005% B; (c) 0.01% B; (d) 0.02% B; (e) 0.03% B; (f) 0.05% B; (g) 0.1% B gösterimleri yapılmıştır.



Şekil 2.49. B içeriğinin Al-5Ti-1B’nin tane inceltme verimliliği üzerindeki etkisini gösteren CP-Al külçelerinin makrografları ve mikrografları [35].

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Ocak 2015'te Avrupa Komisyonu, Avrupa Metalurji Yol Haritası 2050'yi yayınlamıştır. Uzun vadeli hedefi, dayanıklılık, şekillendirilebilirliğe öncelik vererek yüksek mukavemetli, yüksek süneklik, korozyona ve aşınmaya dayanıklı metaller ve metal matrisli kompozitler geliştirmektir. Korozyon 2XXX, 5XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının miktarını arttırır ve ısıya dayanıklı alüminyum alaşımlarının kullanımını genişletir. Ayrıca yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, ABD Gelişmiş Üretim Ortaklığı Programının (AMP) önemli geliştirme projeleri listesine dahil edilmiştir. Amerikan Alüminyum Endüstrisi Birliği de 2020 alüminyum sektörü yol haritasını açıklamıştır. Hedef, alüminyum üretim maliyetlerini %25 azaltmak, enerji tüketimini %25 azaltmak ve zararlı emisyonları olmayan yeni nesil alüminyum alaşımlı malzemeler geliştirmektir. Amerikan Otomotiv Malzemeleri Konseyi de alüminyum alaşım endüstrisi için bir yol haritası geliştirdi. Plana göre, alüminyum alaşımlarının “otomotiv endüstrisinde” uygulanmasını genişletmek için alüminyum alaşımlarının korozyonu, tasarımı, hazırlanması, işlenmesi, mikroyapı kontrolü ve malzeme kombinasyonu kapsamlı bir şekilde incelenecektir [50].

Alüminyum, bol kaynakları, hafifliği, iyi mekanik özellikleri, iyi korozyon direnci ve mükemmel elektrik iletkenliği nedeniyle en popüler demir dışı metal haline gelmiştir. Ambalajlama, inşaat ve taşımacılık, elektrik malzemeleri ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tane yapısının boyutunu değiştirmek için çeşitli teknikler kullanılarak tane incelmesinin sağlanması, metal malzemelerin mukavemetini ve plastisitesini aynı anda geliştirmek için tercih edilen yöntemdir. Bu nedenle alüminyum tanecik inceltme, alüminyum işleme endüstrisinde önemli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Bugüne kadar alüminyumun tane boyutunu inceltmek için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Tüm teknolojiler aşağıdaki dört kategoriye ayrılabilir: katılaşma sırasında titreşim ve karıştırma yoluyla tane inceltme, hızlı katılaştırma, tane incelticilerin eklenmesi ve şiddetli plastik deformasyondur. Her tekniğin avantajları, dezavantajları ve uygulanabilirlik koşulları vardır ve bu tekniklerin mekanizmalarının anlaşılması tartışmalıdır [50, 51].

3.1. Tane İnceltici Miktarları

Alüminyum alaşımlarının daha iyi mekanik özelliklerine olan talebin artmasıyla birlikte, son yıllarda alüminyum alaşımlarının daha yüksek mukavemet ve sünekliğini elde etmek için çeşitli teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır; tane temizleme ve rafinasyon olağanüstü etkileri nedeniyle iki önemli konudur. Alüminyum ürünlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için tasarlanmıştır. Döküm sırasındaki temizlemeye benzer şekilde tane incelmesi, katılaşma sırasında ve sonrasında ürünün mekanik özellikleri açısından kritik öneme sahiptir. Tane inceltme, metalik malzemelerin mukavemetini ve sünekliğini aynı anda arttırmak için tercih edilen yöntem haline geliyor. Genel olarak alüminyum alaşımları, uygun tane incelticiler kullanılarak tamamen eş eksenli fakat ince taneli bir yapıya katılaştırılabilir. Alüminyum ve alaşımları hafiflik, iyi mekanik özellikler, iyi korozyon direnci ve mükemmel elektrik iletkenliği gibi avantajlara sahiptir. Ambalajlama, nakliye, elektrik malzemeleri ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [50, 51].

Tane incelticilerin eklenmesiyle elde edilen tane inceltme, yalnızca alaşım dökümlerinde ayrışmayı ve sıcak çatlamayı azaltmak için değil, aynı zamanda alaşım dökümlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için de büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, eş eksenli ince taneli yapı her zaman alüminyum alaşımlı döküm endüstrisinin takip ettiği hedeflerden biri olmuştur. Alüminyum alaşımlarında en yaygın kullanılan tane incelticiler Al-Ti-B ve Al-Ti ana alaşımlarıdır. Al-Ti ve Al-Ti-B tane inceltici alaşımlarda titanyum ve bor alüminyumun tane inceltici etkileri pul tuzlardan daha etkilidir. Tane incelticisinin performansı ve alüminyum alaşımının tane incelmeye tepkisi, imalatında ve alüminyum alaşımında yer alan proses parametreleri tarafından belirlenen tane incelticisinin mikroyapısından etkilenmektedir. Alaşım elementlerinin varlığı kontrol edilir. Tane inceltme, dökme alüminyum ve dövme alaşımların özelliklerinin ve karakteristiklerinin geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Al-Ti ve Al-Ti-B ana alaşımları genellikle katılaşma ürününün parçacık boyutunu iyileştirmek için alüminyum alaşımlarına eklenmektedir. Tane inceltme mekanizması bilimsel literatürde oldukça tartışmalıdır. Çekirdeklenme etkisi, çekirdeklenmeyi sağlayan parçacıklar ve özellikler yoğun bir çalışmanın konusudur. Son yıllarda çözünen etkisi yani çözünmüş titanyumun tane incelmeye etkisi, tane inceltme araştırmalarının ön plana çıktığı bir konudur. Tane inceltme için en iyi uygulamalar;

- Al-Si Alaşımları: A356 ve A357 gibi, Al-5Ti-1B veya Al-3Ti-1B çubuk formunda 10-20 ppm bor ilavesiyle en iyi sonuçlar elde edilir.
- Al-Cu Alaşımları: Al-%4,5Cu-%0,5Mn alaşımları için en iyi sonuçlar en iyi tane inceltme uygulamalarıdır.
- Al-Cu Alaşımları: Al-%4,5Cu-%0,5Mn alaşımları için en iyi sonuçlar, titanyumun %0,05'ten az olması ve Al-5Ti-1B veya Al-3Ti-B çubuk olarak 10-20ppm bor eklenmesidir.
- Al-Si-Cu Alaşımları: A319 alaşımları gibi (Al-3%Cu-5.5%Si) en iyi 10-20 ppm Al-5Ti-1B veya Al-3Ti-1B çubuk formunda bordur.
- Al-Zn-Mg Alaşımları: Bu alaşımlar için en iyi sonuçlar %0,02 ila 0,05 titanyum ve Al-5Ti-1B veya Al-3Ti-1B çubuk olarak 10-20ppm bor ilavesiyle elde edilmektedir.
- Al-Mg Alaşımları: 535 alaşımları gibi (Al-7%Mg) en iyi sonuç, Al-3%Ti-1%B ana alaşım formunda 30ppm B eklenmesiyle elde edilmiştir [50, 51, 52].

3.2. Tane İnceltme Prosesi

Tane inceltme, mikroyapıyı metodik olarak ayarlayarak mekanik özellikler, şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik gibi önemli özellikleri geliştiren temel bir işlemdir. Aşılama, ince bir eş eksenli tane yapısı elde etmek için alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan kimyasal bir yöntemin bir örneğidir. Döküm, parça yapmanın en eski yöntemlerinden biridir. Döküm, erimiş metalin, metalin katılaştığı ve metal boşluğun şeklini oluşturduğu bir kalıp boşluğuna dökülmesini içerir. Herhangi bir erimiş metalin katılaşması çekirdeklenmeyi ve büyümeyi içermektedir. Çekirdeklenme, bir metalin erimiş metalde çekirdek adı verilen küçük katı parçacıklar halinde faz değişimine uğraması sonucu meydana gelmektedir. Bu çekirdekler atomların bir araya gelerek kristal formlara dönüşmesiyle oluşur ve bu kristallerden tamamen katılaşmış taneler oluşmaktadır. Tane inceltme, tane boyutunu küçülterek malzemelerin mekanik özelliklerini geliştiren bir tekniktir. Metal alaşımlarının mikroyapısal olarak arıtılması metalurji alanında birçok çalışmaya konu olmaktadır. Aslında alaşımların birçok mekanik özelliği, şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği büyük ölçüde mikroyapıdaki tanelerin boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Alüminyum alaşımlarının ve alaşımlarının tane inceltme işlemi, özellikle alüminyum

endüstrisinde, alaşımlı basınçlı döküm ve çeşitli işleme kalitelerindeki külçe dökümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının tane incelmesi, heterojen tanelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi yoluyla gerçekleşir. Tane inceltmede çekirdeklenme etkileri ve önemlidir, ancak çözünen etkiler inceltmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Titanyumun ayrışma gücü o kadar yüksektir ki çekirdek-sıvı arayüzünde ayrışır, bu da diğer çekirdek parçacıklarının çekirdeklenmek üzere etkinleştirildiği aşırı soğutulmuş bir yapıyla sonuçlanır. Tüm çekirdeklenme etkileri arasında, iki fazlı bir çekirdeklenme teorisi vardır. Borür parçacıkları üzerinde oluşan $TiAl_3$ katmanı, aktivasyon ve çekirdeklenme için çözülmüş Ti gerekli olduğundan kritik olmayabilir [51, 52, 53].

3.3. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme Yöntemleri

Alüminyum alaşımının döküm işleminde döküm kusurlarını azalttığı ve döküm özelliklerini iyileştirdiği için tane inceltme gereklidir. Alüminyum alaşımına tane inceltici eklenmesi, alüminyum alaşım dökümünde tane inceltme elde etmek için yaygın bir endüstriyel uygulama haline gelmiştir. Alüminyum alaşımının tane boyutu, α -Al'in çekirdeklenmesi ve büyümesinden oluşan katılaşma sürecine bağlıdır. Çekirdeklenme aşamasında, α -Al'in muazzam heterojen çekirdeklenme bölgeleri, tane inceltici ilavesiyle alüminyum alaşımı eriyiğine dahil edilmektedir. Heterojen çekirdeklenme aynı zamanda yapısal aşırı soğumayı tetikleyebilen çözelti elemanları tarafından da hızlandırılabilir. α -Al tanesinin büyümesinde, çözelti elemanları taneler arasında toplanabilir ve daha sonra tanenin büyümesini kısıtlayabilmektedir. Bu nedenle, yüksek çekirdeklenme oranı ve tane büyümesinin kısıtlanması nedeniyle tane boyutu incelenmektedir. Karbür-borür teorisi, peritektik teori, çift yönlü çekirdeklenme mekanizması ve çözünen madde teorisi, tane inceltici tarafından tane inceltme mekanizmasını göstermek için ileri sürülmektedir. Alüminyumda gerekli olan ince eş eksenli tanecikleri elde etmenin birkaç yolu bulunmaktadır [51, 52, 53].

Bunlar ısıtıl işlem sürecinde erimiş alüminyumun soğuma hızı kontrol edilmesidir. Katılaşma prosesi değiştirilirken hızlı soğuma hızının artırılmasıyla istenilen ince eş eksenli mikroyapı elde edilebilir. Erimiş alüminyumun katılaşma aşamasında karıştırıldığı mekanik yöntemler de kullanılabilir. Alüminyum yarı katı haldeyken içerisine elektromanyetik, ultrasonik ve mekanik karıştırıcıların kullanıldığı özel cihazlar yerleştirilir. Üçüncü bir tane inceltme yöntemi, kimyasal bir işlemde bir ana

alaşımın boyut inceltici olarak kullanılmasını içermektedir. Aşılama kimyasal tane inceltme için yaygın bir yöntem olduğundan, ana alaşım çekirdeklenmeyi desteklemektedir. Alüminyuma eklenen en yaygın ana alaşım, titanyum ve borun bir karışımıdır, ancak titanyumun kendisi de eklenebilmektedir. Her türlü alüminyum alaşımı, kimyasal tane boyutundaki incelticilere iyi yanıt vermektedir. Kimyasal yöntemler kullanıldığında, istenen etkiyi elde etmek için ana alaşımın miktarı, şekli, boyutu ve miktarı kontrol edilmelidir. Dökümlerde alüminyum kullanmanın ve taneyi rafine etmenin kimyasal yollarını bulmanın birçok avantajı vardır. Bu işlem size gelişmiş işlenebilirliğe ve diğer özelliklere sahip alüminyum malzemeler sağlamaktadır. Döküm işlemi sırasında alüminyumun mekanik özelliklerinde meydana gelen gelişmeler, birçok farklı endüstriye büyük faydalar sağlayabilir. Diğer önemli alaşım elementlerinin eklenmesi, katılaştığında çeşitli bileşen ve sistemlerde kullanılabilen yüksek kaliteli bir metalle sonuçlanmaktadır. Eritme işleminde kullanılan tane inceltme yöntemleri kabaca aşağıdaki üç kategoriye ayrılır [52, 53, 54].

3.3.1. Termal yöntem

Soğutma hızlarını kontrol etmeye yönelik termal yöntemler, hızlı soğutmayı ve ardından süreç değişkenlerinin değiştirilmesini içerir. Dökümler soğuk kalıplarda ve düşük aşırı ısınma koşulları altında döküldüğünde ince eş eksenli yapıların meydana geldiği bilinmektedir [15, 55].

3.3.2. Kimyasal yöntem

Bir boyut inceltici eklendiğinde, taneler, çekirdeklenmeyi teşvik eden ve büyümeyi engelleyen belirli elementlerin eklenmesiyle kimyasal olarak rafine edilmektedir. Aşılama bu yöntemin tipik bir örneğidir ve dökümlerde ve alüminyum alaşımlarında ince eş eksenli taneler elde etmek için Al-Ti-B üçlü ana alaşımının en yaygın uygulamasıdır [15, 56].

3.3.3. Mekanik yöntem

Katılaşma sırasında eriyiğin karıştırılması mekanik rafinasyon prosesinde, katılaşma sırasında eriyiğin karıştırılması için ultrasonik, elektromanyetik ve mekanik karıştırma kullanılmaktadır. Çoğu teknik ayrıntılı işleme ve/veya özel ekipman gerektirir. İşleme maliyetlerinin yüksek olması ve işlem sürelerinin uzun olması nedeniyle genellikle yarı katı metallerin işlenmesinde kullanılırlar. Karıştırma ve titreşim işlemleri, katılaşma sırasında alüminyum tanelerini inceltmek için sıklıkla kullanılmaktadır.

Mekanik karıştırma, elektromanyetik karıştırma ve kabarcıklı karıştırma dahil olmak üzere çeşitli karıştırma yöntemleri geliştirilmiştir [15, 56, 57].

3.3.4. Mikroyapılar

Alüminyum ve alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek mukavemetleri, işlenme kolaylıkları, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri nedeniyle endüstride ve günlük hayatımızda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının mikroyapısının birçok faktörden etkilendiği ve kontrollü katılaşma ile istenilen döküm yapısının elde edilebileceği iyi bilinmektedir. Alüminyum-bakır alaşımları için elde edilen mikroyapı ve kimyasal bileşim, döküm prosesinin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Basınçlı döküm sırasında hızlı soğutma, ince taneli bir yapı üretir. Eriyiğin hızla soğutulması aynı zamanda dendritik kolların ve dendritik hücrelerin kısılmasına neden olur, böylece malzemenin tane boyutu azalmaktadır [58, 59, 60].

Koshengadam vd., (2019), Properzi CCR işlemi kullanılarak üretilen AA4043 çubukların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve elektriksel iletkenliği (EC) üzerinde tavlamanın etkisini araştırmıştır. Tavlama iki sıcaklıkta (200°C ve 300°C) 4 saat süreyle gerçekleştirildi. Çubuk numunelerine optik mikroskopi, EBSD, mikrosertlik, çekme testi ve EC ölçümleri gibi karakterizasyon teknikleri uygulamışlardır. Sonuçlar tavlama sırasında EC'nin önemli ölçüde arttığını ancak mekanik mukavemetin azaldığını göstermektedir. 300°C'de tavlanan numune, EC (%57,48 IACS), mikrosertlik (41 HV) ve çekme mukavemetinin (124 MPa) en iyi kombinasyonunu gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca görüntü analizi, tavlama sıcaklığı arttıkça Si ötektik parçacıklarının şekil faktörünün hafifçe değiştiğini göstermektedir. Ayrıca EBSD sonuçları tavlamanın yeniden kristalleşme sürecini desteklediğini belirtmişlerdir [61].

Mofarrehi vd., (2022) Mn içeriğinin (ağırlıkça %0,1-1) Al-Mg-Mn alaşımı 5xx'in sıcak işlenebilirlik ve işlenebilirlik diyagramları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıcak sıkıştırma testi 350-500°C sıcaklık aralığında ve 0,001-1 s⁻¹ gerinim hızında gerçekleştirildi. Dinamik malzeme modelleme, bükülme bölgeleri ve güvenlik bölgeleri oluşturan süreç haritaları geliştirmek için kullanmışlardır. İncelenen alaşımlar için, en yüksek güç dağıtım verimliliğine sahip iki bölge belirlemişlerdir; 400°C/0,001 s⁻¹ bölgesi (alan I) ve 500°C/1 s⁻¹ bölgesi, Mn içeriği arttıkça alan ve daha dar bir sıcaklık ve gerinim hızı aralığına doğru azalır ve güç dağıtım verimliliği düşer. Baz alaşım için dinamik yeniden kristalleşme her iki bölgede de baskın geri kazanım mekanizmasıdır. Daha yüksek manganez içeriğine sahip alaşımlarda, dinamik

yeniden kristalleşme, manganez içeren dispersiyonların varlığı nedeniyle önemli ölçüde engellenir. %0,1 Mn içeren baz alaşım için en uygun sıcak şekillendirme koşulları 350–450°C/0,001–0,007 s⁻¹ olarak belirlemişlerdir. Manganez içeren dispersiyonun tane sınırı göçü üzerindeki güçlü engelleyici etkisinden dolayı, manganez içeriğinin artmasıyla birlikte optimal durum aralığı azaldığını ifade etmişlerdir. %1 manganez alaşımı için optimum durum aralığı 375–425°C/0,001–0,002 s'ye daraldığı gözlenmiştir [62].

Farklı ürünler farklı tane inceltici gerektirir, dolayısıyla rafinerinin bileşimi, rafinerinin gelişmesiyle birlikte karmaşık hale gelmektedir. Alüminyum alaşımlarının tane incelticileri arasında Ca, Al-Ti, Al-B, Al-Sr, Al-Fe, Al-Zr, Al-Sc, Al-Ti-B, Al-Ti-C, Al-Ti-Be bulunmaktadır. Al-Nb-B, Al-Ti-B-Re, Al-Ti-BC-Re. Günümüzde en yaygın kullanılan tane inceltici Al-Ti-B alaşımıdır. Tane inceltme mekanizmasına ilişkin farklı teorileri Tablo 3.1'de ve farklı tane incelticileri Tablo 3.2'de verilmiştir [60, 62].

Tablo 3.1. Tane inceltme mekanizmasına ilişkin farklı teorilerin argümanları [62].

Teori	Olumlu bakış açıları	Olumsuz bakış açıları
Karbür borür teorisi	Al tanesinde TiB ₂ gözleniyor	Al-TiB ₂ ana alaşımının yüksek saflıkta Al'a göre tane inceltmesi yoktur. Ancak Al-Ti alaşımı, yüksek saf Al'a göre tane inceltme etkinliğine sahiptir.
Peritektik teori	Al-Ti-B ana alaşımı, Al-Ti alaşımından daha iyi tane inceltme etkinliği gösterir. Al-Ti serisi alaşımların inceltme davranışları açıklanmaktadır. Bu teori, TiAl ₃ içeren Al alaşımı eriyiğinde mantıklıdır Al tanesinin merkezinde TiAl ₃ gözlenir.	Karbür (veya borürler), çözünen Ti yokluğunda tane inceltme özelliğine sahip değildir. Bu teori, B elementinin tane inceltmesi üzerindeki canlandırıcı etkisini açıklayamaz.
Peritektik Hulk teorisi	TiAl 3 fazı, B ilavesi durumunda daha düşük konsantrasyonda bile stabildir.	Serbest Ti miktarı, peritektik reaksiyon için gereken Ti seviyesinden çok daha düşüktür.
Dubleks çekirdeklenme teorisi (hipermükleasyon teorisi)	Al-Ti-B'nin (Ti/B > 2,22) arıtma davranışı, dubleks çekirdeklenme teorisi ile açıklanmaktadır.	TiAl ₃ fazı, peritektik reaksiyon için termodinamik olarak stabil değildir. Borun, Al-Ti faz diyagramı ve TiAl ₃ 'ün stabilitesi üzerinde hiçbir etkisi yoktur.
Çözünen teorisi	TiB ₂ yüzeyinde Ti açısından zengin bir katmanın varlığı	Al-Ti-B rafinerisi tarafından tane inceltmesi, bekletme süresinin uzamasıyla birlikte kaybolur, ancak bu solma, karıştırma sonrasında kaybolur.
	Çözünen elementin tane büyüme kısıtlaması üzerinde etkisi vardır. Artan çözünen madde içeriği çekirdeklenmenin artmasına neden olur	TiB ₂ ile amorf Al arasındaki ince fazın tanımlanması zordur. Teorik olarak, saf Al, Al ve Al ₃ Ti karışımı veya ara Al-Ti yapısının tümü TiB ₂ parçacığının yüzeyinde çekirdekleşebilir.
		Çözünen elementin kısıtlayıcı etkisinin çekirdeklenme davranışı ve nihai tane boyutu üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır.

Tablo 3.2. Farklı tane incelticileri [62].

Tane inceltici	Alüminyum alaşımı	Rafine edildikten sonra ortalama tane boyutu (μm)	Bekletme süresi (dk)	Tutma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	İlave (ağırlıkça%)
Ti	Yüksek saflıkta Al	300	20	780	0,05
Cu	Yüksek saflıkta Al	900	20	780	0,4
Mg	Yüksek saflıkta Al	900	20	780	0,35
Al-5Ti-0.3C-0.2B	Ticari saf Al	170	60	730	0,2
Al-1.12Ti-0.48B	Ticari saf Al	156	2	720	-
Al-5Ti-1B	Ticari saf Al	300	60	730	0,2
Al-3B	Ticari saf Al	182	60	710	0,12
Al-Ti-C	Ticari saf Al	189	60	720	0,2
Al-5Ti-1B (ultrason)	Ticari saf Al	45	15	730	2,5
Al-3B-5Sr	A356	300	30	720	0,5
Al-4Nb-1B	A356	300	-	-	-
Al-1Nb-1B	Al-12Si	300	-	-	-
Al-2Nb-2B	Al-12Si	400-500	30	740	5
Al-5Ti-0.75C	Al-5Cu	50	-	720	2
Al-5Ti-0.25C	6063	40	10	720	2
Al-5Ti-1B	6063	40	10	720	3
Al-5Ti-1B	Al-12.24Zn-3.25Mg- 2.46Cu- 0.16Fe	46	0,5	750	1
Al-5Ti-1B-0.1Er	Al-10Zn-1.9Mg- 1.6Cu-0.12Zr	40	-	-	1

Yerinde gözlem yönteminin sınırlılığı nedeniyle rafinasyonda çekirdeklenme sürecini gözlemlemek zordur. Üstelik elementlerin kimyasal reaksiyonları karmaşık olduğundan tane incelticilerin arıtma mekanizmaları henüz net değildir. Yeni rafinerinin kullanılmasının teorik temelini oluşturduğu için rafinasyon mekanizmasının açıklığa kavuşturulması önemlidir. Rafinerinin tane inceltme verimliliği, çekirdeklenme partikülünün morfolojisi, boyutu ve miktarından etkilenir, dolayısıyla bu etkinin açıklığa kavuşturulması da önemlidir. Alüminyum alaşımı için rafineri araştırmaları uygun değildir ve belirli bir alüminyum alaşımı için özel rafinerinin kullanılması gelişen yönlerden biridir. Rafinerinin tane inceltme verimliliğinin artırılmasında hâlâ birçok zorluk bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda tane inceltme verimliliği genellikle istikrarsızdır. Bu nedenle, tane incelticisinin stabilitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Düşük enerji tüketimi, düşük maliyet ve yüksek verimlilik özelliklerine sahip yeni nesil tane rafinerilerinin geliştirilmesi mevcut sorunların çözümü açısından önemlidir [63, 64, 65].

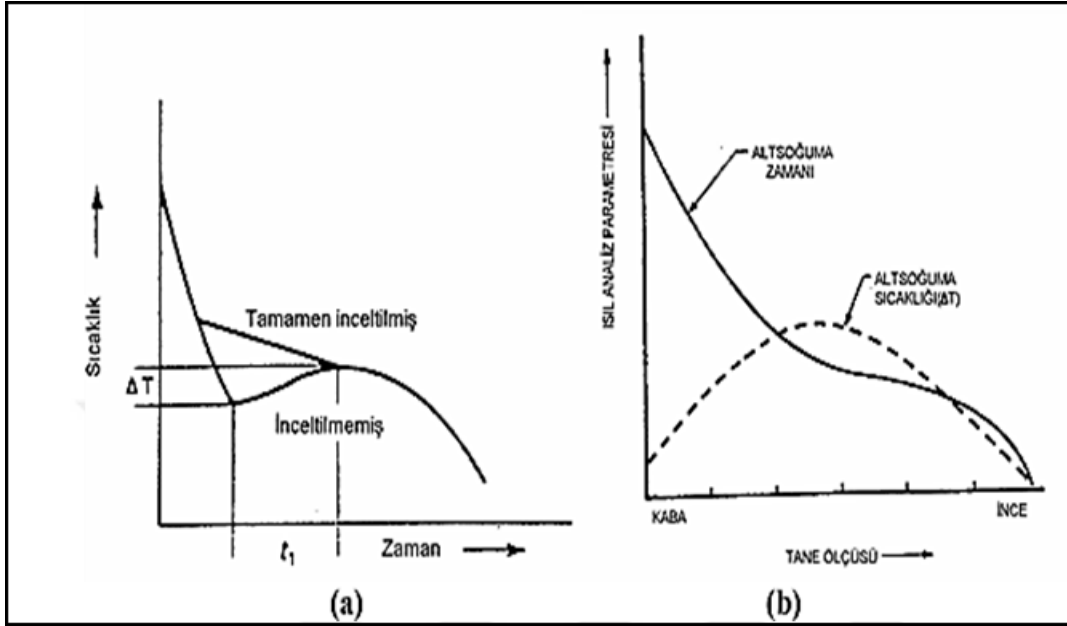
3.4. Tane İnceltme Prensipleri

Tane inceltme işlemi sırasında sırasıyla iki farklı mekanizma meydana gelir. Bu, atom çekirdeklerinin oluşumunu ve bu çekirdeklerin zaman içinde büyümesini içermektedir. Çekirdeklenmeyle ilgili çeşitli mekanizmalar vardır ve bunlar hakkındaki tartışmalar devam etmektedir. Heterojen çekirdeklenme teorisi olarak bilinen bu teoriye göre, çekirdeklenme substratı ile katılaşma çekirdekleri arasındaki arayüzey enerjisinin belirleyici bir rol oynaması önemlidir. Optimum değer, çekirdekleştirici madde ile çekirdek arasındaki minimum yüzey enerjisi olarak ifade edilmektedir. Bu durumda çekirdekler, çekirdekleştirici maddeyi tamamen çevreleyerek, entropi yasasına göre minimum enerji tüketen geniş çaplı bir katman oluşturur. Alüminyum alaşımlarında heterojen çekirdeklenmeyi incelediğimizde çekirdek kafesin atomik düzlemlerinin, üzerinde oluşan çekirdek kafesin atomik düzlemleri ile uyumlu olması gerekir. Başka bir deyişle, çekirdekleştirici ajan ile alüminyum arasındaki kristalografik ilişki uyumlu olmalıdır. Sıvı erimiş alüminyum alaşımının oksit bileşeni birçok yabancı parçacık içerir. Erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, alüminyum alaşım yapısındaki kalıntılar, ikisinin kristal yapılarının koordinasyonuna bağlı olan gerçek nükleol haline gelir. Uyumlu veya benzer kristal yapılara sahip çekirdekler, alaşımın sıvılaşma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda daha iyi çekirdeklenme sağlarken, daha az uyum ve benzerliğe sahip parçacıklar daha fazla soğutma gerektirir. Buna çil etkisi denir. Bu şekilde heterojen çekirdeklenme sonrasında çok ince parçacıklar üretilir [65, 66].

3.4.1. Tane inceltme eğrileri

Tane inceltme, dökme alüminyum ve dövme alaşımların özelliklerinin ve karakteristiklerinin geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Al-Ti ve Al-Ti-B ana alaşımları genellikle katılaşma ürününün tanelerini inceltmek için alüminyum alaşımlarına eklenir. Tane inceltme mekanizması bilimsel literatürde oldukça tartışmalıdır. Çekirdeklenme etkisi, α -Al çekirdeklenmesinden sorumlu parçacıklar ve özellikler yoğun bir çalışmanın konusudur. Son yıllarda çözünen etkisi yani çözünmüş titanyumun tane incelmeye etkisi tane inceltme araştırmalarında ön plana çıkmıştır. Dökme alaşımlarda tane incelticisinin sıvı metale eklenmesi için bekleme süresine bağlı olarak tane boyutunda dalgalanmalar görülür. Tane inceltme eğrisi iki farklı bölümden oluşur. Tane inceltici ilavesiyle ilk segmentin tane boyutu zamanla azalır. “O” noktasında tane boyutu minimuma ulaşır. Bu noktaya “son tane boyutu” denir. Bu nokta, tane incelticisinin bekleme süresini temsil etmektedir. Erimiş alaşım beklenen

“O” noktasına kadar dökülmezse tane boyutu artmaya başlayacaktır [66, 67]. Şekil 3.1’de (a) Sıcaklık-Zaman grafiği; (b) Isıl analiz parametresi-Tane boyutu; gösterimleri yapılmıştır.



Şekil 3.1. Tane inceltme eğrileri [86].

3.4.2. Tane İnceltme İşleminin Soğuma Eğrisine Etkisi

Alüminyum tane inceltme işleminin kullanımı uzun yıllardan beri bilinmektedir. Sıvı metale titanyum eklenmesi, tane yapısında önemli bir azalmaya neden olur ve alaşımın dökülebilirliğini artırır. Akışkanlık dökme alaşımların önemli bir özelliğidir. Bu, sıvı metalin kat edebileceği mesafenin (santimetre cinsinden) bir göstergesidir. Bunlardan en önemlileri katılma aralığı, döküm sıcaklığı, kalıp malzemesi ve döküm yöntemidir [15, 68, 69, 70].

3.5. Tane Boyutu Ölçüm Teknikleri

3.5.1. Alan ölçümsel (planimetrik) yöntem

Metalik malzemelerin mikroyapısını karakterize ederken dilimleme yöntemi, ortalama tane boyutunu belirlemek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Çünkü basit doğru ve hem eş eksenli hem de eş eksenli olmayan tanelerin yapısını işleyebilmektedir. Bununla birlikte, manuel uygulama nispeten zaman alıcıdır ve anlaşılmağa açıktır ve farklı türde kesişmelerin (test desenleri ile tane sınırları arasında) uluslararası standartlara göre tespit edilmesi, sınıflandırılması ve değerlendirilmesi gerektiğinden otomatik uygulamaların tasarlanması zordur.

Mikroskobik görüntüler kullanarak tane boyutunun ölçülmesi, metalik malzemelerin mikroyapısının karakterizasyonunda önemli bir görevdir. Metalik malzemelerin içyapısı, farklı yönelimlere sahip ayrı kristal alanlardan oluşur. Metalik malzemelerin ortalama tane boyutu, mukavemet, korozyon davranışı, termal deformasyon davranışı ve kırılma davranışı gibi mekanik ve malzeme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ortalama tane boyutunun doğru ölçümü, araştırmacıların malzemenin mikroyapısını anlamalarına, özelliklerini/davranışlarını tahmin etmelerine ve üretim parametrelerini optimize etmelerine olanak tanır. Bu standart, ortalama parçacık boyutunu belirlemek için üç geleneksel fotomikrografik yöntemi açıklar; Karşılaştırmalı, Düzlemsel ve Kesitsel'dir. Bu standart test yöntemleri genellikle manuel olarak gerçekleştirilir, bu da ölçüm sürecini zaman alıcı ve açık hale getirmektedir. Mevcut yöntemlerin çoğu, girdi görüntülerini önceden işlemek ve bireysel tane bölgelerini tanımlamak için yöntemlere odaklanır. Tek tanecikleri belirledikten sonra bu yöntemler, ortalama tanecik boyutunu belirlemek için genellikle düzlemsel yöntemi kullanır çünkü hesaplama süreci hesaplama açısından basittir. Ortalama tane boyutu, planimetri kullanılarak tanımlanmış bir tane boyutu aralığının konumu ve boyutundan kolayca hesaplanabilir. Bununla birlikte, düzlemsel yöntemin etkinliği, düzgün eş eksenli taneler ile sınırlıdır [70, 71].

3.5.2. Kesişim yöntemi

Kesme yöntemi, basit, kesin ve hem eş eksenli hem de eş eksenli olmayan tane yapılarına uygulanabilmesi nedeniyle en yaygın kullanılan fotomikrografi yöntemlerinden biridir. Bu nedenle resmi standartlar, düzgün eşeksenli olsun ya da olmasın, herhangi bir tane yapısına sahip malzemeleri değerlendirmek için tercih edilen test yöntemi olarak kesit yöntemini önermektedir [71].

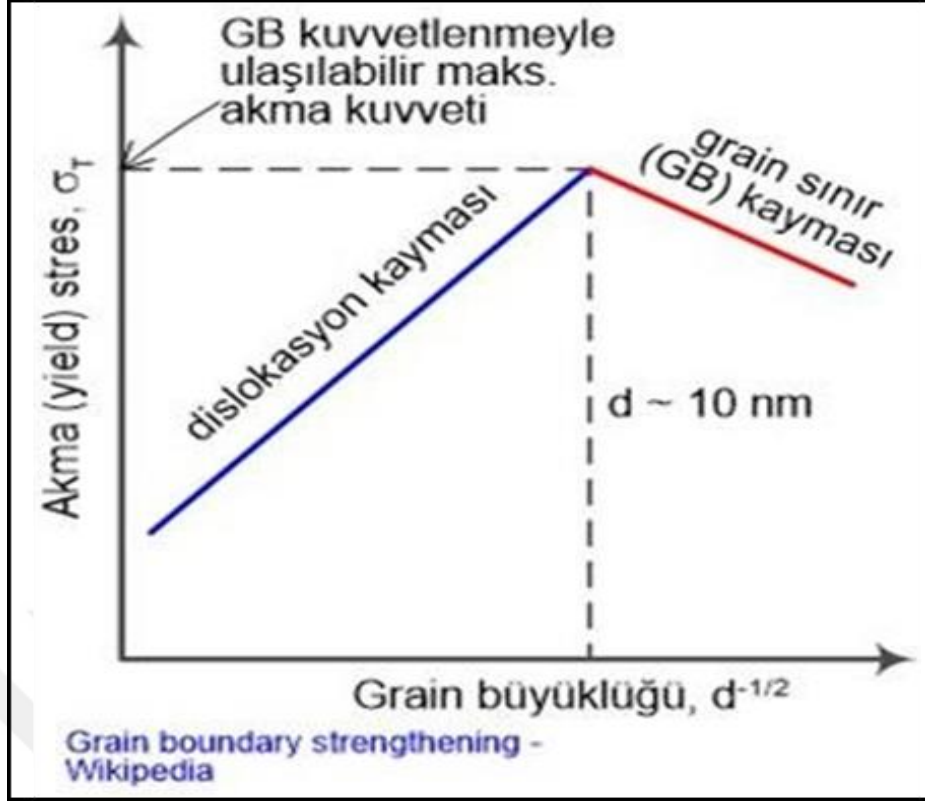
Banerjee vd., (2019) ve Flipon vd., (2021), tane boyutu ölçüm algoritmalarında çaprazlama yöntemlerinin kullanımını tartışmıştır, ancak özel çaprazlama noktalarına sahip türleri, özellikle de aşağıdaki gibi belirli noktalarda bulunanları tanımlamak için otomatik standartlara uygun bir yöntem ihtiyacı vardır. Tane çaprazlamaları ile ilgili çözüm sağlanmamıştır. Standartta göre birden fazla parçayı işleminin otomatikleştirilmesindeki en büyük zorluk, bu özel kavşak türlerinin otomatik olarak tanımlanması ve kriterlere göre sınıflandırılmasıdır. Kesişme yönteminin ana fikri, mikroskop görüntüsü üzerine rastgele test desenleri çizmek ve kesişme sayısını saymaktır ($N_{intersection}$) test numunesi ile tane sınırı arasında. 100x büyütmede inç kare

başına düşen tane sayısı şu şekilde N_{AE} gösterilir. Tane boyutu numarası G ile temsil edilir. G , yaygın olarak kullanılan bir tane boyutu indeksidir ve daha sonra bir formül aracılığıyla kesişim numarasından hesaplanabilir [72, 73].

Li vd., (2022) tarafından yapılan çalışmada, metalik malzemelerin ortalama parçacık boyutunun ölçülmesine yönelik kesme yöntemini otomatikleştirmek için yeni bir algoritma önermişlerdir. Algoritmaları, sürekli ve kapalı tane sınırlarını çıkarmak için topolojik bir iskelet kullanarak ve tane sınırları arasındaki kesişimleri tespit etmek ve sınıflandırmak için seçilen test modellerini kullanarak ortalama tane boyutunu ölçebilmişlerdir. Bilindiği kadarı ile farklı kavşak türlerini uluslararası standartlara göre sınıflandırmak ve saymak için bir kavşak yönteminin ilk otomatik uygulamasıdır. Algoritmaları, kesme yöntemini başarılı bir şekilde otomatikleştirir ve uygular ve farklı numune hazırlama koşullarından 200 gerçek test mikroskobu görüntüsünü kullanarak kesim tespiti ve sınıflandırma sırasında güvenilir genel doğruluk (>%98) elde etmişlerdir. Mevcut ticari yazılımla karşılaştırıldığında, algoritmaları ortalama ölçüm hatasını %94 oranında azaltarak 0,394 parçacık boyutu biriminden 0,023 parçacık boyutu birimine düşürürken, ortalama hesaplama süresini de %80 azaltmıştır [74].

3.5.3. Hall-Petch bağıntısı

Polikristal malzemelerin Hall-Petch akma dayanımı (yield point) σ_T tane büyüklüğü arasındaki ilişkiyi tanımlar. Malzemelerin akma dayanımı ile ortalama tane boyutu değeri arasında yakın bir ilişki vardır. Ortalama tane boyutu değeri azaldıkça akma gerilimi değeri artar. Hall-Petch denklemi bu bağlantıyı ifade eder. Hall-Petch ilişkisi, tane boyutu küçüldükçe çok kristalli malzemelerin akma mukavemetindeki artışın niceliksel bir tanımını sağlar. Bu ilişki plastik deformasyonun dislokasyon mekanizmasına bağlıdır; tane sınırları dislokasyonların hareketini engeller. Çok kristalli malzemelere ek olarak Hall-Petch ilişkisi diğer katmanlı malzemelere de uygulanabilir. Hall-Petch ilişkisi bize tane boyutunu küçülterek malzemenin teorik mukavemeti kadar yüksek bir mukavemet elde edebileceğimizi söyler. Aslında tane boyutu küçüldükçe dirençleri zirveye ulaştığı 20-30 nm civarına kadar dirençleri artmaya devam eder (Şekil 3.2) [15, 74, 75].



Şekil 3.2. Hall-Petch bağıntısı [87,88].

3.6. Çekirdeklenme

Çekirdeklenme ve tane büyümesi katılaşma sırasında meydana gelen iki önemli mekanizmadır. Çekirdeklenme mekanizması, yarı kararlı sıvıların sıcaklık düştükçe kristaller oluşturduğu, termal olarak etkinleştirilen bir işlemdir. İki tür çekirdeklenme mekanizması vardır: Homojen çekirdeklenme ve heterojen çekirdeklenmedir. Çekirdeklenme, çevresinden bazı sınırlarla ayrılan yeni bir fazın oluşmasıdır. Katılaşma sırasında sıvı içinde katı bir çekirdek oluşur ve hacim boyunca yayılır. Katılaşana kadar büyümeye devam edecek. Bu süre zarfında itici bir gücün varlığı, kararlı veya kararsız bir konumdan diğerine geçişe neden olur. Sistemin serbest enerjisinin azalması dönüşüme izin verir. İtici gücün varlığı gereklidir, ancak yeterli değildir. Kinetik faktörler dönüşümün gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemektedir [15, 16, 74, 75, 76].

Miesenberger vd., (2022) çalışmada, sürekli soğutulan DSC deneyleri sırasında AA6005-alüminyum alaşımında heterojen çekirdeklenme ve çökelmenin hesaplamalı bir analizini gerçekleştirdi. Heterojen çekirdeklenme bölgelerinin varlığında çekirdeklenme enerjisi için genişletilmiş bir formül geliştirildi ve sürekli soğutma

deneylerinde DSC eğrilerinin tahminine uygulandı. Mevcut model, tane sınırı yüzeylerini, kenarlarını ve köşelerini ve ayrıca dislokasyon çekirdeklenme koşullarını dikkate alır. Parçacıklar üzerindeki heterojen ve epitaksiyel çekirdeklenme, arayüz enerjisinin genel olarak etkili bir şekilde azaltılması ve (kısmi) tutarsız arayüz alanlarının tutarlı/yarı uyumlu arayüz alanlarıyla değiştirilmesine izin veren iki kalibrasyon faktörü ile açıklanabilir. Sonuçlar, heterojen çekirdeklenme olaylarıyla ilişkili enerji kazanımı uygun şekilde hesaba katıldığında deneysel olarak gözlemlenen yağış dinamiklerinin iyi tanımlandığını, oysa heterojen bölgelerin etkileri göz ardı edildiğinde simülasyonların tamamen başarısız olduğunu göstermektedir [75].

3.6.1. Homojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme çok sayıda atomun ve yüksek aşırı soğutmanın birleştirilmesiyle sıvılardan kritik boyutlu katıların oluşumudur. Düzgün çekirdeklenme, sıvı metalin kalıp duvarlarıyla temas halinde olmadığını ve sıvı içinde çekirdeklenmeyi başlatabilecek hiçbir katı parçacık veya gaz boşluğunun bulunmadığını varsaymaktadır. Bu durumda sıvının herhangi bir noktasında çekirdeklenme olasılığı aynıdır. Alüminyum alaşımlarında, çözelti işlemi sırasında veya homojenleştirme sonrasında soğutma sırasında Mg-Si fazının çökmesi, daha sonraki yapay yaşlandırma veya sıcak şekillendirme işleminin ön ısıtılması sırasında mikroyapısal değişiklikleri etkileyebilir. Yağış kinetiğinin tam olarak anlaşılması, bu mikroyapısal değişikliklerin tahmin edilmesini mümkün kılacak ve böylece optimize edilmiş özelliklere sahip malzemelerin üretimini kolaylaştıracaktır. Homojen çekirdeklenme, sıvı metalin kendileri çekirdek oluşturan atomları sağladığında meydana gelmektedir. Saf bir metal, denge katılaşma sıcaklığının altına yeterince soğutulduğunda, yavaş hareket eden ve birleşen birçok çekirdek oluşur. Düzgün çekirdeklenme birkaç yüz dereceye kadar aşırı soğutma gerektirmektedir. Bir kristal çekirdeğinin kararlı hale gelebilmesi ve son kristal formuna doğru büyüebilmesi için kritik bir boyuta ulaşması gerekir. Kritik boyuttan daha küçük boyutlara sahip, birbirine bağlı atomlardan oluşan bir grup, embriyo olarak kabul edilir. Kritik çapı aşarsa buna çekirdek denir. Atomların akışkanlığı nedeniyle embriyo kararsızdır ve sürekli olarak oluşup çözülmeaktadır [75, 76].

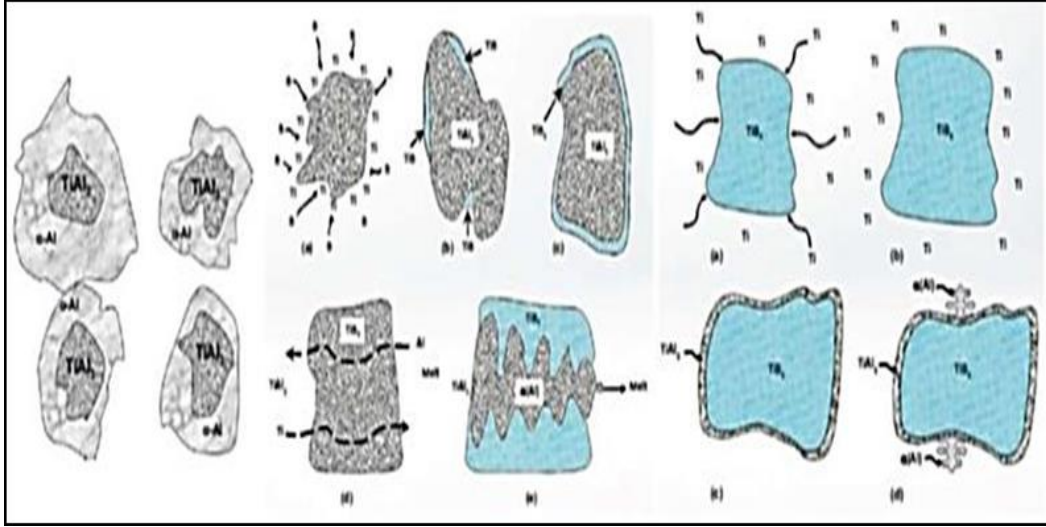
3.6.2. Heterojen çekirdeklenme

Aslında sıvılardaki çekirdeklenme olaylarının çoğu, homojen çekirdeklenme teorisinin öngördüğünden çok daha düşük aşırı soğuma hızlarında meydana gelir. Heterojen

çekirdeklenme bu, sıvılardan kritik boyutta katılar oluşturmak için yüzey kirleticiler maddelerin kullanılmasıdır. Pek çok malzeme üretimin bir aşamasında sıvı haldedir. Bir sıvı donma sıcaklığının altına soğutulduğunda katılaşır. Malzeme kürlenmiş halde veya termal ve mekanik işlemten sonra kullanılabilir. Düzgün çekirdeklenme durumunda, kritik büyüklükte küresel nükleollerin oluşumu dikkate alınır. Heterojen çekirdeklenmede çekirdeklerin tamamen küresel olması gerekmez. Kısaltılmış küresel embriyonun yüzeyi çekirdekleştirici madde ile stabilize edildiğinde, embriyo yüzeyi genişleyerek embriyo çekirdeklenmiş hale gelir. Sıvı içeren kaplardaki yüzeylerde ve parçacıklarda çekirdeklenme meydana gelebilir. Heterojen çekirdeklenmede anahtar faktör teması açısidir. Heterojen çekirdeklenme süreci uygun çekirdeklenme bölgelerinin mevcudiyetine bağlı olduğundan, çekirdeklenme hızı maksimuma ulaşır ve daha yüksek aşırı soğutma derecelerinde minimuma ulaşır. Bunun ana nedeni, çekirdeklerin substrat üzerinde tabakalı difüzyonu, dolayısıyla daha fazla çekirdeklenme için gereken yüzey alanının azalmasıdır. Düzgün çekirdeklenmede olduğu gibi, sıvıdaki difüzyon sınırlayıcı faktör olmayacaktır çünkü yüksek aşırı soğutmada çekirdeklenme oranını azaltacaktır [70, 71, 75, 76, 77].

3.6.3. Çekirdeklenme teorileri

Alüminyum alaşımlarına ana alaşımların eklenmesiyle meydana gelen alüminyum tanecik incelmesinin mekanizmalarına ilişkin tartışmalar devam etmektedir. Bu sorunlara yanıt olarak çeşitli tane inceltme mekanizmaları önerilmiş ancak nihai bir fikir birliğine varılamamıştır. Şu ana kadar dış etkenlerden bağımsız olarak homojen ve heterojen çekirdeklenmeyi incelenmiştir. Pratikte füzyonun en önemli teknik yönü çekirdeklenmenin kontrolüdür. Döküm işlemi sırasında meydana gelen ortalama parçacık boyutu, parçacık boyutu dağılımı ve segregasyon, dökümün fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Esas olarak çekirdekleştirici ajanlar tarafından kontrol edilirler. Bu sınıflandırmanın çekirdeklenme teorisi, alüminyum alaşımlarında heterojen çekirdeklenmeyi içermektedir. Çözünen madde teorisi, sıvı alüminyumdaki çözünmüş elementlerin tane incelmeleri üzerindeki etkisini ele almaktadır. Şu ana kadar tane inceltme mekanizmalarına uygulanabilen bu teoriler altı grupta tartışılmaktadır [15, 68, 69, 76, 77].



Şekil 3.3. Çekirdeklenme teorileri [75,78].

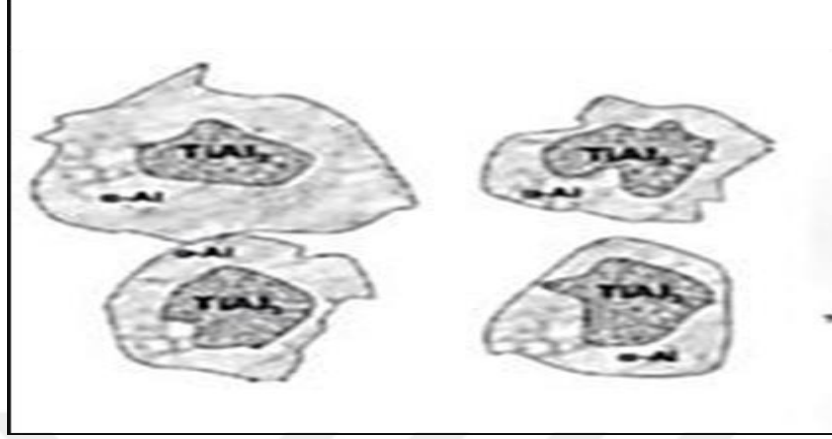
3.6.3.1. Karbür-borür teorisi

Bu teoriye göre alaşıma karbon eklenmese bile Al-Ti bazlı alaşımların tane inceltme etkisi TiC çekirdeklerin varlığına bağlıdır. Bor karbür teorisi ilk olarak Cibula tarafından önerilmiş ve Jones ve Pearson tarafından desteklenmiştir. Bu teoriyi destekleyen varsayımlara göre çok az miktarda karbon TiC oluşumunu teşvik etmek için yeterlidir. Alüminyum tanelerini rafine etmek için Al-B ana alaşımlarının kullanımına ilişkin son çalışmalar, AlB_2 'nin alüminyum için etkili bir çekirdekleştirici ajan olduğunu göstermiştir. $TiAl_3$ bileşiklerinin aynı zamanda alüminyum için etkili çekirdekleştirici ajanlar olduğu düşünülmektedir. Al-Ti ana alaşımı ötektik ötesi konsantrasyonlarda alüminyum alaşımlarına eklendiğinde etkili tane inceltmesi gözlemlenmiştir [15, 75, 76, 77, 78].

3.6.3.2. Faz diyagramı-peritektik teorisi

Peritektik geçiş, peritektik sıcaklıkta bulunan sıvı ve katı fazların başka bir katı faza dönüşmesi olarak tanımlanabilir. Katılaşma sırasında bir arada bulunan sıvı ve katı fazların sabit sıcaklıkta başka bir katı faza dönüştüğü sürece peritektik reaksiyon denir. Peritektik geçiş; ötektik geçiş sergileyen alaşım sistemlerine benzer şekilde sabit peritektik geçiş sıcaklığında bulunan sıvı ve katı fazların başka bir katı faza dönüşümü olarak tanımlanır. Bileşen katı bir çözelti, bileşen allotropik faz veya peritektik veya peritektik reaksiyonlar sırasında oluşan bir faz olan metallerarası bir bileşiktir. Kesintisiz peritektik reaksiyonun en önemli koşulu, α fazı ile sıvı faz arasındaki sürekli etkileşimdir. Yukarıda bahsedildiği gibi β fazı α fazında çekirdeklenir ve bu mekanizma kısa mesafeli difüzyon yoluyla gerçekleşerek %0,15'in üzerindeki Ti

içeriklerinde, $TiAl_3$ intermetalik bileşikleri heteronükleer bileşikler gibi davranmaktadır (Şekil 3.4). Tane inceltmesi, oluşan $TiAl_3$ heteronükleuslarının sayısına ve boyutuna bağlıdır [15, 16, 17, 75, 76, 77, 78].

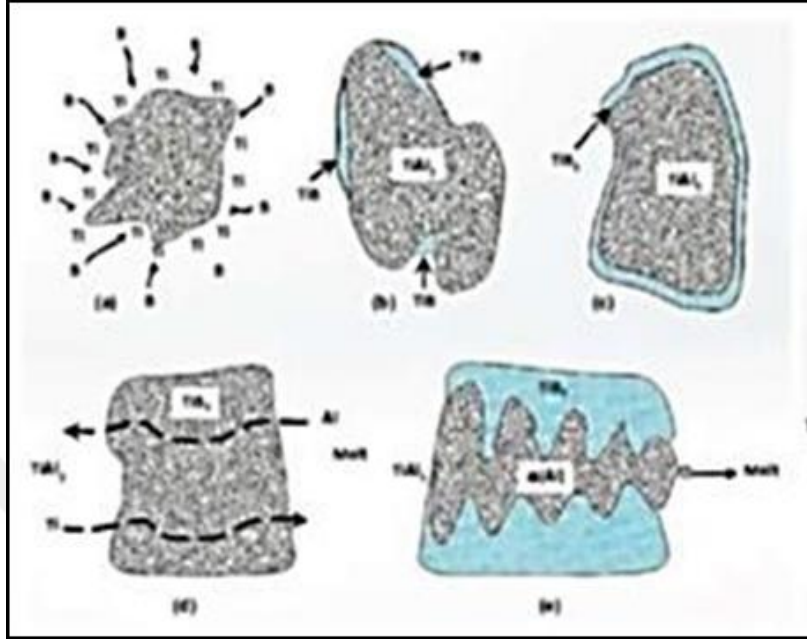


Şekil 3.4. Peritektik teorisi [75,78].

3.6.3.3. Peritektik hulk teorisi

Hulk teorisi yakın zamanda araştırmacılar Buckrud ve Dong tarafından önerilmiştir. Alüminat borür kabuğunda çözünür ve peritektik bileşimin yakınındaki boşluklardan ayrılır. Ancak bazı çalışmalar, eriyikteki bor varlığına rağmen alüminat bileşiklerinin yüksek sıcaklıklarda çözündüğünü göstermiştir. Teori Şekil 3.5’de gösterilmektedir. $TiAl_3$ intermetalik bileşikler oluştuğunda yüzeyde bir TiB_2 tabakası oluşur ve bunların çözünmesi önlenmektedir. Aynı zamanda Ti dışarı doğru, Al ise içeriye doğru yayılır. İçerisindeki alüminyum açısından zengin eriyik katılaşarak $\alpha-Al$ ’e dönüştüğü ifade edilmektedir. Kabukta heteronükleasyon devam eder. AlB_3 ana alaşımının, $AlSi10Mg$ ve $AlSi12Cu$ döküm alaşımlarının tane inceltme potansiyeli araştırıldı ve çoğu alüminyum dökümhanesinin standart tane inceltme yöntemi olan $AlTi5B1$ ana alaşımı ile karşılaştırılmıştır. İkincisi, her iki alaşımın tane yapısını incelttiğidir. Ancak bu performans aynı ince tanecikle işlenen alüminyum alaşımlarının performansı kadar iyi değildir. AlB_3 ile aşılandığında titanyum içermeyen $AlSi10Mg$ ve $AlSi12Cu$ alaşımları tutma aralığı boyunca çok küçük taneler sergilemektedir. Bu, ince taneli işlenmiş alüminyum alaşımlarına özgü mükemmel tanecik inceltme verimliliğinin yanı sıra güçlü solmaya dirençli tanecik inceltme etkisi anlamına gelmektedir. Eriyikte Ti’nin bulunmaması, $\alpha-Al$ ’den önceki tüm B’nin mükemmel substratlar olan AlB_2 parçacıkları oluşturmaya olanak tanımakta ve kristalleşmeye başlamaktadır. Dökme

alüminyum parçaların taneleri, dövme plastik alaşımları kadar küçük olabilir [15, 16, 74, 75, 76, 77, 78].



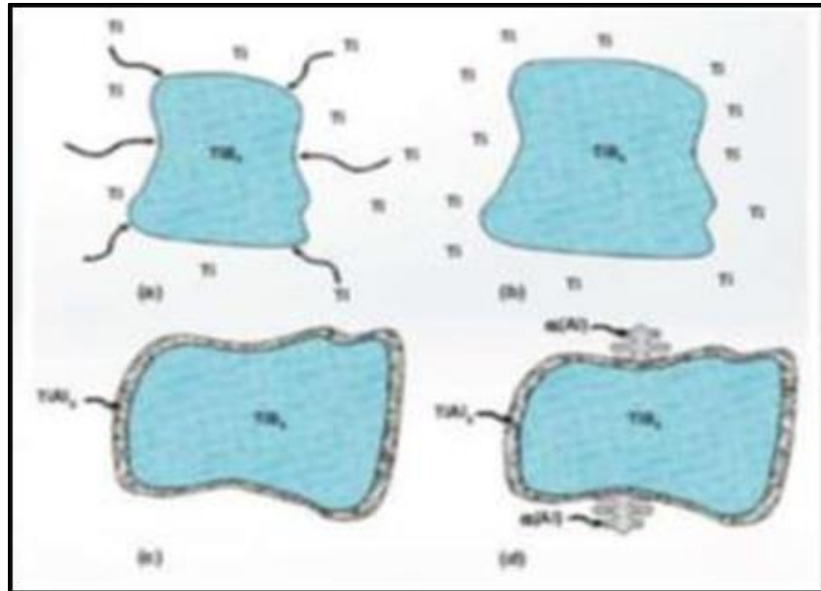
Şekil 3.5. Peritektik Hulk teorisi [75,78].

3.6.3.4. Hiper çekirdeklenme teorisi

Alüminyum (Al) ve alaşımları, düşük yoğunluklarından dolayı başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok ulaşım endüstrisinde önemli yapısal malzemeler haline gelmektedir. Araç ağırlığının azaltılması, yakıt tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azalması anlamına gelmektedir. Alüminyum alaşımları genel olarak deforme alaşımlar ve döküm alaşımları olarak ikiye ayrılır. İlki, sonraki sıcak/soğuk şekillendirme işlemleriyle elde edilir. İkincisi, basınçlı döküm gibi bir döküm işlemi kullanılarak üretilir. Bu nedenle, her iki alaşım türü de bir noktada katılaşacaktır. Kaplama çözeltisinde çözünen Ti çok fazla Ti içerir ve TiB₂ ile kaplama çözeltisi arasındaki katmanda çökerek ince bir TiAl₃ tabakası oluşturur. Bu teorinin temel sorunu, araştırmacı Jones'un iddia ettiği gibi, test edilmesi zor bir mekanizmaya dair hiçbir deneysel kanıtın bulunmamasıdır. Sıvıdaki elementler arayüzeyde ayrılrsa da bu, çekirdeklenmedeki önemli değişiklikleri açıklamıyor. Peritektik reaksiyon nedeniyle α -Al, TiAl₃ üzerinde çekirdeklenmeye başlar. Hipernükleasyon teorisi (Şekil 3.6) Jones adında bir araştırmacı tarafından önerildi. Bu teoriye göre çok küçük miktarlardaki bor ve titanyumun tane inceltme işlemi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasından dolayı bu isim verilmiştir. Teori, çözülmüş TiB₂ bileşiklerinin, sıvı

arayüzdeki titanyum atomlarının sayısına bağlı olarak kolaylıkla ayrıştığını belirtir. Bu nedenle peritektik reaksiyon sonrasında borür çökeltisi üzerinde ince bir $TiAl_3$ bileşiği ve $\alpha-Al$ bileşiği tabakası oluşur [15, 74, 75, 76, 77, 78].

Borzoni vd., (2016) yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımlarının araç ağırlığını azaltmada ve dolayısıyla özellikle ulaşım alanında çevre kirliliğini azaltmada faydalı olduğunu bulmuşlardır. Alüminyum alaşımlarının özelliklerinin optimize edilmesi, heterojen eriyik çekirdeklenmesinin tasarlanması ve geliştirilmesiyle sağlanabilir. Bu çalışmada, katılaşma sürecini iyileştirmek ve kontrol etmek için ticari bir alüminyum-silisyum alaşımının niyobyum bazlı bir fazla nasıl aşılanaabileceğini gösteriyoruz. NbB_2/Al_3Nb 'nin Al-Si alaşımları için güçlü bir heterojen çekirdeklenme matrisi olduğunu gösterildi. Daha iyi çekirdeklenme, malzeme yapısını katılaşma süresi ve alaşım kimyası gibi işleme koşullarına daha az bağımlı hale getirdiği ifade edilmiştir. Bu, geliştirilmiş ve daha izotropik özelliklere sahip daha hafif yapısal bileşenlerin geliştirilmesine ve üretilmesine imkân sağlamıştır. Bu, döküm yapısının alaşım türüne ve katılaşma koşullarına daha az bağımlı olmasını sağlamıştır. Bu nedenle ortaya çıkan taneler daha ince olur ve sütunlu tanelerin oluşumu önlenir. İkincil Si ötektik fazının artırılması, daha ince $\alpha-Al$ birincil dendritlerin daha düzgün bir dağılımı yoluyla da elde edilir. Bu proses daha izotropik davranışa sahip alüminyum-silisyum dökümlerin elde edilmesinde etkili ve güvenilir bir uygulama olduğunu belirtmişlerdir [78].



Şekil 3.6. Hiper çekirdeklenme teorisi [75,78].

3.6.3.5. Çift çekirdeklenme teorisi

Süper çekirdeklenme teorisi Jones tarafından önerilmiştir ve adını çok küçük miktarlardaki titanyum ve borun tane inceltme işlemi üzerindeki önemli etkisinden almaktadır. Teori, Ti'nin çözünmüş TiB_2 'de mevcut olduğunu belirtmektedir. Sıvı arayüzündeki atomların oranına bağlı olarak ayrılma eğiliminde olduklarını söylenmiştir. Bu nedenle borür ve alüminyum α çekirdekler üzerinde peritektik reaksiyonlar nedeniyle ince bir $TiAl_3$ tabakası çökeldiği belirtilmektedir [15, 74, 75, 76, 77, 78].

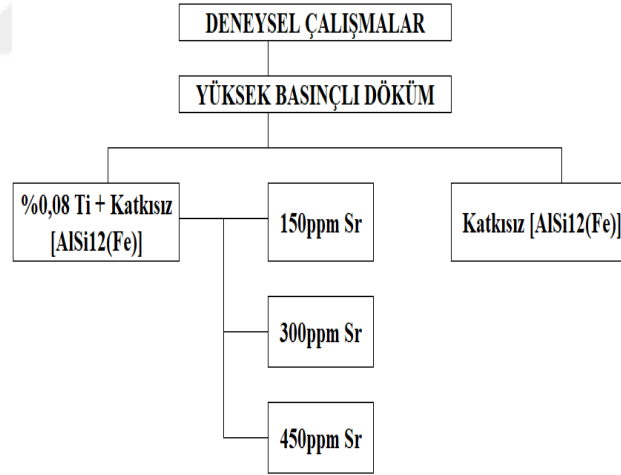
3.6.3.6. Çözünen teorisi

Bu teoriye dayanarak Johnson ve arkadaşları, çekirdekleştirici ajanların ve ayrılmış çözünen maddelerin tane inceltmesini etkilediğini öne sürmüşlerdir. Burada değişimin derecesi tane inceltme faktörü (GRF) kullanılarak ölçülmüştür. Tane inceltmesinde çözünmüş malzemenin bir faktör olarak değerlendirilmesi çok eskilere dayanmaktadır. Titanyumun tane inceltmesindeki önemi, güçlü ayrışma eğiliminde yatmaktadır [15, 74, 75, 76, 77, 78].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, yüksek basınç altında dökülen AlSi12(Fe) alaşımına Ti ve Sr ilavesi yapılarak alüminyum ve silisyumun modifikasyonu sağlanmıştır. Ti ilavesi Al modifiye ederken Sr ilavesi Si modifiye etmiştir. Ti ilavesinin tane inceltmeye etkisi vardır. Ti ilavesinin ve Sr ilavesinin ötektik Si alaşımına mekanik etkisi araştırılmıştır. Ti modifikasyonunun ve Sr modifikasyonunun, yüksek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen Al-Si alaşımı parçaları üzerindeki etkisinin incelenmesi için %0,08 Ti ve 0 ppm (Sr ilavesiz), 150ppm, 300ppm ve 450ppm oranlarında Sr alaşımları denemeleri yapılmıştır. Dökümde üretilen parçaların Radyografik (Dijital RT) muayenesi yapılmıştır. Deneysel çalışmada uygulanan yöntem ve kullanılan alaşımlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmada uygulanan yöntem ve alaşımların şematik gösterimi.

Katkısız AlSi10(Fe) için Ti ve Sr ilavesi yapılmadan EN AC 44300 standartına uygun AlSi10(Fe) külçesinden döküm yapılmıştır. Ağırlıkça %0,08 Ti alaşımı için AlTi5B1 master alaşımı ilavesi yapılarak döküm yapılmıştır. Ağırlıkça 150ppm Sr, 300ppm Sr ve 450ppm Sr alaşımları için AlSr10 master alaşımı ilavesi yapılarak döküm parçaları üretilmiştir. Yaklaşık 30 dakika içerisinde çevrim süresi 90 sn/baskı olarak tek şarjdan toplamda 20 baskı elde edilmiştir.

Elde edilen yolluklu parçalara uygulanan deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen testler şekil 4.2’de gösterilmiştir.



şekil 4.2. Deneysel çalışmalarda uygulanacak testlerin şematik gösterimi.

4.1.1. Araştırmada kullanılan cihazlar

Çalışmamızda kullanılan cihazlar aşağıdaki gibidir.

4.1.1.1. Makro kesme cihazı

Dökümde üretilen 5 farklı kompozisyondaki alaşımlara gerekli testleri uygulamak için numune üzerinden kesit almak için kullanılan kesme işlemi şekil 4.3’de gösterilen Strues marka makro kesme cihazıyla kesme işlemi yapılmıştır. Makro kesme işleminde numune alınacak parça cihaza sabitlendikten sonra kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi sırasında ısınma ve sarmayı önlemek için su kullanılmıştır.



şekil 4.3. STRUES LABOTOM-3 marka makro kesme cihazı.

4.1.1.2. Bakalite alma cihazı

Makro kesmede elde edilen numunelerde şekilsiz ve elle tutulması zor olmaması için bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bakalite alma işlemi 220°C’de 4 dakika yapılmıştır. Numunelerin bakaliteye alma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Multimount Easy marka cihaz.

4.1.1.3. Zımparalama ve parlatma cihazı

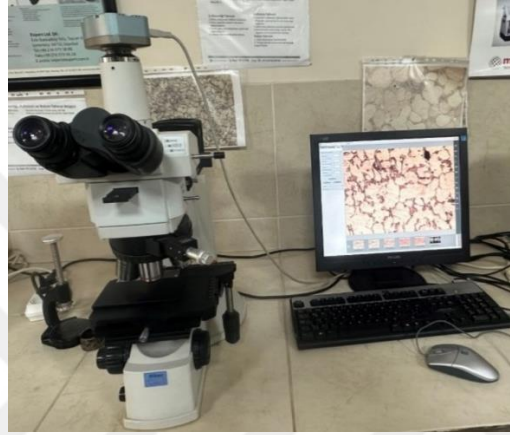
Bakalite alınan numunelerde düz ve paralel yüzey elde edebilmek için zımpara işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında mikrosertlik ve metalografik muayene için ihtiyaç duyulan parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımparalama ve patlama işlemlerinde 350rpm disk dönme hızıyla numunelere işlemler uygulanmıştır. Test numuneleri için gerçekleştirilen zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 4.5’de gösterilen zımparalama ve parlatma cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. TRD Grinder-Polisher marka cihaz.

4.1.1.4. Mikroyapı analizinde kullanılan optik mikroskop

Numunelerin mikroyapısını incelemek için patlatılan 5 farklı kompozisyondaki numuneler optik mikroskop ile incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri NİKON Eplipse L150 marka optik mikroskop cihaz ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar destekli optik mikroskopta IS Capture yazılımlı analiz programı kullanılmıştır. 5, 10, 20, 50 ve 100 büyütme kapasitesine sahip optik mikroskop ile tüm büyötmelerde görüntüler alınmış fakat referans olarak 10 ve 50 büyötmeye kullanılmıştır. Mikroyapı görüntülerinin alındığı optik mikroskop Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. NİKON Eplipse L150 marka optik mikroskop.

4.1.1.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Optik mikroskopla incelenen numunelerdeki intermetalik fazların görüntü ve % kimyasal kompozisyonları SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. SEM cihazında; mikroyapı boyutları ve EDS analiziyle temel bileşenler belirlenmiştir. SEM analizinin gerçekleştirilmesinde kullanılan cihaz Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. JEOL JSM 6060LV marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.

4.1.1.6. Spektral analiz cihazı

5 ayrı kompozisyondaki alaşımların kimyasal bileşimlerindeki elementlerin % kimyasal kompozisyonunu analiz etmek için kullanılan GNR marka S1 MiniLAB 150 model spektral analiz makinesi. OES (optik emisyon spektrometreler) üç ana bileşen içerir; ilki, metalik bir numune içindeki atomları karakteristik ışık veya optik emisyon hatları yaymaları için uyaran bir elektrik kaynağıdır. İkinci bileşen bir optik sistemdir. Işık, plazma olarak bilinen buharlaştırılmış numuneden gelen çoklu optik emisyon enerjisi, spektrometreye iletilir. Spektrometrede gelen ışığı elemente özgü dalga boylarına ayırır ve karşılık gelen dedektör, her dalga boyu için ışığın yoğunluğunu ölçer. Ölçülen yoğunluk, analizi yapılan malzemedeki elementin konsantrasyonu ile orantılıdır. Üçüncü bileşen bir bilgisayar sistemidir. Bilgisayar sistemi, ölçülen yoğunlukları alır ve bu verileri, temel konsantrasyonları üretmek için önceden tanımlanmış bir kalibrasyon yoluyla işleme prensibine dayanır. Kimyasal analizde kullanılan spektral analiz cihazı Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. GNR marka S1 MiniLAB 150 model spektrometre cihazı.

4.1.1.7. Sertlik test cihazı

5 farklı kompozisyonda elde edilen numunelerde ilave master alaşımlarının etkisini görebilmek için sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Bulut makina marka BMS 200-RB model cihaz.

4.1.1.8. Mikrosertlik test cihazı

Ti ve Sr modifikasyonunun alfa Al ve ötektik Si'ye etkisinin incelenmesi için kullanılmıştır. İlgili ölçüm cihazı ile Vickers (HV) ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Mikrosertlik ölçümünde kullanılan cihaz Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. SHIMADZU HMV marka cihaz.

4.1.2. Tahribatsız muayene yöntemleri

4.1.2.1. RT-D görüntülemeye kullanılan x ışını radyografi cihazı

Tüm yapılacak testlere porozitenin etkisini minimize etmesi için NDT (Tahribatsız muayene) yöntemlerinden biri olan RT-D Dijital radyografik testi X ışını radyografi test yöntemi kullanılmıştır. Görüntülemeye farklı hataları (porozite, çekinti, döküm boşluğu, yabancı madde gibi) görebilmek için kullanılan cihaz Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.11. YXLON MU 2000 (160 kW) marka radyoskopi cihazı.

4.1.3. Tahribatlı muayene yöntemleri

4.1.3.1. Çekme testi

5 farklı alaşımda elde edilen numunelerdeki yüzde (%) kimyasal kompozisyonun numuneler üzerindeki etkisini görebilmek için çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testinde silindirik numune kullanılmıştır. Çekme testlerinde Zwick/Roell Z050 marka 250 kN kapasiteli cihaz kullanılmıştır. Çekme testlerinin uygulandığı cihazın görseli Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Zwick/Roell Z050 marka model cihaz.

4.1.3.2. Dayanım testi

5 farklı alaşımda elde edilen numunelerdeki yüzde (%) kimyasal kompozisyonun numuneler üzerindeki etkisini görebilmek için basma testine tabi tutulmuştur. Kalıcı deformasyon oluşumunda yüzde (%) uzamanın analiz edilmesi için MARESTEK marka 200 kN kapasiteli cihaz kullanılmıştır. Basma testlerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görsel Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Marestek marka cihaz.

4.1.4. Araştırmada kullanılan alaşım ve malzemeler

Çalışmamızda kullanılan malzemeler aşağıdaki gibidir.

4.1.4.1. Kullanılan alaşım malzemeleri

Deneyisel çalışmada Al-Si alaşımlarından AlSi12(Fe) alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın uluslararası standartlarda karşılığı EN AC 44300 (EN), ISO AlSi12(Fe) (DIN EN 1676), ETİAL140 (Eti Alüminyum), LM6(UK), A-S13(FR), UNI 4514, AC3A(JPN) ve AA/ASTM-A413(USA) olarak bilinmektedir.

Katkısız AlSi10(Fe) için Ti ve Sr ilavesi yapılmadan alaşıma ait yüzde (%) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1’de verilmektedir. AlSi12(Fe) alaşımının yüzde (%) aralıkları içerisinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan katkısız AlSi12(Fe) alaşımının yüzde kimyasal kompozisyonu.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%
Ort.12,0842	0,8100	0,0857	0,0927	0,2879	0,0142	0,0804
Min.10,5	0,45	0	0			0
Max.13,5	1	0,1	0,55			0,15
Ni%	B%	Be%	Co%	Ca%	Cd%	Pb%
Ort.0,0168	0,0044	<0,003	0,0065	0,0062	<0,001	0,0097
					0	0
					0,01	0,1
Sn%	Ti%	V%	Sr%	Al%		
Ort.0,0047	0,0477	0,0147	0,002	86,4309		
	0					
	0,15					

4.1.4.2. Kullanılan modifiye edici malzemeler

Alüminyum modifikasyonu için AlTi5B1 master alaşımı kullanılmıştır. AlTi5B1 master alaşımı, 10 mm çapında 500 mm uzunluğunda çubuk formunda kullanılmıştır. Deneyisel çalışmada kullanılan master alaşımının yüzde (%) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Deneyisel çalışmada kullanılan AlTi5B1 master alaşımının ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu.

Master Alaşım	Al	Ti	B	Si	Fe	Mg
AlTi5B1	Kalan	5,1	1,1	<0,15	<0,20	<0,10

Silisyum modifikasyonu için AlSr10 master alaşımı kullanılmıştır. AlSr10 master alaşımı, 10 mm çapında 750 mm uzunluğunda çubuk formunda kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada kullanılan master alaşımının yüzde (%) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Deneyisel çalışmada kullanılan AlSr10 master alaşımının ağırlıkça yüzde kimyasal kompozisyonu.

Master Alaşım	Al	Sr	Fe	Si	Ca	Mg
AlSr10	Kalan	9-11	<0,30	<0,30	<0,10	<0,10

4.1.5. Araştırmada hazırlanan numuneler

Çalışmamızda kullanılan numuneler ve hazırlık aşamaları aşağıdaki gibidir.

4.1.5.1. Döküm numunelerinin hazırlanması

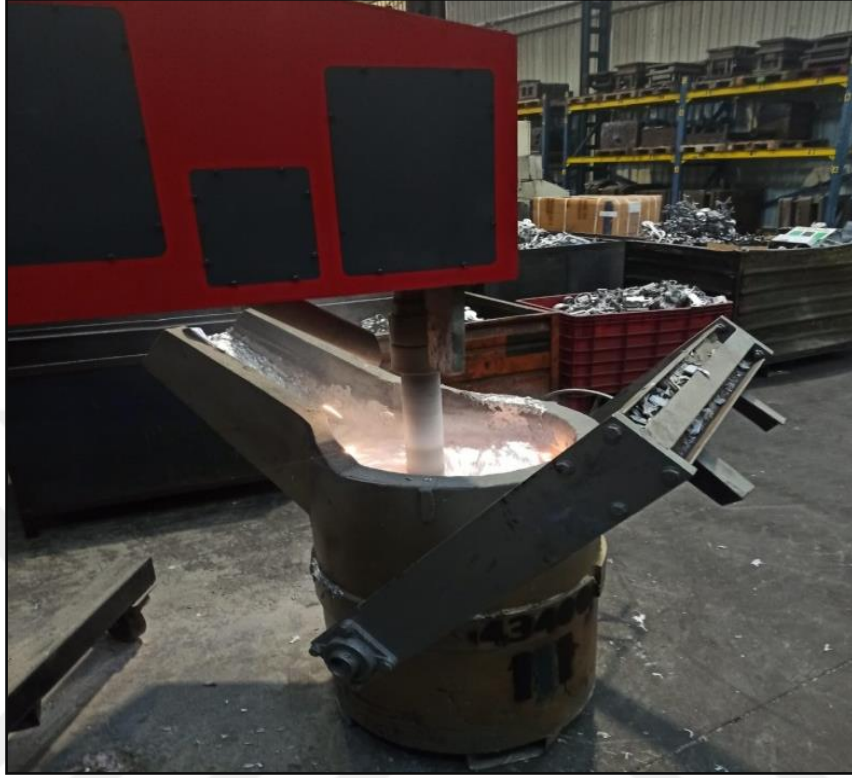
AlSi12(Fe) alaşımı (%70 külçe, %30 yolluk), devirmeli ergitme ocağında 780°C–850°C arasında ergitildi ve cüruf temizliği yapılmıştır. Ergitme prosesinin görseli Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Devirmeli ergitme fırını ile gerçekleştirilen ergitme prosesi.

Ergiyik metal 300 kg kapasiteli taşıma potasına aktarılmıştır. Taşıma potasında gaz alma işlemi yapılmıştır. 750°C±30°C’de Rotary Degassing makinesinde bulunan döner shaftın delikli kafa kısmından ergiyik metale uygulanan azot gazı çıkışı sayesinde 400

sn sıvı metal gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur. Gazlarla beraber maden bifilmelerden de temizlenmiştir. Rotary Degassing ile gerçekleştirilen gaz giderme işlemine ait görsel Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Rotary Degassing ile gerçekleştirilen gaz giderme prosesi.

Vorteks oluşumu gözlemlenmiştir ve ergiyik metalin daha iyi temizlenmesi için 300 saniyede dalgakıran madenin içerisine daldırılmıştır. Dalgakıran ergiyik metal içerisindeki cürufun daha iyi toparlanması sağlamıştır. Sonrasında kevgir yardımıyla cüruf temizliği yapılmıştır. Temizlenen ergiyik, 300 kg’lık taşıma botasıyla 1100 ton mengene kapama kuvveti kapasitesine sahip Metal Pres marka enjeksiyon presindeki 500 kg bekletme potasına taşınmıştır. Alaşımın döküm sıcaklığı $680^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ tolerans aralığında tutulmuştur. Ayrı ayrı deneysel çalışmada kullanılan yüzde (%) kimyasal kompozisyonları bu işlemlere tabi tutulmuştur ve hesaplamalar yapılarak aşağıdaki gibi üretilmiştir. Numune ilavesiz döküm yapılmıştır.

1. Numune- %0,08 oranında Ti değerinin elde edilmesi için 3500 gr AlTi5B1 sıvı metale ilave edilmiştir.
2. Numune- 150ppm Sr değerinin elde edilmesi için 450 gr AlSr10 sıvı metale ilave edilmiştir.

3. Numune- 300ppm Sr değerinin elde edilmesi için 900 gr AlSr10 sıvı metale ilave edilmiştir.
4. Numune- 450ppm Sr değerinin elde edilmesi için 1275 gr AlSr10 sıvı metale ilave edilmiştir.

Her numune denemesinde için spektral analiz yapılarak kimyasal kompozisyonu kontrol edilmiştir. Ti ve Sr ağırlıkça yüzde (%) kimyasal kompozisyonu hedeflenen değerde olduğunda döküm yapılmıştır. Döküm alışması 30 dakika içerisinde bitirilmiştir. Aynı işlemler tüm deneysel çalışma numuneleri için uygulanmıştır.

4.1.5.2. Spektral analiz numunesi

Bekletme potasında homojen yapı elde edilmesi için 10 dakika bekledikten sonra kimyasal analiz için manuel kepçe yardımıyla mantar numuneleri alınmıştır. Alınan numunelerin yüzeyi 80D kum zımpara ile paso kaldırılarak analize hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler şekil 4.16’da gösterilmiştir.



şekil 4.16. Spektral analiz numuneleri.

şekil 4.16’da 1-Katkısız AlSi10(Fe) numunesi; 2-%0.08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesi; 3-150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesi, 4-300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesi; 5-450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesi gösterilmiştir.

Al modifikasyonu için kullanılan AlTi5B1 ilavesi sonrasında gerçekleştirilen, artan Ti oranına bağlı olarak döküm baskısı öncesinde ergiyik metalden alınan spektral analiz numunesinin ağırlıkça yüzde (%) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça %0.08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%
12,0791	0,8000	0,0835	0,097	0,2764	0,0128	0,0806
10,5	0,45	0	0			0
13,5	1	0,1	0,55			0,15
Ni%	B%	Be%	Co%	Ca%	Cd%	Pb%
0,0160	0,0089	<0,0003	0,0064	0,0064	<0,001	0,0092
					0	0
					0,01	0,1
Sn%	Ti%	V%	Sr%	Al%		
0,005	0,0820	0,0151	0,00033	86,4171		
	0					
	0,15					

Si modifikasyonu için kullanılan AlSr10 ilavesi sonrasında gerçekleştirilen, artan Sr oranına bağlı olarak döküm baskısı öncesinde ergiyik metalden alınan spektral analiz numunesinin ağırlıkça yüzde (%) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.5’te verilmektedir.

Tablo 4.5. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%
11,6736	0,7496	0,0853	0,074	0,2708	0,0153	0,0658
10,5	0,45	0	0			0
13,5	1	0,1	0,55			0,15
Ni%	B%	Be%	Co%	Ca%	Cd%	Pb%
0,0149	0,0061	<0,0003	0,0064	0,0111	<0,001	0,0085
					0	0
					0,01	0,1
Sn%	Ti%	V%	Sr%	Al%		
0,0046	0,0717	0,0131	0,0134	86,9211		
	0					
	0,15					

Tablo 4.6. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%
11,7753	0,7542	0,0979	0,0931	0,2625	0,0103	0,0915
10,5	0,45	0	0			0
13,5	1	0,1	0,55			0,15
Ni%	B%	Be%	Co%	Ca%	Cd%	Pb%
0,0141	0,0074	<0,0003	0,0064	0,0075	<0,001	0,0079
					0	0
					0,01	0,1
Sn%	Ti%	V%	Sr%	Al%		
0,005	0,0630	0,0161	0,0329	86,7536		
	0					
	0,15					

Tablo 4.7. Deneysel çalışmada kullanılan ağırlıkça 450 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının yüzdelik kimyasal kompozisyonu.

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%
11,5079	0,7281	0,0957	0,0894	0,2525	0,0101	0,09
10,5	0,45	0	0			0
13,5	1	0,1	0,55			0,15
Ni%	B%	Be%	Co%	Ca%	Cd%	Pb%
0,0133	0,0095	<0,0003	0,0064	0,0081	<0,001	0,0073
					0	0
					0,01	0,1
Sn%	Ti%	V%	Sr%	Al%		
0,0051	0,0683	0,0158	0,0491	87,0422		
	0					
	0,15					

4.1.5.3. X-Ray numunesinin hazırlanması

Kimyasal analiz yapıldıktan sonra döküm parça baskısı yapılmıştır. Elde edilen yolluklu numune Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Yolluklu numune parçası.

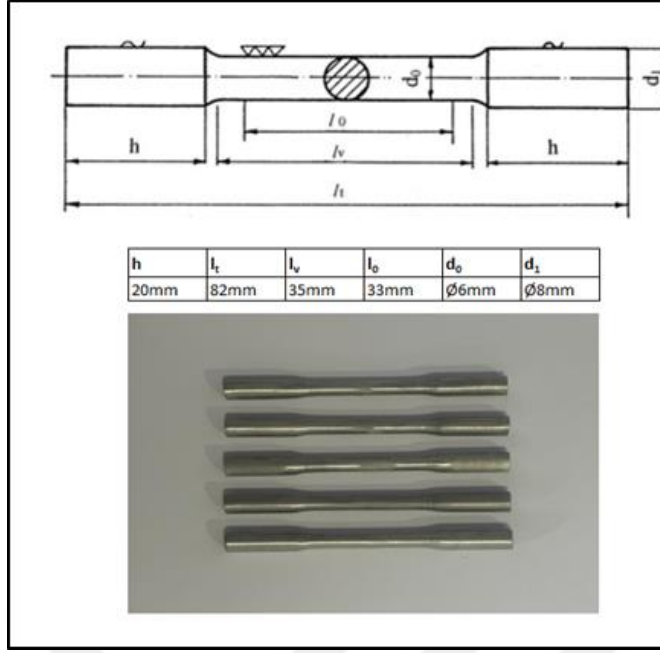
Yolluklu parçalar trim kalıbında kesildikten sonra NDT yöntemi olan RT-D yöntemiyle analiz için hazırlanmıştır. Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. NDT yöntemlerinden X-Ray muayenesi için hazırlanan numune görselleri.

4.1.5.4. Çekme çubuğu numunesinin hazırlanması

Salkımlı üretilen parçanın en kalın dolu kesitinden numune alınarak Üniuersal Tornada numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numune ölçü ve görselleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Silindirik çekme test çubuğunun ölçüleri ve çekme testi numune görselleri.

4.1.6. Araştırmada kullanılan deneysel analizler

Çalışmamızda uygulanan deneysel analizler aşağıdaki gibidir.

4.1.6.1. Sertlik testi

Sertlik ölçümünde, 5 farklı kompozisyondaki numuneler için her bir farklı kompozisyondaki döküm parçasının et kalınlığı 12mmX12mm bölgesinden numune parçaları alınmıştır. Her bir numune parçası sırasıyla 240, 400, 800, 1000 ve 1200 grid derecelerinde kâğıtlar kullanılarak numuneler zımparalanmıştır. Yüzeyin düz ve paralel olması ölçüm sonucu doğruluğu için kritiktir. Hazırlanan numuneler bu hassasiyete uygun üretilmiştir. Sertlik ölçümünde 5 farklı döküm parametresi için (Katkısız AlSi10(Fe), %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe), 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe), 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe), 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) her bir numuneden 10 adet ölçüm 62,5 kg yük uygulanarak alınmıştır. Alınan sonuçlarda en düşük ve en yüksek sonuçlar elimine edilip sonuçların ortalaması alınmıştır.

4.1.6.2. Mikrosertlik testi

Mikrosertlik ölçümünde α -Al matrisi ve örektik silisyum üzerinden ölçümler alınmıştır. Dağlanmış numuneler üzerinde 5 farklı döküm parametresi için (katkısız AlSi10(Fe), %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe), 150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe), 300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe), 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) her bir numuneden 10 adet ölçüm alınmıştır. Mikrosertlik ölçümü işleminde, 10 saniye 25 kg yük uygulanmıştır.

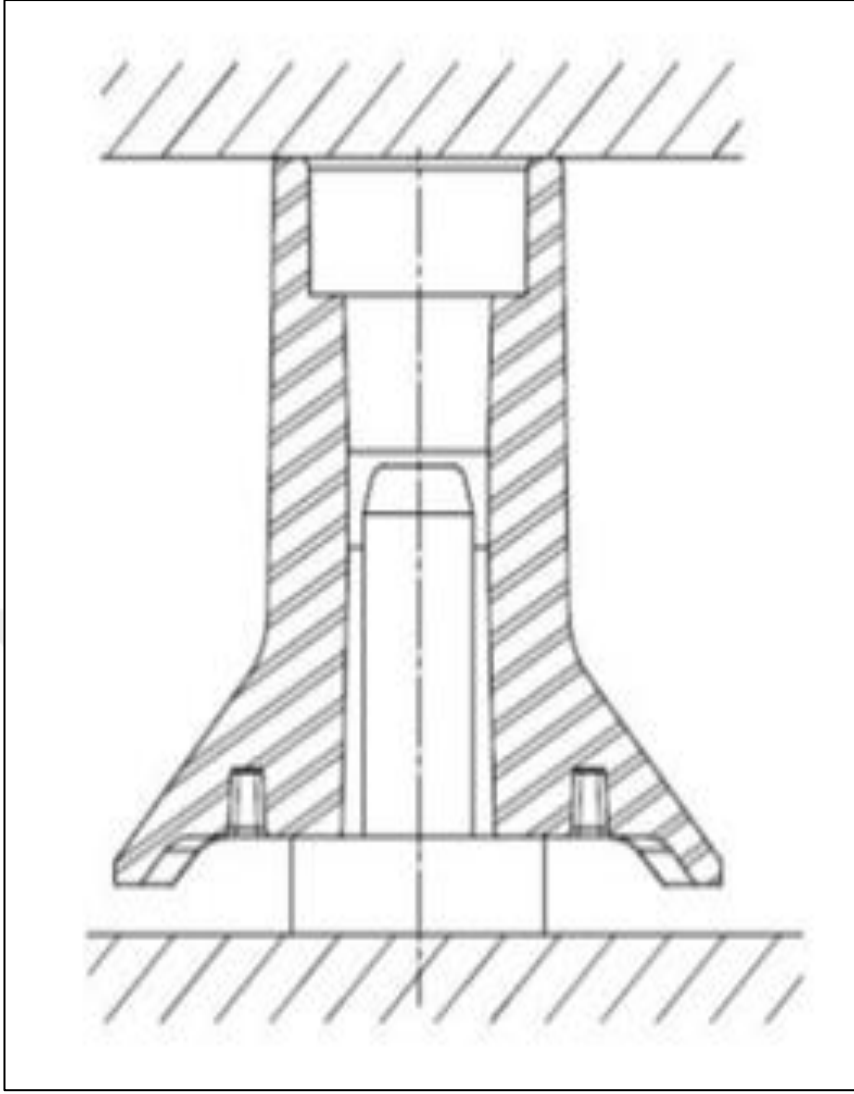
Uygulanan yük sonrasında numune yüzeyinde oluşan izin çapı, optik gözlemleyici sayesinde hem x hem de y ekseninde izlerin en uç noktasına çizgiler gelecek şekilde ayarlanarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan en düşük ve en yüksek değerler çıkarılarak ortalama alınmıştır.

4.1.6.3. Çekme testi

5 farklı numuneden elde edilen silindirik çekme çubukları için gerçekleştirilen çekme testleri, ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı standarta bağlı olarak 1 mm/dk olarak belirlenmiştir. Gerçek yüzde (%) uzama hesaplayabilmek için 25mm-40mm boyutu aralığında ekstensometre kullanılmıştır. Ön yük 5kg ve 0.5mm/dk olarak uygulanmıştır. Her bir parametre için 5 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde numunelere ait çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve yüzde (%) uzama değerleri alınmıştır.

4.1.6.4. Basma testi

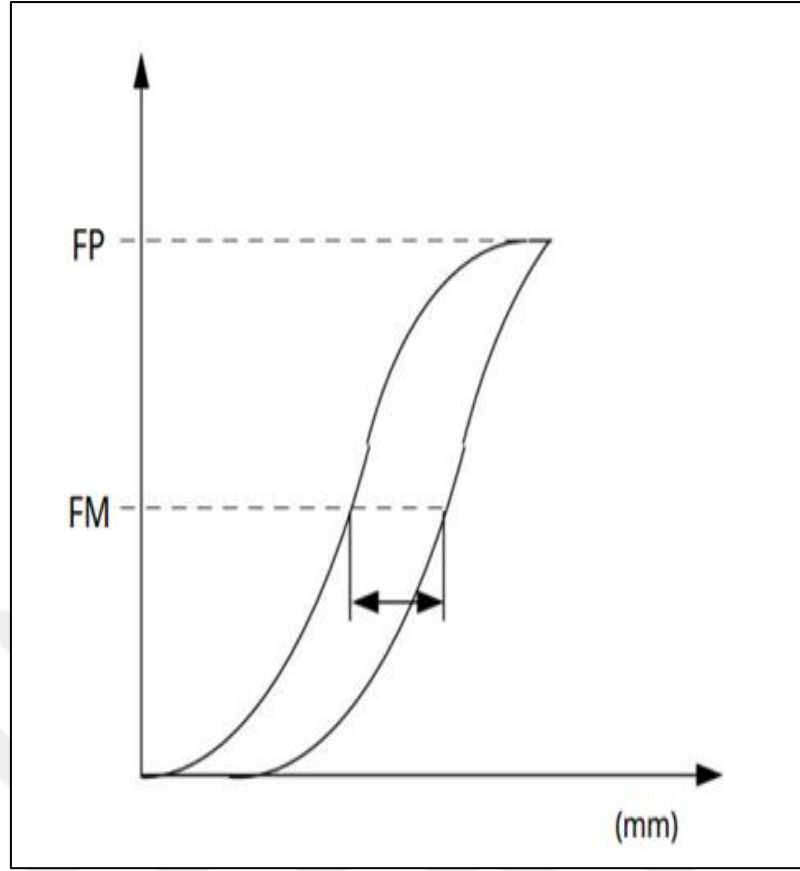
5 farklı numuneden elde edilen yolluksuz numuneler, BIS 452 ve ISO 7500-1 ek 1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numune test uygulama görseli Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Basma testi uygulama şekil görseli arasındaki mesafesi.

Basma hızı standartta bağlı olarak 2 mm/dk olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek yüzde (%) Deformasyon Uzamasını hesaplayabilmek için 25mm-40mm boyutu aralığında ekstensometre kullanılmıştır. Uygulama max FP uygulanmıştır ve FM de ön yük uygulaması bitirilmiştir. FP yüküne çıkıldıktan sonra ezme işlemi tekrar geri döndürülerek FM de ki deformasyon farkı hesaplanmıştır. Aradaki fark yüzde (%) deformasyon uzamasını vermiştir.

Numune 65 HRC sertlikte iki plaka arasına yerleştirilerek yük aksenal yönde uygulanmıştır. 65 kN (uygulanacak yükün $\frac{1}{2}$ si kadar) ön yük uygulanmıştır ve yüzde (%) deformasyon uzaması uygulanan ilk yük ve son 65 kN yük arasındaki değişim olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Her bir alaşım için 5 adet basma testi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde numunelere ait yüzde (%) deformasyon uzama değerleri alınmıştır.



Şekil 4.21. Yüzde (%) deformasyon uzaması eğriler arasındaki mesafesi.

4.1.6.5. Mikroyapı incelemeleri

Test numuneleri için döküm numunesinin et kalınlığı 12mmX12mm bölgesinden numune parçaları alınmıştır. 5 farklı numune parçası sırasıyla 240, 400, 800, 1000 ve 1200 grid zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Yüzeyin düz ve paralel olmasına dikkat edilmiştir. Her zımpara değişiminde oluşan çizgilere dik 90° olacak şekilde zımparalama işlemine devam edilmiştir. Zımparalama işlemi su ile yapılmıştır. Yüzeyde çizik oluşmamasına dikkat edilmiştir. Su kullanımı ayrıca numunenin ısınmasını minimize edilmiştir. Isıl genleşme olmaması için numunelerin ısınmasına dikkat edilerek zımparalama işlem süresi kısa sürelerde bekletilerek yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra oksitlenme olmaması için numuneler kurutulmuştur. Sonrasında numuneler parlatılmıştır. Parlatma işlemi için cuha (demir dışı parlatma cuhası) koloidal silika kullanılmıştır. Parlatma sonrasında görüntüler alınmıştır ve dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama sonrası da optik görüntülere bakılmıştır. Dağlama keller çözeltisi hazırlanarak yapılmıştır. Keller kompozisyonu Tablo 4.8’de verilmiştir. Mikroyapısal inceleme işlemine hazır olan numuneler NIKON Eplipse L150 marka optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Tablo 4.8. Keller çözeltisinin kompozisyonu.

Daglayıcı	Kompozisyon
	Saf Su 190 ml
Keller Çözeltisi	Nitrik Asit(kons.) 5 ml
	Hidroklorik Asit(kons.) 10 ml
	Hidroflorik Asit(%48) 2ml

İncelemeler sonucunda X5, X10,X20, X50 ve X100 büyütme için görüntüler alınmıştır.

4.1.6.6. SEM analizleri

Optik mikroskop görüntüleri alındıktan sonra numuneler SEM cihazında görüntüleri alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Ti ve Sr modifikasyonu sonrası mikroyapı numuneleri X250 ve X1000 büyütme analiz görüntüleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizinde geri saçmalı elektron dedektörü (BSED) kullanılmıştır. Elde edilen görüntülerden; noktasal ve alansal EDS analizi grafikleri ve görselleri elde edilmiştir. Grafiklerden yüzde (%) kimyasal kompozisyonları elde edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Sertlik ölçümleri

Her biri farklı kompozisyonda dökülen 5 farklı alaşımlı parçalardan kesit alınıp hazırlanan test numunelerinin sertlik değerlerinin ortalaması Tablo 5.1’de verilmiştir. Katkısız AlSi10(Fe) sertliği Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla sertlik değerinin 5 HB arttığı gözlemlenmiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen her 150ppm Sr artışıyla alaşımların sertlik değerinde doğrusal bir artış gözlemlenmiştir. En yüksek sertliğe sahip alaşım 450ppm Sr içeren AlSi10(Fe) alaşımıdır.

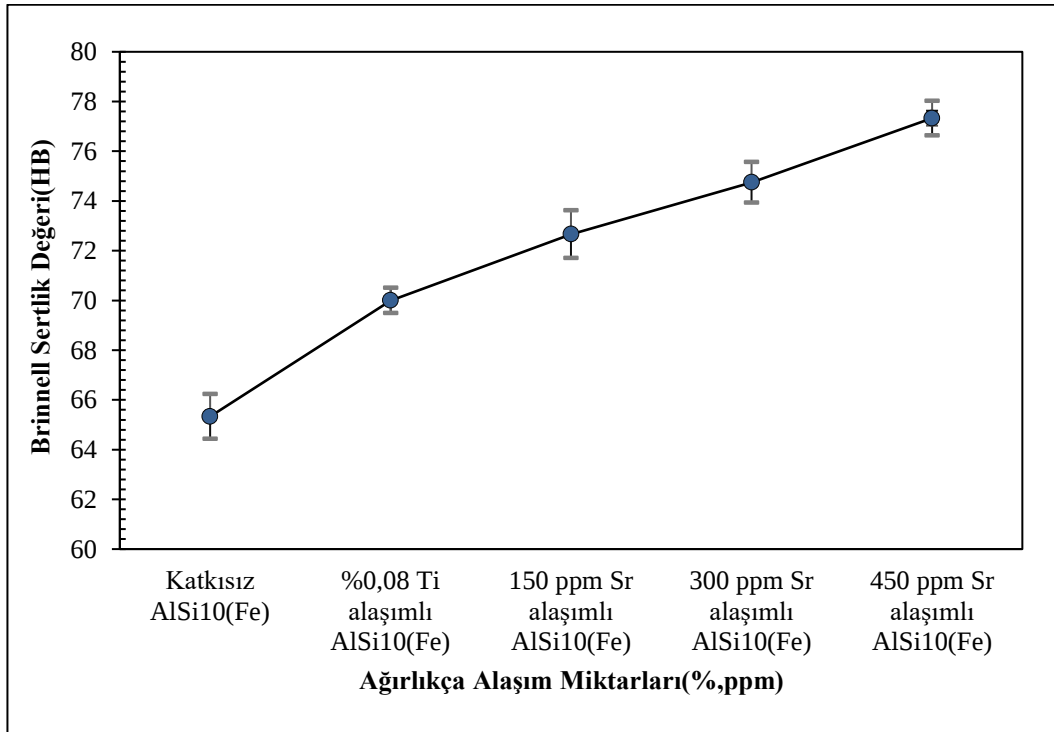
Tablo 5.1. Brinell sertlik değerleri ortalaması.

No	Alaşımlar	Sertlik Değeri (HB)
1	Alaşım[AlSi12(Fe)]	65,3
2	Alaşım + %0.08 Ti	70
3	Alaşım + %0.08 Ti + 150ppm Sr	72,7
4	Alaşım + %0.08 Ti + 300ppm Sr	74,8
5	Alaşım + %0.08 Ti + 450ppm Sr	77,3

Yüksek basınçlı dökümde %0,08 Ti oranlı AlSi12(Fe) alaşımının tane incelmesiyle sertliğindeki artış sonrasında yapılan Sr ilavesiyle dahada yükselmiştir. Sertlik değerindeki artış ilave oranıyla orantılı yükselmiştir. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının sertliği 2,5HB, 300ppm Sr artış alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının sertliği 5HB ve 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımının sertliği 7,5HB arttığı gözlemlenmiştir. Sertlik değişimlerdeki eğri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Rodriguez ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, döküm Al–12Si alaşımının tane incelmesinin (Al–5Ti–1B) ve modifikasyonun (Al–10Sr) mikroyapı, morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi aratmıştır. Tane incelmesi ve modifikasyonu, β -fazının iğne şekli morfolojisine dönüştürmüştür. Tane inceltme ve sırasıyla Ti ve Sr ilavesiyle yapılan modifikasyon, dökümün kalite indeksini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Ağırlıkça %0,06 Sr eklenmesi, nihai çekme mukavemeti ve süneklik gibi mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonu ile sonuçlanmış. Mevcut araştırmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır; Al-12Si bazlı alaşımda optimum miktarda Al-Ti-B ana alaşımı (ağırlıkça %0,00125 Ti) ile alaşımın tane incelmesi, Al-Fe-Si intermetalik faz bileşiklerinin boyutunu azaltır ve iğnemsiz β -morfolojisini dönüştürür. Benzer şekilde, alaşımın, Al-12Si bazlı alaşımında optimum miktarda Al-Sr ana alaşımları (ağırlıkça %0,06 Sr) ile modifikasyonu, ötektik Si parçacıklarını rafine eder ve iğnemsiz β -fazını ince küresel yapı morfolojisine dönüştürmüştür. Al-Ti-B ve Al-Sr ana alaşımının eklenmesi, iğnemsiz β -fazının morfolojisini iyileştirdiğini ve bu da döküm Al-12Si alaşımının çekme mukavemetini ve % uzamasını artırdığı gözlemlenmiştir. Tane inceltici (Al-Ti-B) ve değiştiricinin (Al-Sr) optimum şekilde eklenmesi, çekme mukavemetinde ve süneklikte önemli bir artışa neden olduğu görülmüştür. Al-12Si alaşımının tane incelmesi ve modifikasyonu kalite indeksini arttırmıştır. Ayrıca modifikasyonun kalite indeksi üzerindeki etkisi tane incelmeye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Mikroyapı, mekanik özellikler ve kalite indeksi göz önüne alındığında, alaşımın çekme mukavemeti ve sünekliğinin en iyi kombinasyonunu elde etmek için Al-12Si alaşımına ağırlıkça %0,06 Sr veya ağırlıkça %0,00125 Ti eklenmesi önerilmiştir [79].



Şekil 5.1. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen ortalama sertlik değerleri.

Hekimoğlu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [80], kalıba döküm yöntemiyle alüminyum alaşımları elde etmiş ve çinko ilavesinin mekanik özelliklere ve morfolojisine etkisini araştırmıştır. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi spektral analiz yöntemiyle belirlemiştir. Alaşımların mikroyapıları optik ve SEM ile incelemiştir. Alaşımların sertliği ve mikrosertliği sırasıyla Brinell ve Vickers ölçüm yöntemiyle yapılmış ve mekanik özellikleri için çekme testi uygulamıştır. Al-17Si-4Cu-0.6Mg-0.2Ti-(0-5) Zn alaşımlarının mikroyapısının alüminyumca zengin α -Al, ötektik Al-Si, birincil silisyum, bakırca zengin θ (CuAl_2), Mg_2Si ve π fazları. Ayrıca Al-17Si-4Cu-0.6Mg-0.2Ti alaşımında çinko ilavesinin yeni bir faz oluşumuna yol açmadığı da gözlenmiştir. Üretilen alaşımların sertliği çinko içeriğinin artmasıyla artmış ancak akma ve çekme mukavemeti ile aşınma direnci %3 çinko içeriğine kadar arttığı ve bu orandan sonra azaldığını gözlenmiştir. Aşınma numunelerinin yüzeylerinde sıvanmış tabakalar, ince çizikler ve soyulmalar görülmüştür. Aşınma testleri sonrasında toplanan aşınma parçacıklarının morfolojisi çinko içeriğiyle önemli bir değişiklik göstermediğini gözlenmiştir [80].

5.2. Mikrosertlik ölçümleri

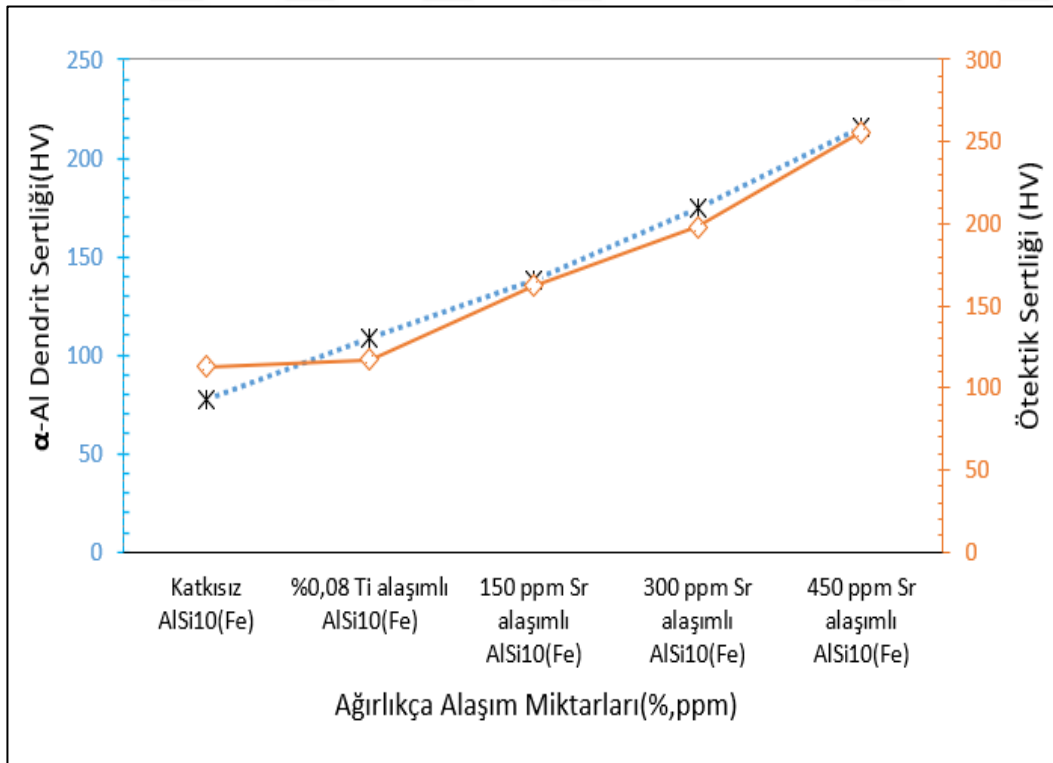
Ti ve Sr modifikasyonu sonrası oluşan α -Al dendirit ve ötektik silisyum fazlarının ortalama mikrosertlik değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir. α -Al dendirit mikrosertlik değerlerinde katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla mikrosertlik değeri belirgin bir artış göstermiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen her 150ppm Sr artışıyla alaşımların mikrosertlik değerinde doğrusal artışın devam ettiği gözlenmiştir. Ötektik Si mikrosertlik değerlerinde katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla mikrosertlik değeri belirgin bir artış göstermemiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen her 150ppm Sr artışıyla alaşımların mikrosertlik değerinde doğrusal artışın devam ettiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.2. Vickers mikrosertlik değerleri ortalaması.

No	Alaşımlar	α -Al dendirit (HV)	Ötektik Si (HV)
1	Alaşım[AlSi12(Fe)]	77	113
2	Alaşım + %0.08 Ti	109	117
3	Alaşım + %0.08 Ti + 150ppm Sr	138	162
4	Alaşım + %0.08 Ti + 300ppm Sr	175	198
5	Alaşım + %0.08 Ti + 450ppm Sr	216	256

Türker ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [61], tikso-döküm yöntemiyle üretilen AlSi12 alaşımlarının eser miktarda gümüş içeren mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini üzerine çalışmışlardır. Tikso-döküm yönteminin küresel α -Al morfolojisinin yanı sıra intermetaliklerin morfolojisi ve Si oluşumu üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Tikso analizleri sırasında intermetaliklerin kırıldığı gözlemlenmiştir. Intermetaliklerin ince dağılımının, Tikso alaşımlarının geliştirilmiş mekanik özelliklerine yönelik bir mekanizma olduğuna sonucuna varmışlardır. Ayrıca Si parçacıkları hem izotermal ısıtma hem de tikso sırasında gözlemlenmiştir ve mekanik özelliklerde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtmişlerdir [61].

α -Al dendrit mikrosertlik değerlerinde %0,08 Ti oranlı AlSi12(Fe) alaşımlarının tane inceliğiyle mikrosertliğindeki doğrusal artış sonrasında her bir 150ppm Sr ilavesindeki artış yaklaşık 35HV olarak gözlemlenmiştir. Ötektik Si mikrosertliğine baktığımızda Ti ilavesinin Si sertliğine belirgin etki etmediğini fakat Sr ilavesinin Si modifikasyonu sonucu mikrosertlikteki artışın yaklaşık her bir 150ppm artışta yaklaşık 40 HV artış gösterdiği görülmüştür. α -Al dendrit ve ötektik Si mikrosertliklerinin değişimlerinin eğrileri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen ortalama mikrosertlik değerleri.

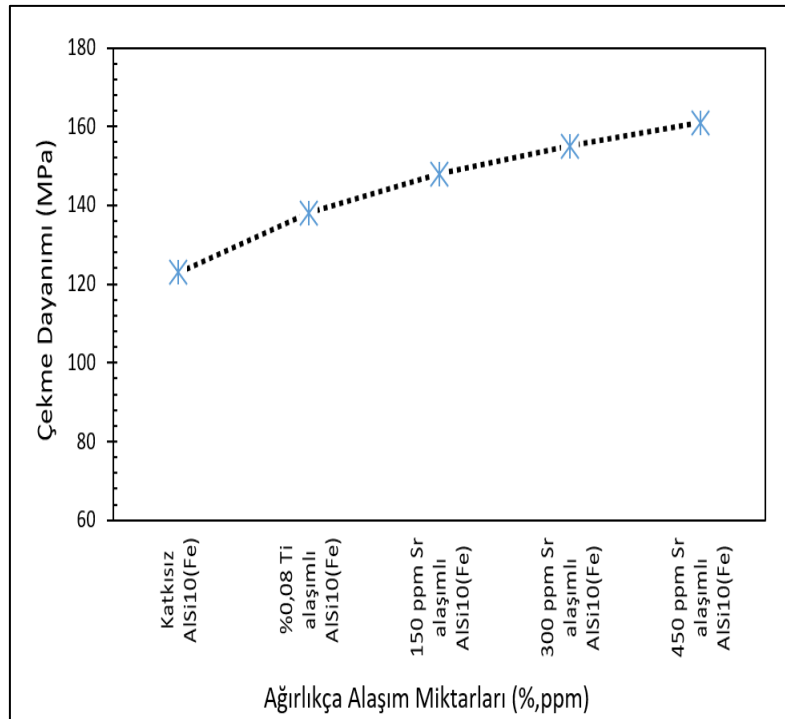
5.3. Çekme testi

Her biri farklı kompozisyonla dökülen 5 farklı alaşımlı parçalar üzerinde yapılan çekme testi deneyi sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı(σ_c) değerleri Tablo 5.3’de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Çekme dayanımı değerleri.

Ağırlıkça Alaşım	Çekme Dayanımı σ_c (N/mm ²)
Katkısız AlSi10(Fe)	123
%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe)	138
150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	148
300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	155
450 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	161

Katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla çekme dayanımında 15 MPa artış gözlemlenmiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen 150ppm Sr artışıyla alaşımın çekme dayanımı değerinde yaklaşık 10 MPa, 300 ppm Sr artışıyla alaşımın çekme dayanımı değerinde 7 MPa ve 450 ppm Sr artışıyla alaşımın çekme dayanımı değerinde 6 MPa artış göstermiştir. Çekme dayanımı değişimlerinin eğrileri Şekil 5.3’de verilmiştir.



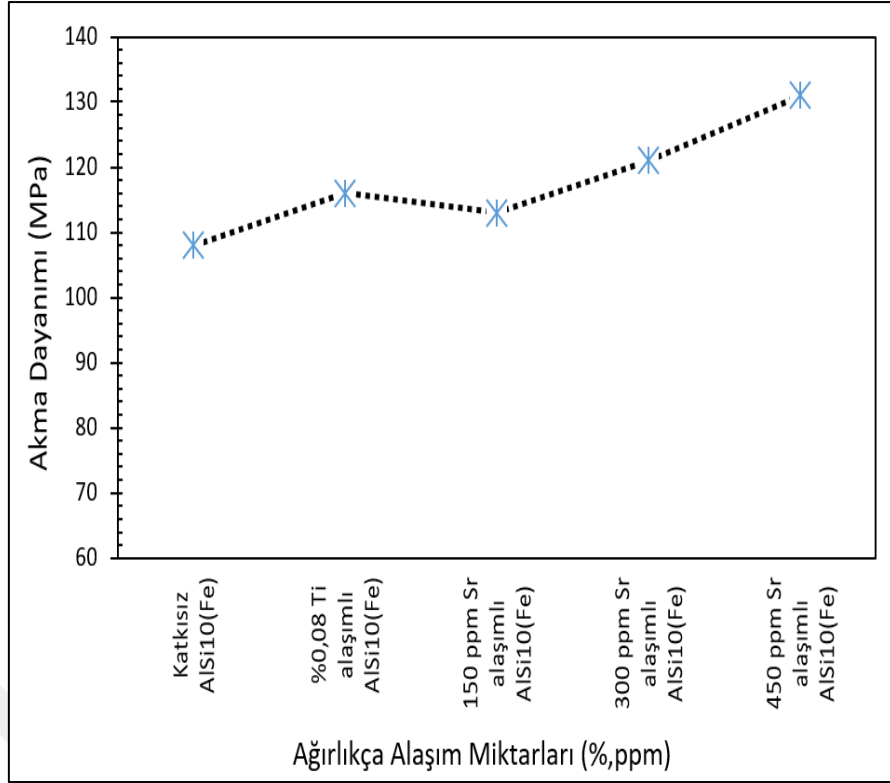
Şekil 5.3. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen çekme dayanımı (σ_c) değerleri.

Dong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Ti ve Sr'nin Al-Si-Cu-Ni alaşımasının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır [81]. Araştırmalar %0,1 Ti ve %0,02 Sr ilavesinin tane boyutunu önemli ölçüde azalttığını ve ötektik Si'nin morfolojisi, Sr, birikimleme hatalarının ve nano-Al₂Cu oluşumunu teşvik ettiği görülmüştür. Gücünün ve plastisitesinin önemli ölçüde arttı ve nihai çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama sonuçları sırasıyla 239,6 MPa, 140,6 MPa ve %2,11 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmada, Sr ve Ti'nin birlikte eklenmesinin, tek başına Sr veya Ti eklenmesiyle karşılaştırıldığında daha belirgin bir mikroyapıya sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Çökeltiler, Al-1₂Si-4.5Cu-2Ni alaşımında Al₂Cu, Al₃CuNi ve Al₇Cu₄Ni'yi içermekte olduğunu ifade etmişlerdir. Dayanım ve esneklik, birikimleme hatalarının ve nano-Al₂Cu'nun birleşik etkisi ile eş zamanlı olarak arttırmış ve alaşım kırılmadan sünekliğe geçiş yaptığı sonucuma ulaşmışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar çalışmamızı desteklemektedir [81]. Çekme testi deneyi sonuçlarından elde edilen akma dayanımı (σ_c) değerleri Tablo 5.4'de gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Akma Dayanımı değerleri.

Ağırlıkça Alaşım	Akma Dayanımı σ_a (N/mm ²)
Katkısız AlSi10(Fe)	108
%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe)	116
150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	113
300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	121
450 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	131

Katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla akma dayanımında 8 MPa artış gözlemlenmiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen 150ppm Sr artışıyla alaşımın akma dayanımı değerinde belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. 300ppm ve 450ppm Sr artışıyla alaşımın akma dayanımı değerinde yaklaşık 10 MPa artış gözlemlenmiştir. Akma dayanımı değişimlerinin eğrileri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen Akma Dayanımı(σ_c) değerleri.

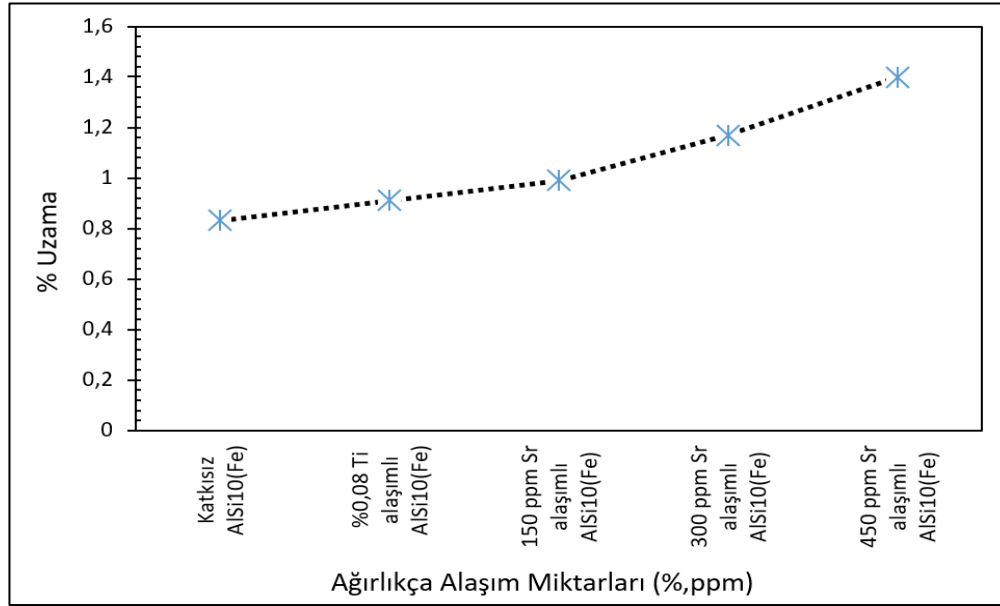
Çekme testi deneyi sonuçlarından elde edilen yüzde (%) uzama değerleri Tablo 5.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Yüzde (%) uzama değerleri.

Ağırlıkça Alaşım	% Uzama
Katkısız AlSi10(Fe)	0,83
%0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe)	0,91
150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	0,99
300 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	1,17
450 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	1,40

Katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla yüzde (%) uzama değerinde %0,08 artış gözlemlenmiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen 150ppm Sr artışıyla alaşımlım yüzde (%) uzama değerinde yaklaşık %0,07, 300ppm Sr artışıyla alaşımlımın çekme dayanımı değerinde %0,18 ve 450 ppm Sr artışıyla

alaşımın yüzde (%) uzama değerinde %23 artış gözlemlenmiştir. Yüzde (%) uzama değişimlerinin eğrileri Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak elde edilen yüzde uzama değerleri.

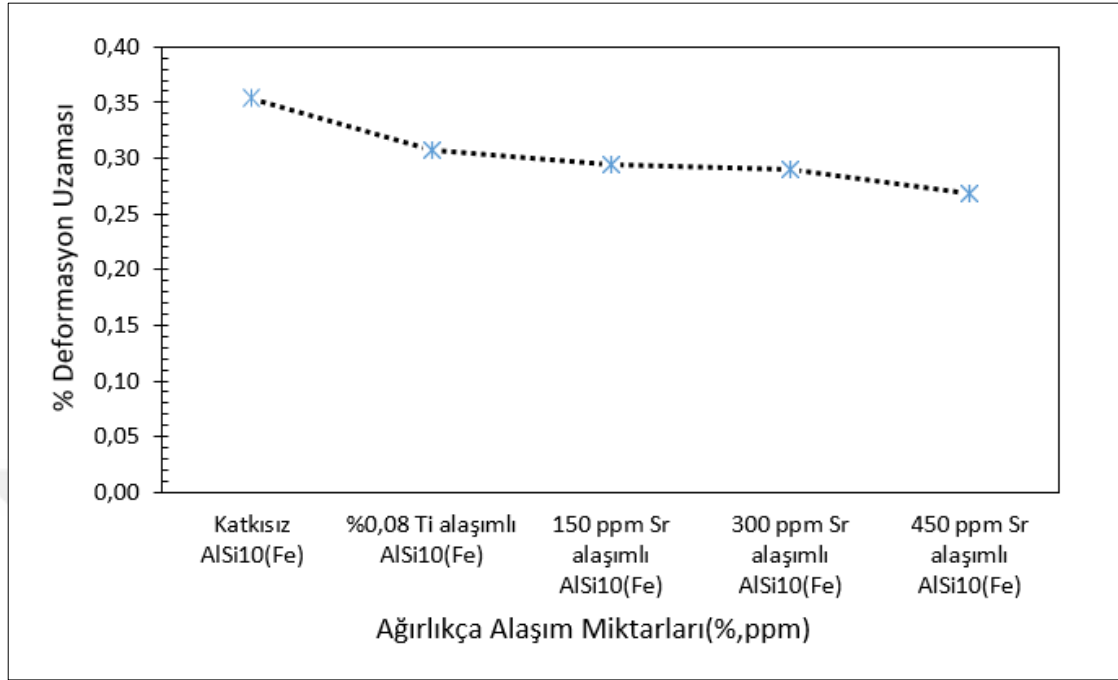
5.4. Basma testi

Her biri farklı kompozisyonla dökülen 5 farklı alaşımlı parçalar üzerinde yapılan basma testi deneyinde 130 kN yük altında uğradığı kalıcı yüzde (%) deformasyon uzaması değerleri Tablo 5.6.'da gösterilmiştir. Katkısız AlSi10(Fe) alaşımında Ti oranının %0,08 oranına çıkarılmasıyla yüzde (%) deformasyon uzamasında doğrusal bir artış göstermiştir. Ti oranının %0,08 oranında tutularak ilave edilen her 150ppm Sr artışıyla alaşımların yüzde (%) deformasyon uzaması değerinde doğrusal artış olmadığı fakat %1 oranında kalıcı deformasyonu uzamasını azalttığı gözlenmiştir.

Tablo 5.6. Basma testi sonucunda % Deformasyon Uzaması değerleri ortalaması.

No	Alaşımlar	130 kN yük altında yüzde (%) deformasyon Uzaması
1	Alaşım[AlSi12(Fe)]	0.335
2	Alaşım + %0.08 Ti	0.282
3	Alaşım + %0.08 Ti + 150ppm Sr	0.271
4	Alaşım + %0.08 Ti + 300ppm Sr	0.265
5	Alaşım + %0.08 Ti + 450ppm Sr	0.247

Basma dayanımı sonuçlarına ait kalıcı % deformasyon uzaması değerleri Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

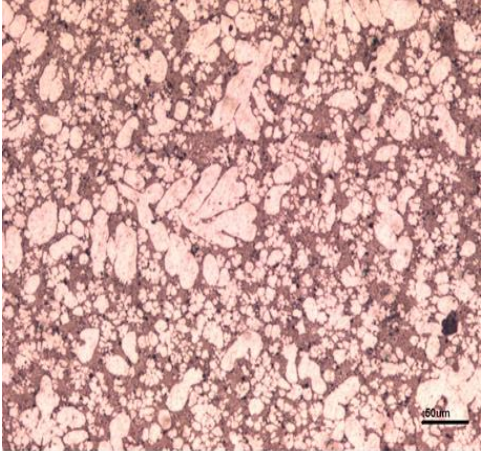
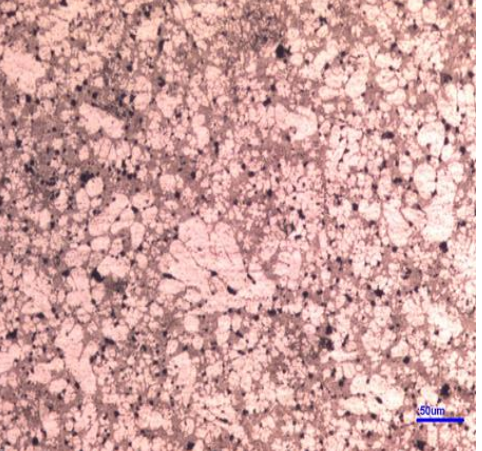
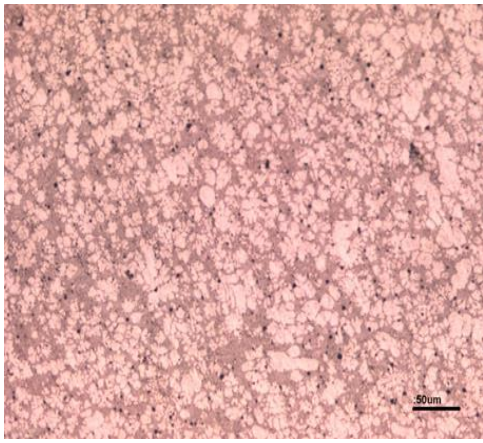
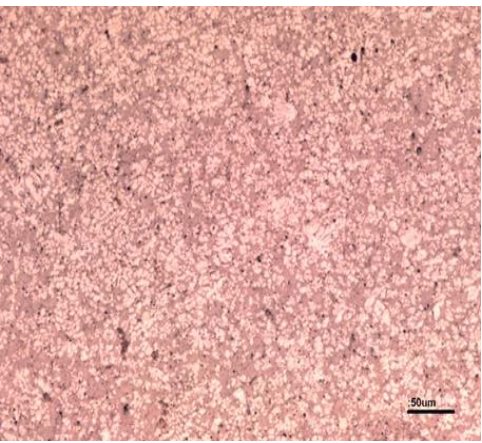
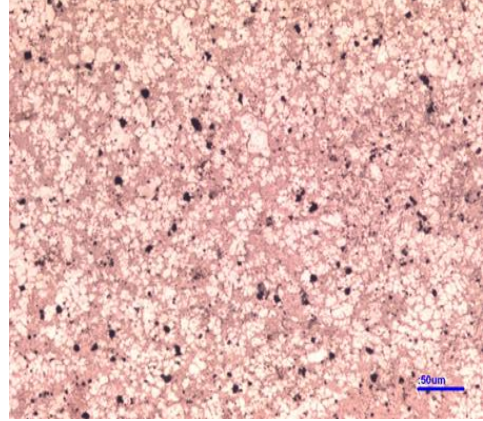


Şekil 5.6. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlara bağlı olarak 130 kN yük altında elde edilen ortalama yüzde deformasyon uzaması değerleri.

5.5. Mikroyapı analizleri

Her biri farklı kompozisyonla dökülen 5 farklı alaşımlı parçalardan alınıp parlatılmış ve dağlanmış. Optik mikroskopla yapılan incelemeler sonucunda Ti ve Sr modifikasyonu sonrası oluşan α -Al dendirit ve ötektik Si fazlarının mikroyapı görüntüleri Şekil 5.7’de gösterilmektedir.

Lipsinki ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, AlTi5B1 master alaşımı ile birlikte fosforun ötektik altı AlSi7Mg’nin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır [83]. Modifiye edici olarak farklı oranlarda titanyum, bor ve fosfor alaşıma dahil edilmiş. Yapılan testler sonucunda, eklenen master alaşımının etkisi doğrulanmıştır. Alaşımın farklı kimyasal bileşimleri için farklı bir mikroyapı morfolojisi elde edilmiştir. Ölçülebilir parametresi (elde edilenler arasında) en yüksek mekanik özellikler olan en olumlu modifikasyon etkisi, %0,25 Ti + %0,03 B + %0,2 P içeren alaşım için bulunmuştur. Ayrıca fosforun varlığında Ti ve B, ötektik altı AlSi7Mg’nin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkilediği sonucuna varılmıştır [83].

	
1- Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri	2- Yeniden %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri
	
3- Yeniden 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri	4-300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı götüntüleri
	
5- Yeniden 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı götüntüleri	

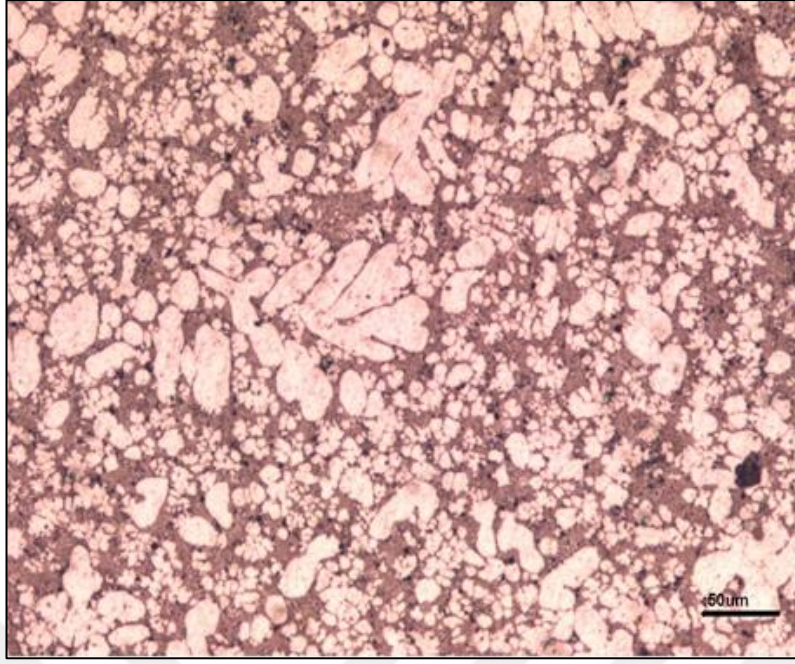
Şekil 5.7. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X10 büyütmede mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.7’de 1) Katkısız AlSi10(Fe); 2) %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe); 3) 150 ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe); 4) 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe); 5) 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

Modifiye edilmemiş mikroyapıyı incelediğimizde α -Al dendritlerinin büyük ve ötektik silisyum fazlarının büyük lamelli ve iğnemi parçacıklar olduğu gözlemlenmiştir.

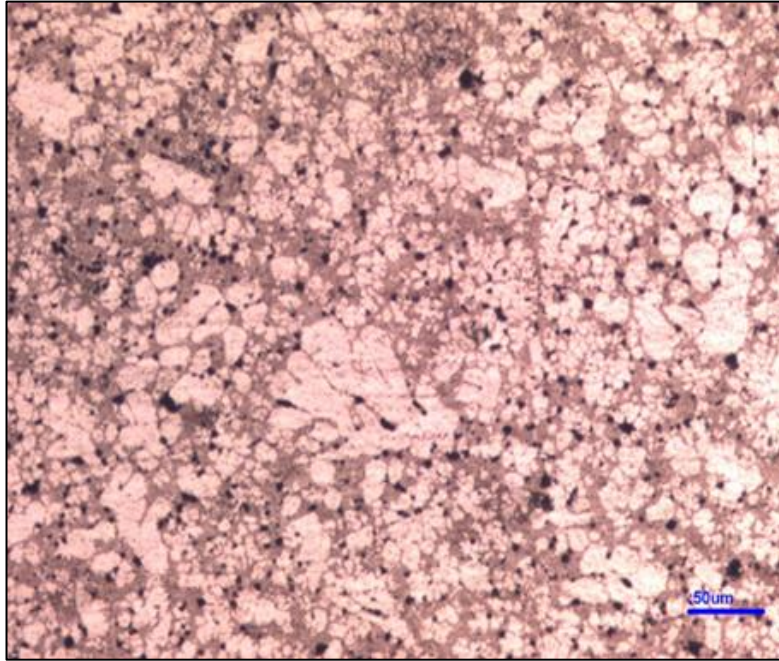
Yu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, safsızlıkların, Sr ilavelerinin ve soğutma hızının, yüksek saflıkta Al-10Si-0.3Fe'nin ve ilgili saf olmayan ticari alaşımların mikroyapısal gelişimi üzerindeki etkisi, optik mikroskopla ve yerinde X-ışını kırınımı 3D tomografisiyle incelemişlerdir [84]. Hızlı soğuma hızında ($\sim 470 \text{ K dk}^{-1}$) safsızlıkların varlığı birincil Al dendritlerin büyüme hızını azalttığı ve β fazının oluşumunu sağladığı görülmüştür. Ötektik Si'nin modifikasyonunun yanı sıra, Sr ilavesi β fazının oluşumunu engellediği ve Al dendritlerinin hacimsel büyümesini arttırdığı gözlenmiştir. Düşük bir soğuma hızı ($\sim 1 \text{ K dk}^{-1}$), α , γ , δ ve β intermetalik fazların oluşumuna yol açtığı ifade edilmiştir. Yavaş soğuma hızları sırasında oluşan metallerarası fazlar, hızlı soğuma sırasında oluşarlardan çok daha kabadır ve farklı morfolojilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, intermetalik fazların büyüme hızının ve nihai morfolojisinin ve boyutunun esas olarak soğuma hızı tarafından kontrol edilen difüzyon süreçleri tarafından belirlendiğini göstermektedir [84].

Samuel ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çeşitli tipteki tane incelticilerinin Sr modifikasyonunun darbe özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [85]. Hem döküm hem de ısıtılmalı işlem koşullarında sonuçları; Ti ve B'nin eklenmesi alaşımların tokluğunu büyük ölçüde artırmış, ancak bu yalnızca alaşım tamamen modifiye edildiğinde durum; ayrıca doğru tipte ana alaşım ve ilave seviyelerinin kullanılması gerektirdiği ifade etmiştir. En yüksek değerler T6 temperli alaşımlar için kaydedilen toplam emilen enerji, Al-%5Ti-%1B ve Al-%10Ti kullanılarak elde edilerek %0,04 Ti'ye ek olarak ana alaşımlar nedeniyle darbe özelliklerinde önemli bir bozulma gözlemlenmiştir. Sr-B etkileşimine (bazı durumlarda), dayanıklılıktaki iyileşmeler değişikliğe bağlanabilir Si parçacık morfolojisinin yanı sıra bazı intermetaliklerin çözünmesi ve parçalanması T6 sıcaklığı olduğu sonucuna varılmıştır [85].



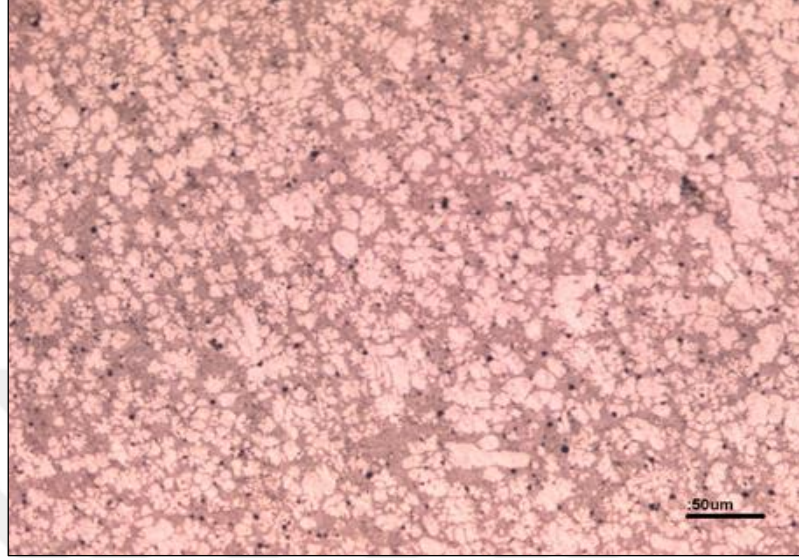
Şekil 5.8. Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.9’da %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntülerini incelediğimizde α -Al dendiritlerinin küçüldüğü gözlemlendi. α -Al dendiritleri kendi hallerinde olursa ısıtının tersi yönünde büyüdüğü büyür ve uzun yana doğru kollar çıktığı görülmektedir. Dendiritleri küçültmek tane boyutunu küçüklemeyle aynı şey olduğu için tane boyutunun küçüldüğü görüldü. Ancak Ti ilavesinin ötektik silisyumun mikroyapısına etki etmediği gözlenmiştir [79, 85].



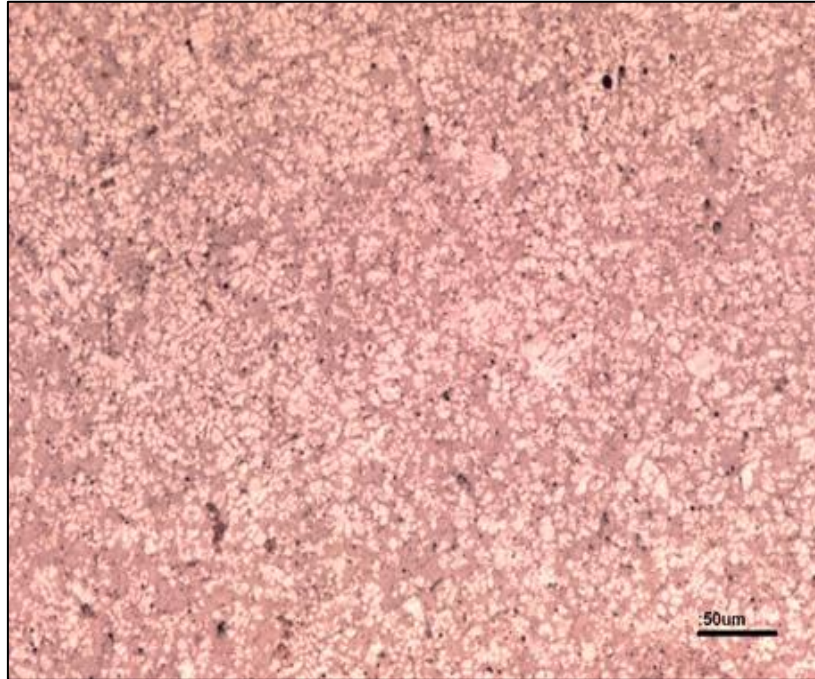
Şekil 5.9. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.10’da 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntülerini incelediğimizde ötektik silisyum fazında büyük lamellerin parçalandığı iğnemi yapı gözlemlenmiştir. α -Al dendiritleri ise küçük boyutta ve küreselleşme eğilimi göstermiştir [80, 82, 83, 84].



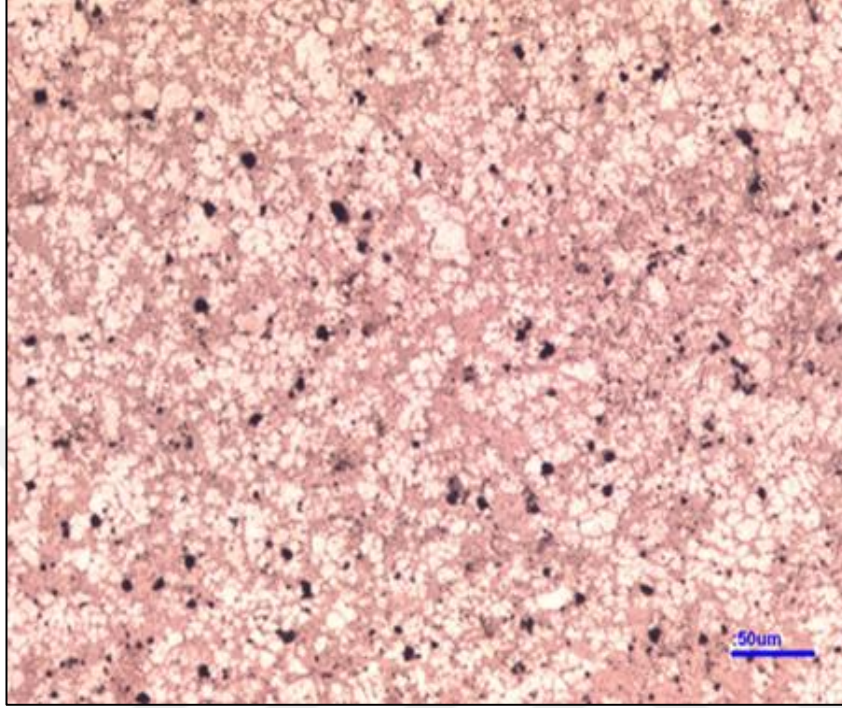
Şekil 5.10. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.11’de incelendiğinde ötektik silisyum fazında çok az iğnemi yapının kaldığı yapı gözlemlenmiştir. α -Al dendiritleri ise 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesine göre daha da küçük boyuta ulaşmış ve küreselleşme daha da artmıştır.



Şekil 5.11. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.12’de 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ötektik silisyum fazında artışın maksimum olduğu yapının ise fibroz ve küreselleşmiş elyafımsı yapı olduğu gözlenmiş ve Şekil 5.12.’de gösterilmiştir.

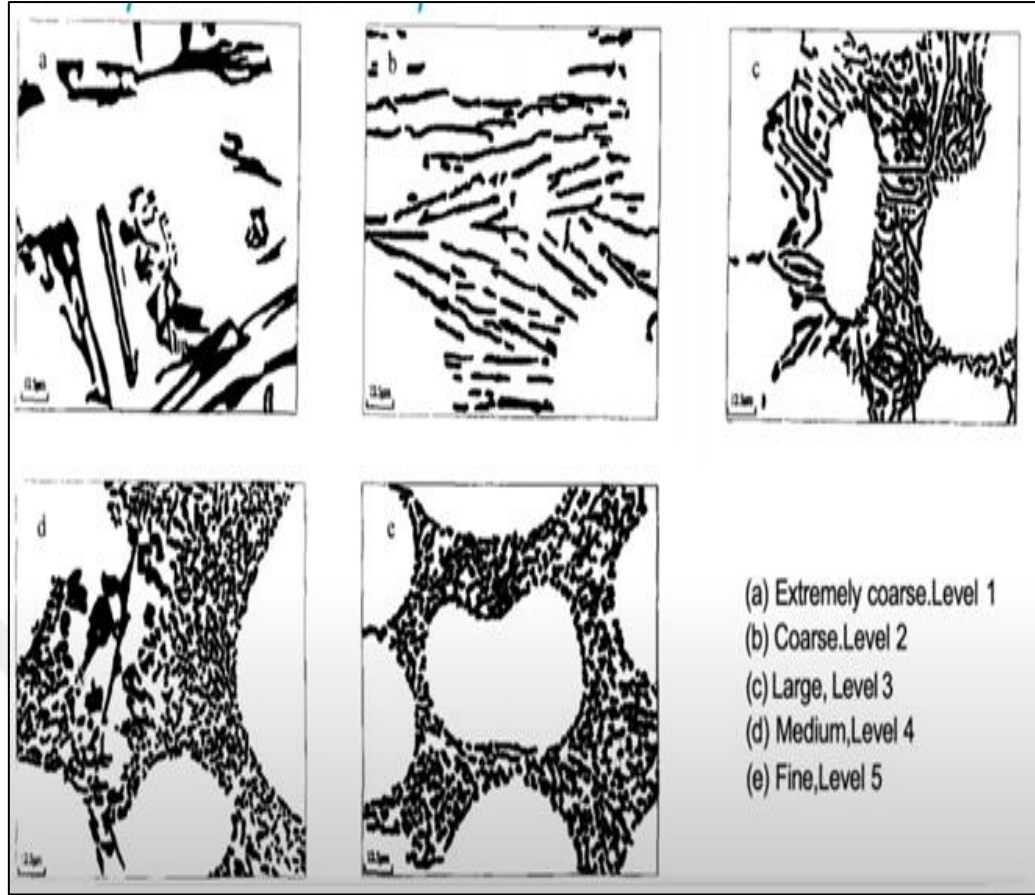


Şekil 5.12. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.

Silis morfolojisine göre ötektik modifikasyon Amerikan Dökümcüler Birliği’nin (AFS) modifikasyon seviyelerinden AFS 5 seviyesine yükselmiştir ve modifiye edilmiştir. Silis morfolojisine göre ötektik silisyumun modifikasyon sınıflandırması Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Amerikan Dökümcüler Birliği’nin modifikasyon seviyeleri Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

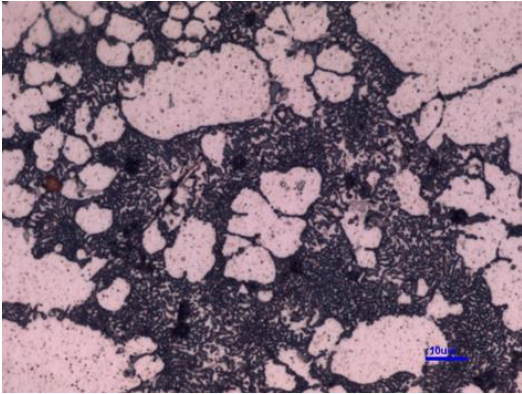
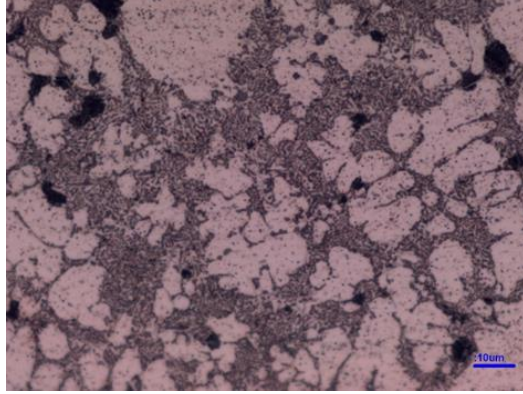
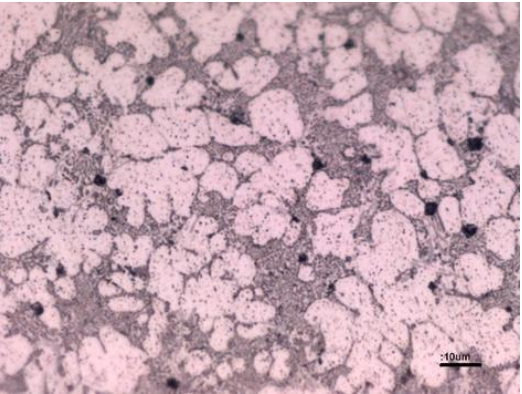
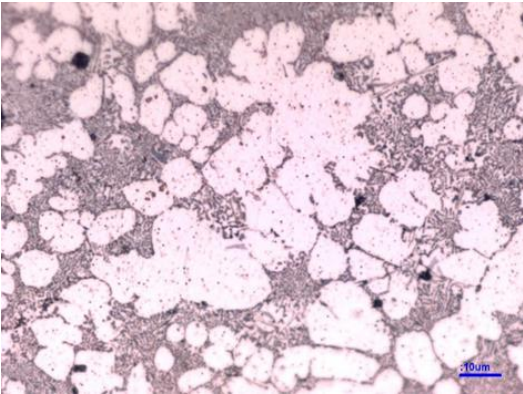
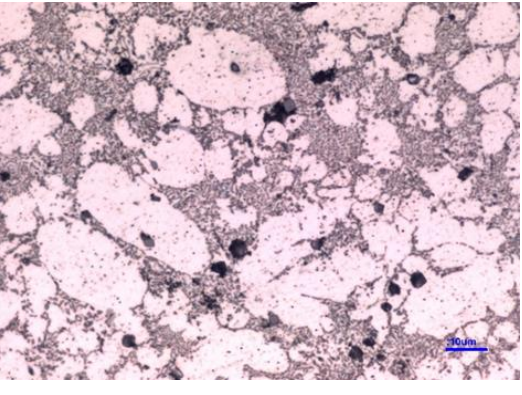
Tablo 5.7. Silis morfolojisine göre ötektik modifikasyon sınıflandırması.

No	Sınıflandırma	Silisyum morfolojisi
AFS 1	Modifikasyon yok	Büyük lamelli/iğnemsî parçacıklar
AFS 2	Lamelli/iğnemsî yapı	İnce lamelli/iğnemsî parçacıklar
AFS 3	Kısmî modifikasyon	Lamellerin parçalandığı iğnemsî yapı
AFS 4	Azaltılmış iğnemsî yapı	Çok az iğnemsî fazın kaldığı yapı
AFS 5	Modifiye edilmiş	Fibroz/küreselleşmiş yapı



Şekil 5.13. Amerikan Dökümcüler Birliği'nin modifikasyon seviyeleri.

Ti ve Sr modifikasyonu sonrası oluşan α -Al dendirit ve ötektik silisyum fazlarının X50 büyümedeki mikroyapı görüntüleri Şekil 5.14'de gösterilmektedir.

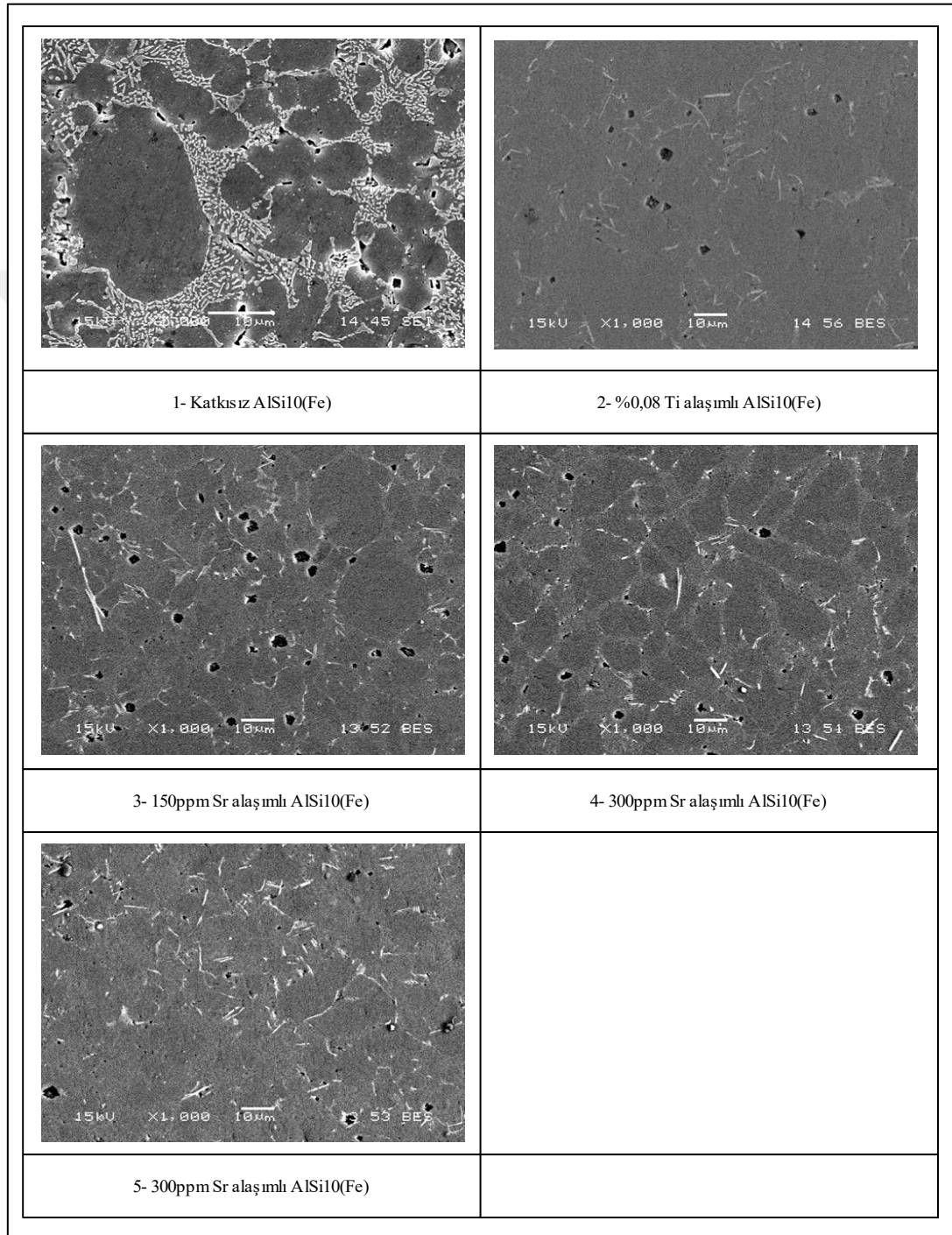
	
1- Katkısız AlSi10(Fe)	2- %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe)
	
3- 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	4- 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)
	
5- 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe)	

Şekil 5.14. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X50 büyütmede mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.14’de 1) Katkısız AlSi10(Fe), 2) %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe), 3) 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe), 4) 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) 5) 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

5.6. SEM&EDS analizi

Optik mikroskopla incelenen numuneler üzerinde SEM görüntüleri ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Ti ve Sr modifikasyonu sonrası oluşan α -Al dendrit ve ötektik silisyum fazlarının X1000 büyümedeki mikroyapı görüntüleri Şekil 5.15’de gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Ağırlıkça farklı 5 kompozisyona sahip alaşımlardan elde edilen numunelere ait X1000 büyütmede SEM görüntüleri.

Şekil 5.16’da Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin SEM görüntüsü, Şekil 5.17’de %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü, Şekil 5.18’de 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü, Şekil 5.19’da 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü, Şekil 5.20. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

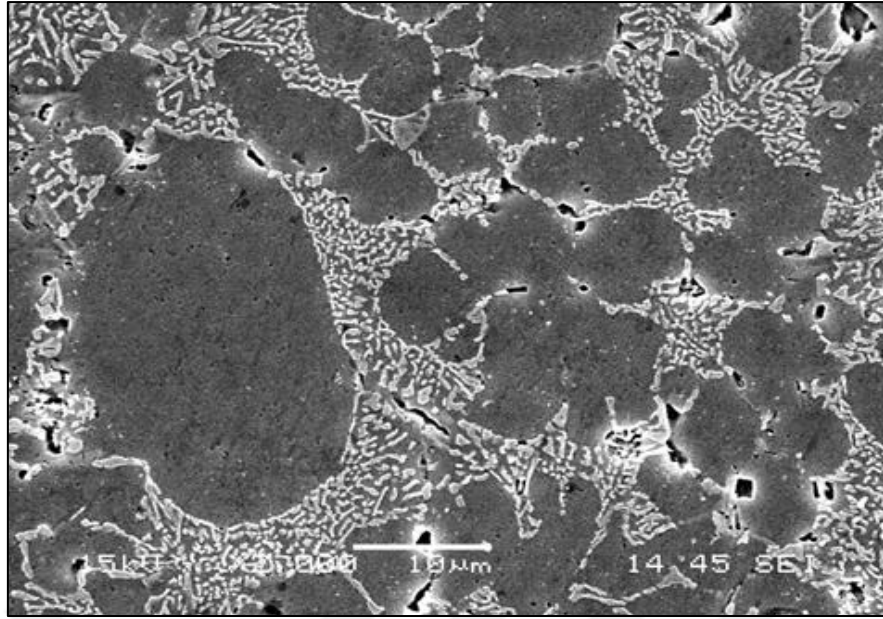
Modifiye edilmemiş görüntüyü incelediğimizde α -Al dendritlerinin çok büyük ve ötektik silisyum fazlarının da büyük lamelli ve iğnemi yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ötektik Si’nin mikroyapısında değişiklik görülmemiştir.

Al ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yüksek Fe içeren AlSi12 alaşımı, mikroyapıların özelliklerini ve fabrikasyon durumdaki mekanik özellikleri anlamak için lazer toz yataklı füzyonun (LPBF) katmanlı imalatıyla işlemişlerdir.

Fe safsızlığının, LPBF numunelerinde mekanik özelliklerin geliştirilmesi için faydalı olduğu bulunmuştur. 200 W lazer gücü, 1110 mm/s tarama hızı, 0,15 mm kapak aralığı, 0,03 mm katman kalınlığı ve 40 J/mm³ lazer hacimsel enerji yoğunluğunun kombinasyonunu içeren parametreler, yüksek bir bağıl yoğunluk elde etmek için optimize edilmiştir. %99,7 LPBF AlSi12FeMn alaşımı, Al matrisi ile tutarlı olan, yüksek yoğunluklu, önemli ölçüde rafine edilmiş küresel α -Al(Fe, Mn) Si fazına (10 - 50 nm) sahip olduğu görülmüştür.

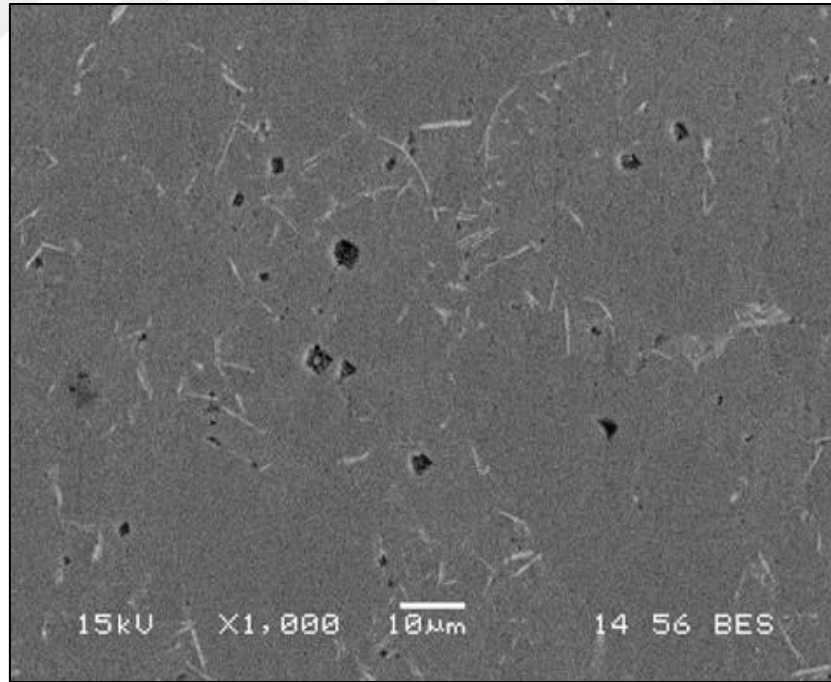
Bu arada, LPBF AlSi12FeMn alaşımı, 305 MPa’lık akma mukavemeti, 485 MPa’lık nihai çekme mukavemeti ve %6,1’lik kırılma gerilimi dahil olmak üzere üstün mekanik özellikler sunabilmektedir. Geliştirilmiş mekanik özellikler, katı çözelti güçlendirmesi, tane sınırı güçlendirmesi ve çökelme güçlendirmesi dahil olmak üzere sinerjik güçlendirme mekanizmalarına atfedilmektedir.

Ayrıca, yerel bölgelerde yüksek yoğunluklu birikimleme hatalarının (SF’ler) ve Lomer-Cottrell kilitlerinin (LC’ler) oluşumu da as-LPBFed AlSi12FeMn alaşımında güçlendirme sağlayabileceği ile sonuçlanmıştır [54].



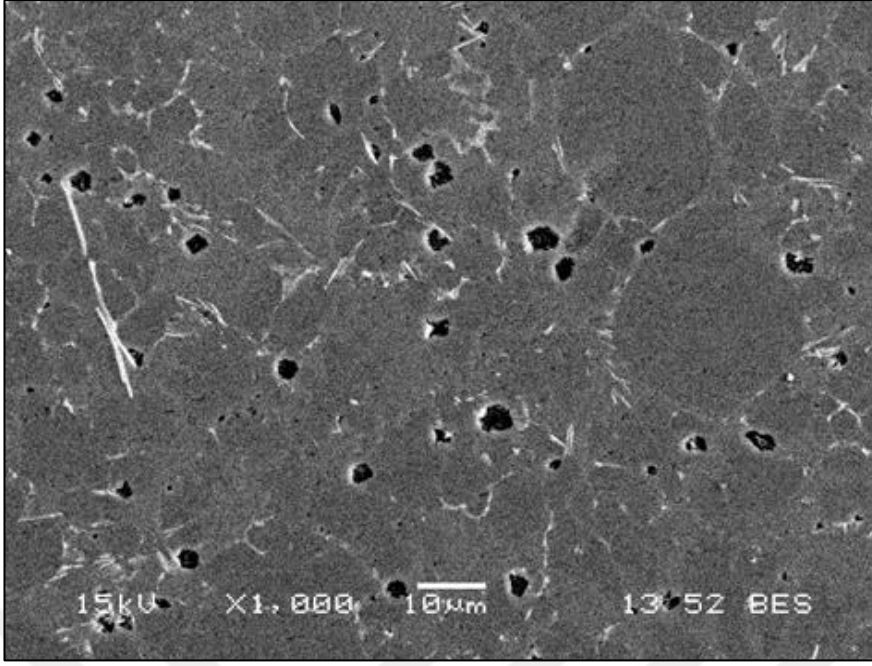
Şekil 5.16. Katkısız AlSi10(Fe) numunesinin SEM görüntüsü.

Şekil 5.17’de %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntülerini incelediğimizde α -Al dendritlerinin belirgin olarak çok küçüldüğü gözlenmiştir [79, 85].



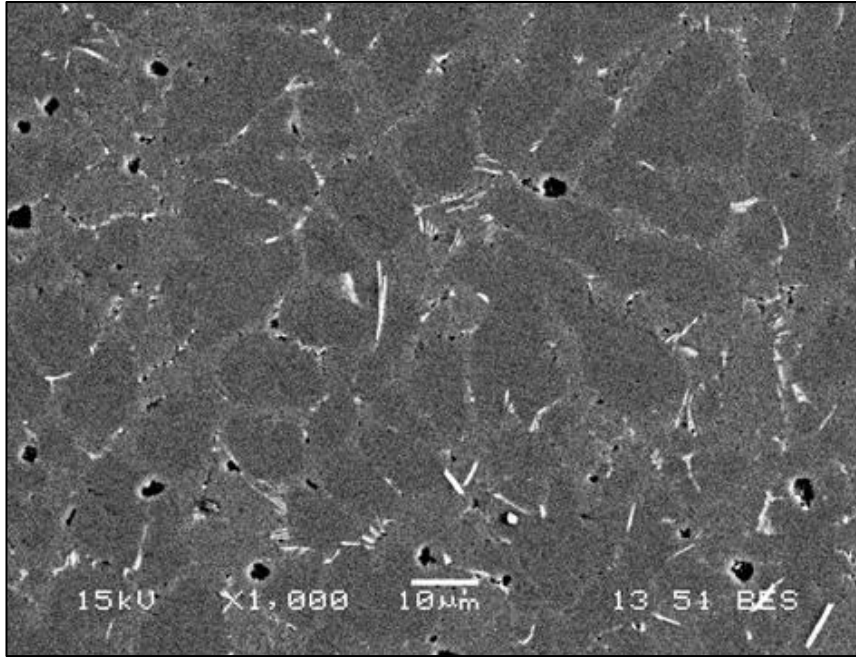
Şekil 5.17. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.18’de 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntülerini incelediğimizde ötektik silisyum kristallerinde büyük lamellerin küçüldüğü gözlemlenmiştir [80, 82, 83, 84].



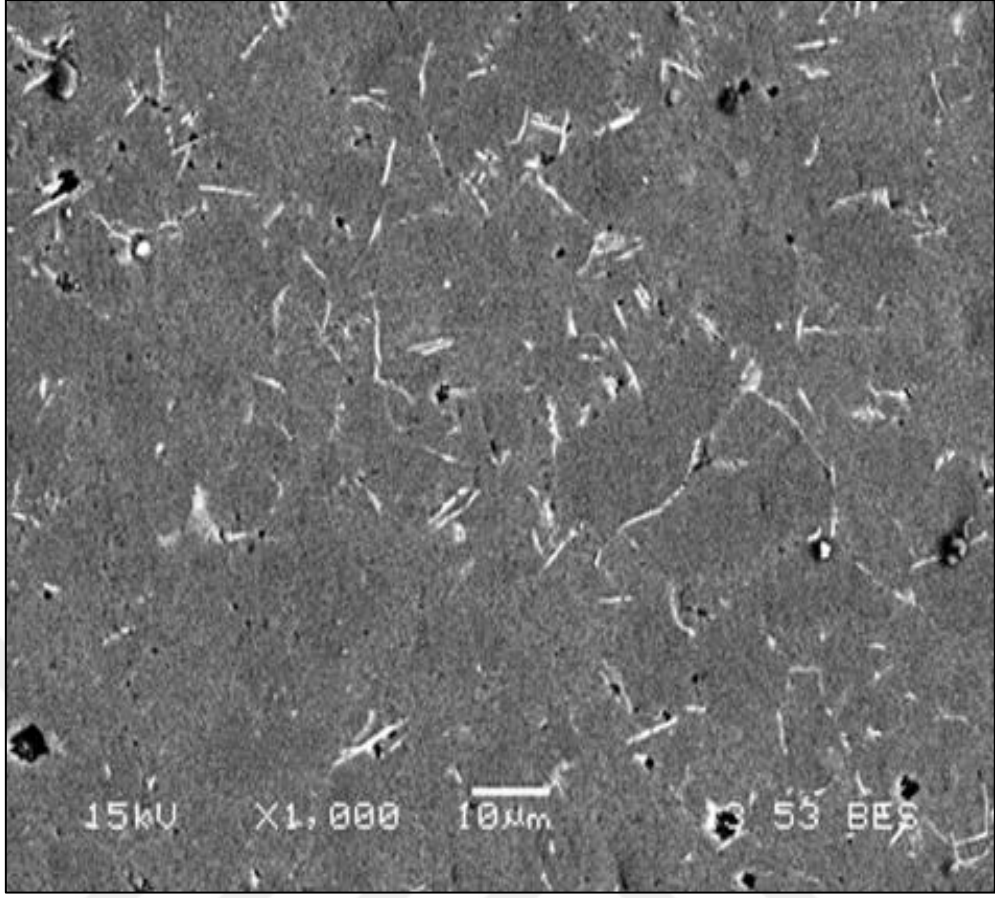
Şekil 5.18. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.19’da 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ötektik silisyum kristallerinde 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımına göre daha da incelmış silisyum gözlenmiştir.



Şekil 5.19. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.

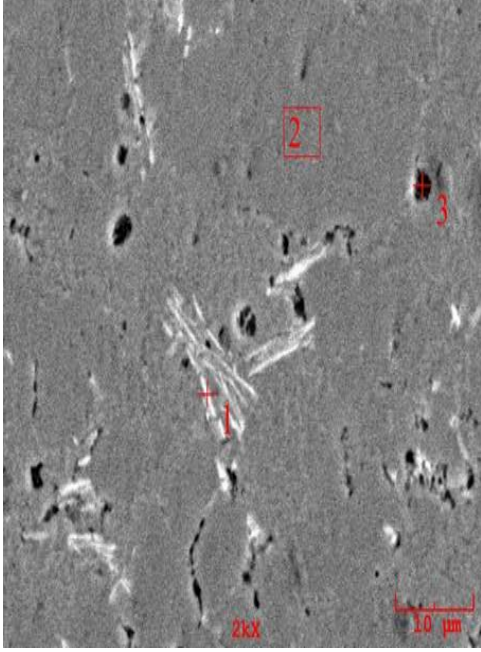
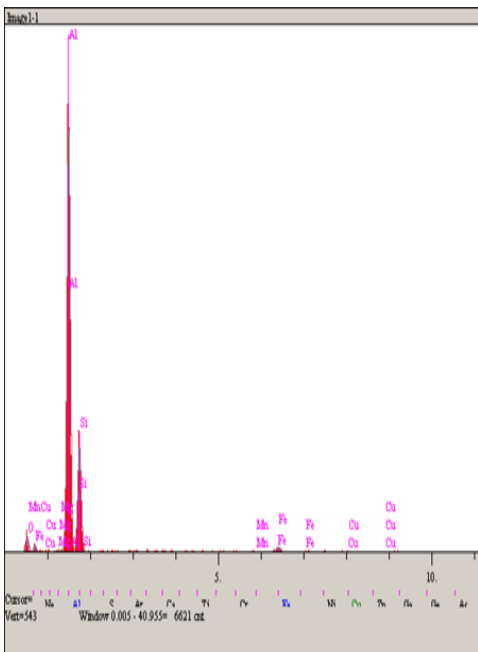
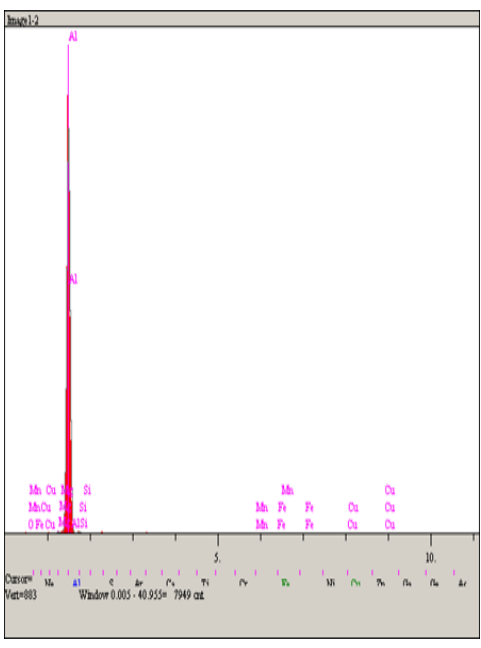
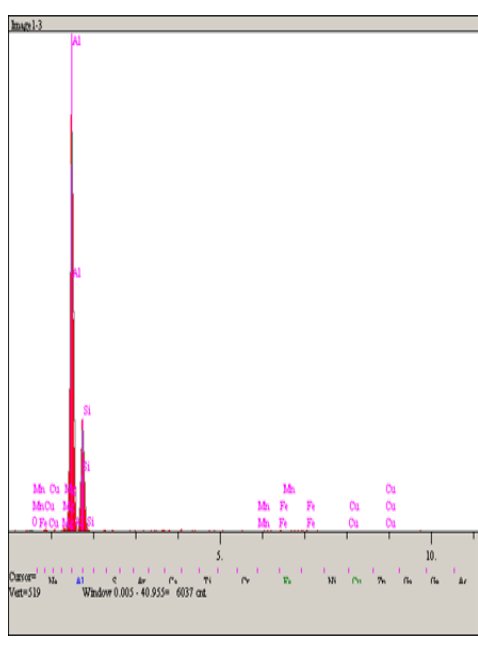
Şekil 5.20’de 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ötektik silisyum kristallerindeki en belirgin ince silisyumlar gözlemlenmiştir.



Şekil 5.20. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) numunesinin mikroyapı görüntüsü.

SEM görüntülerinde de belirgin olarak gözlemlenen siyah noktalar bakalitten gelen kalıntılardır.

Katkısız AlSi10(Fe) alaşımından alınan SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları Şekil 5.21’de verilmiştir.

	
Katkısız AlSi10(Fe) alaşım numunesi	1-SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları
	
2-SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları	3-SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları

Şekil 5.21. Katkısız AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.

Elde edilen EDS sonuçlarının kimyasal analiz kompozisyonları aşağıda noktasal analiz, bölgesel analiz ve noktasal analiz sonuçları olarak Tablo 5.8, Tablo 5.9, Tablo 5.10 ve 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Noktasal analiz.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	12,06	2.196	6.247	wt.%
Mg	Ka	2,3	0.960	0.305	wt.%
Al	Ka	433,46	13.166	60.133	wt.%
Si	Ka	114,22	6.759	26.475	wt.%
Mn	Ka	0,66	0.512	0.325	wt.%
Fe	Ka	7,3	1.709	4.278	wt.%
Cu	Ka	1,78	0.844	2.238	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.9. Bölgesel analiz.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	12,06	2.196	6.247	wt.%
Mg	Ka	2,3	0.960	0.305	wt.%
Al	Ka	433,46	13.166	60.133	wt.%
Si	Ka	114,22	6.759	26.475	wt.%
Mn	Ka	0,66	0.512	0.325	wt.%
Fe	Ka	7,3	1.709	4.278	wt.%
Cu	Ka	1,78	0.844	2.238	wt.%
				100.000	wt.% Total

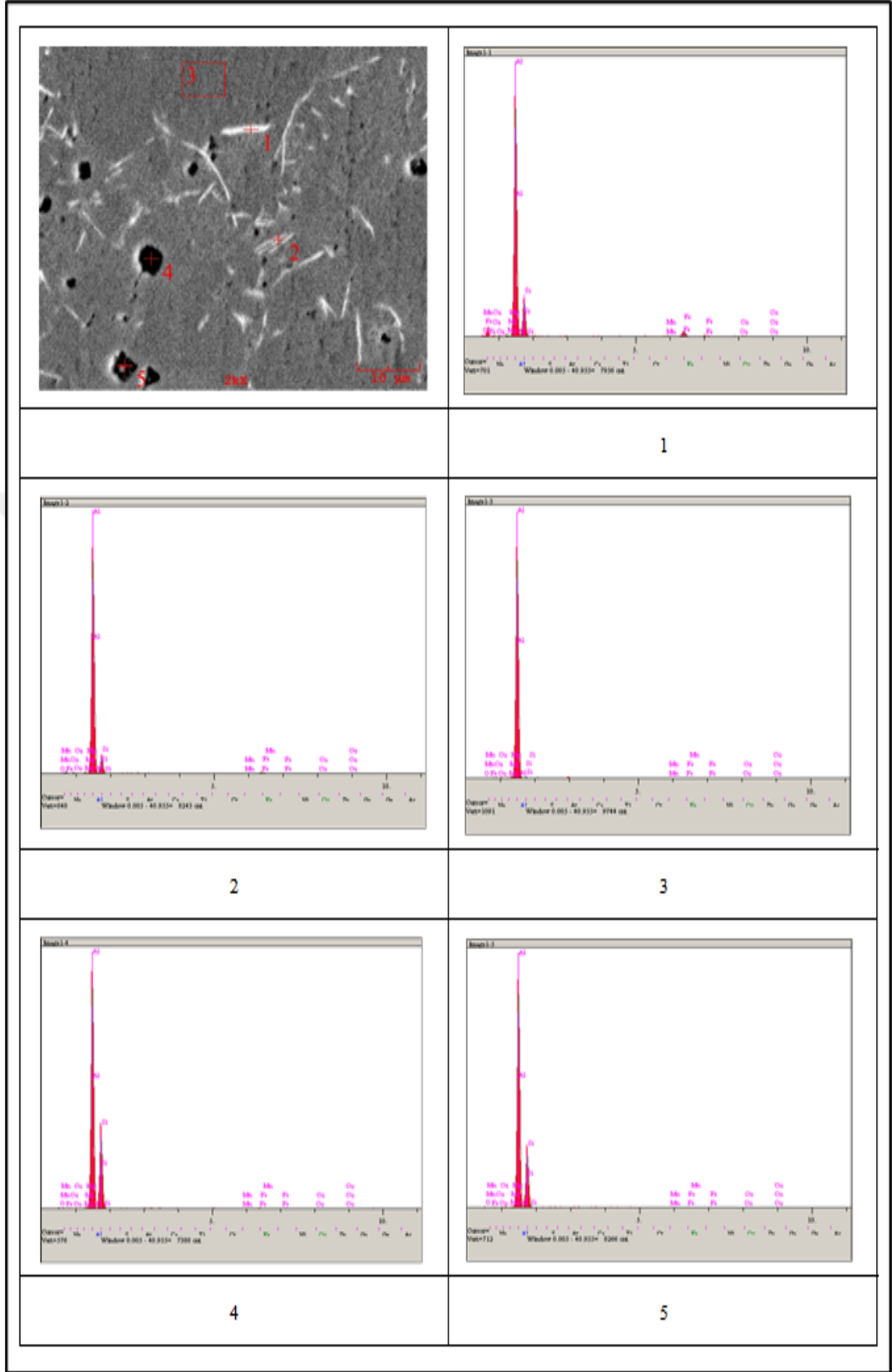
Tablo 5.10. Noktasal analiz sonuçları.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	1,25	0.706	0.687	wt.%
Mg	Ka	3,15	1.123	0.349	wt.%
Al	Ka	704,53	16.785	96.132	wt.%
Si	Ka	3,84	1.238	1.176	wt.%
Mn	Ka	1,84	0.858	0.984	wt.%
Fe	Ka	1,06	0.652	0.673	wt.%
Cu	Ka	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Tablo 5.11. Katkısız AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş 1)Noktasal analiz, 2)Bölgesel analiz, 3)Noktasal analiz sonuçları.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	1,92	0.876	1.249	wt.%
Mg	Ka	1,35	0.735	0.187	wt.%
Al	Ka	414,01	12.866	64.177	wt.%
Si	Ka	112,51	6.707	30.954	wt.%
Mn	Ka	0,74	0.543	0.434	wt.%
Fe	Ka	1,78	0.844	1.238	wt.%
Cu	Ka	1,19	0.689	1.762	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

EDS analizlerini incelediğimizde noktasal analiz ve bölgesel analiz sonuçlarına baktığımızda intermetalik fazlardaki elementlerin yüzde (%) ağırlıkça ana bileşenlerin Al, Si, Fe, Cu, O olduğu ve çok düşük oranda Mg, Mn elementlerinin olduğu gözlenmiştir. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımından alınan SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.

Elde edilen EDS sonuçlarının kimyasal analiz kompozisyonları nokrasal ve bölgesel olarak Tablo 5.13, Tablo 5.14, Tablo 5.15, Tablo 5.16 ve Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 5.12. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	0	0.000	0.000	wt.%
Mg	Ka	4,62	1.359	0.516	wt.%
Al	Ka	568,44	15.078	69.352	wt.%
Si	Ka	87,36	5.911	18.712	wt.%
Mn	Ka	2,15	0.927	0.914	wt.%
Fe	Ka	16,65	2.580	8.388	wt.%
Cu	Ka	1,96	0.885	2.118	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.13. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	0,05	0.136	0.022	wt.%
Mg	Ka	3,54	1.191	0.369	wt.%
Al	Ka	669,89	16.366	82.022	wt.%
Si	Ka	51,46	4.536	12.555	wt.%
Mn	Ka	0,32	0.359	0.148	wt.%
Fe	Ka	6,56	1.620	3.559	wt.%
Cu	Ka	1,14	0.675	1.323	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.14. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	0,92	0.607	0.409	wt.%
Mg	Ka	1,36	0.738	0.120	wt.%
Al	Ka	867,73	18.625	96.139	wt.%
Si	Ka	4,64	1.362	1.148	wt.%
Mn	Ka	0,21	0.293	0.092	wt.%
Fe	Ka	1,44	0.758	0.730	wt.%
Cu	Ka	1,26	0.709	1.362	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.15. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

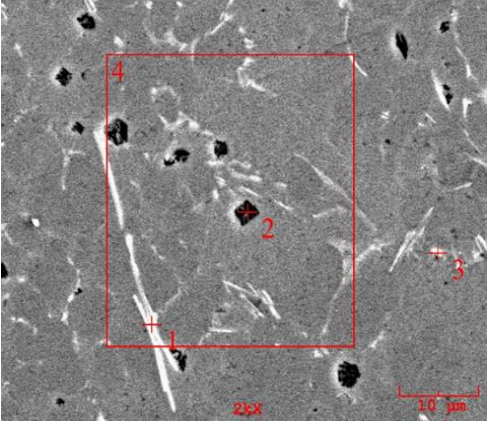
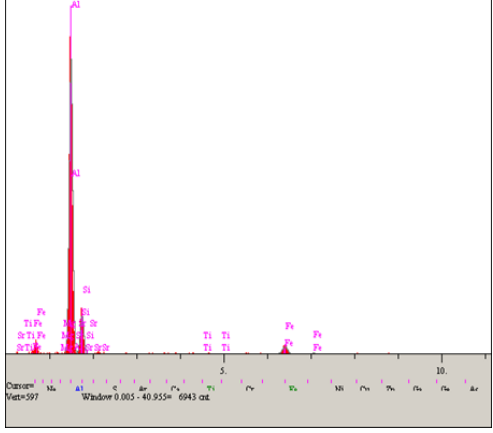
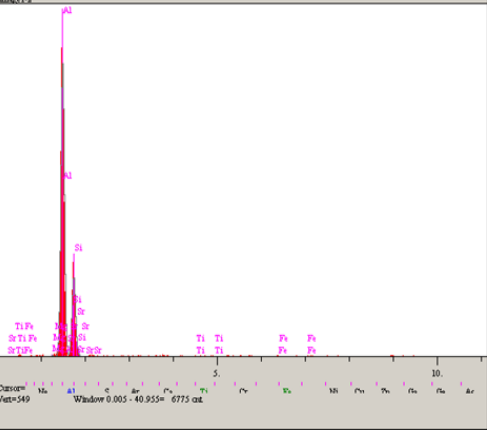
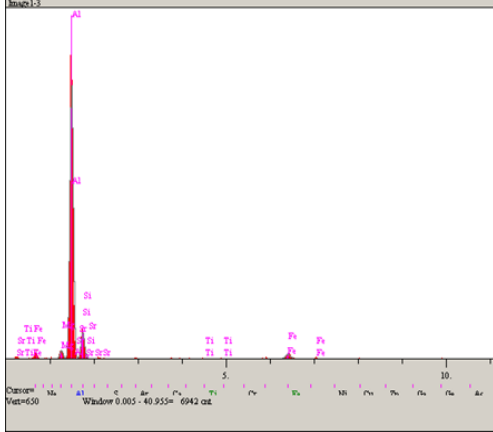
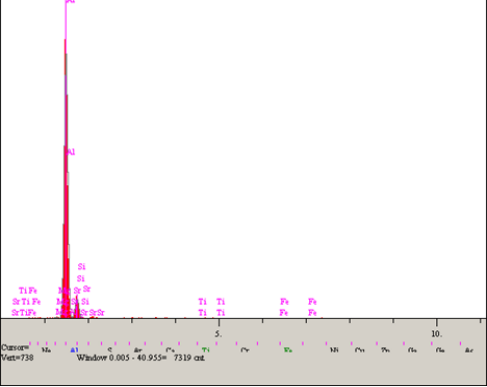
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	1,72	0.829	0.917	wt.%
Mg	Ka	1,83	0.856	0.206	wt.%
Al	Ka	484,65	13.923	60.756	wt.%
Si	Ka	159,93	7.998	34.770	wt.%
Mn	Ka	0,98	0.626	0.468	wt.%
Fe	Ka	2,39	0.977	1.347	wt.%
Cu	Ka	1,27	0.714	1.536	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.16. %0,08 Ti alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
O	Ka	1,05	0.647	0.531	wt.%
Mg	Ka	0,62	0.496	0.060	wt.%
Al	Ka	582,41	15.262	66.865	wt.%
Si	Ka	149,3	7.727	31.691	wt.%
Mn	Ka	0,23	0.305	0.106	wt.%
Fe	Ka	1,29	0.718	0.692	wt.%
Cu	Ka	0,05	0.138	0.055	wt.%
				100.000	wt.% Total

EDS analizlerini incelediğimizde noktasal analiz ve bölgesel analiz sonuçlarına baktığımızda intermetalik fazlardaki elementlerin yüzde (%) ağırlıkça ana bileşenlerin Al, Si, Fe, Cu olduğu ve çok düşük oranda Mg, Mn, O elementlerinin olduğu gözlenmiştir.

150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımından alınan SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları Şekil 5.23’de verilmiştir.

		150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım 1-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları
		2-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları 3-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları
		4-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları 5

Şekil 5.23. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.

Elde edilen EDS sonuçlarının kimyasal analiz kompozisyonları noktasal ve bölgesel olarak Tablo 5.18, Tablo 5.19, Tablo 5.20 ve Tablo 5.21’de verilmiştir.

Tablo 5.17. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Mg	Ka	1,42	0.754	0.183	wt.%
Al	Ka	494,54	14.058	71.198	wt.%
Si	Ka	66,36	5.150	17.053	wt.%
Ti	Ka	0	0.000	0.000	wt.%
Fe	Ka	19,2	2.770	11.566	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.18. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analiz.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Mg	Ka	1,61	0.803	0.193	wt.%
Al	Ka	455,95	13.502	64.567	wt.%
Si	Ka	129,36	7.192	33.181	wt.%
Ti	Ka	0,9	0.599	0.323	wt.%
Fe	Ka	1,55	0.786	1.019	wt.%
Sr	La	1,29	0.717	0.717	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.19. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

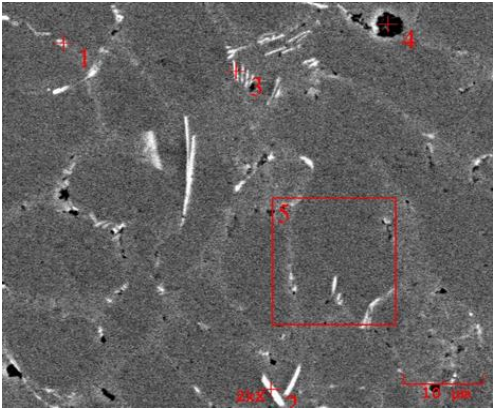
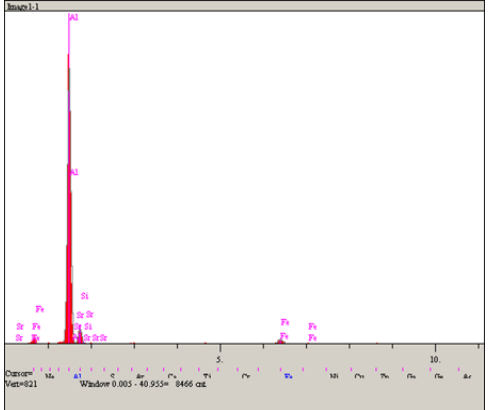
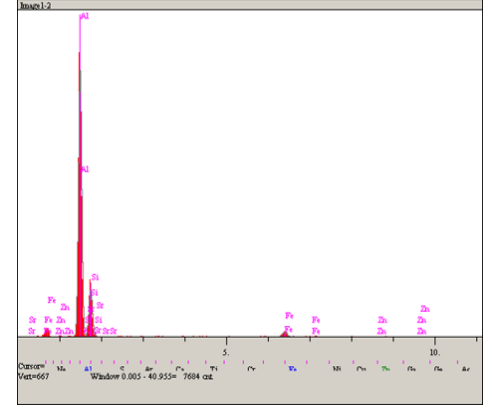
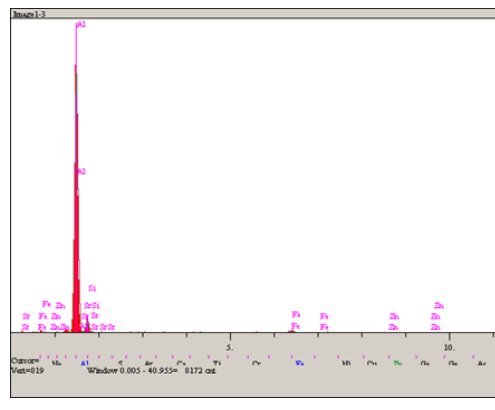
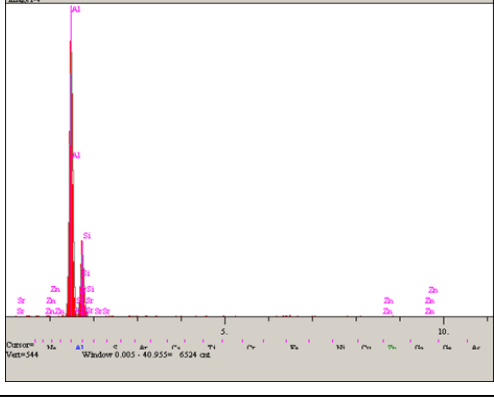
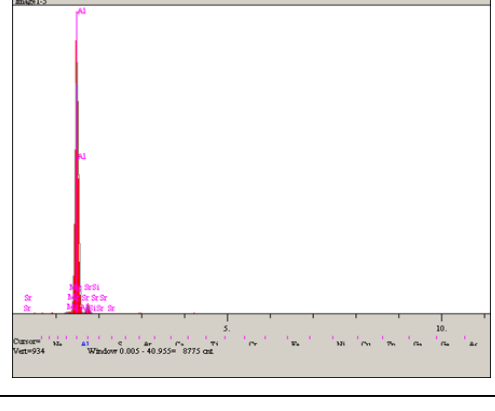
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Mg	Ka	15,47	2.486	2.064	wt.%
Al	Ka	505,6	14.216	74.768	wt.%
Si	Ka	51,2	4.524	13.890	wt.%
Ti	Ka	1,66	0.814	0.556	wt.%
Fe	Ka	14,04	2.369	8.722	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Tablo 5.20. 150ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Mg	Ka	3,32	1.153	0.380	wt.%
Al	Ka	600,91	15.498	84.407	wt.%
Si	Ka	47,37	4.351	13.869	wt.%
Ti	Ka	1,27	0.711	0.452	wt.%
Fe	Ka	1,36	0.738	0.892	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

EDS analizlerinde noktasal analiz ve bölgesel analiz sonuçlarına baktığımızda intermetalik fazlardaki elementlerin yüzde (%) ağırlıkça ana bileşenlerin Al, Si, Fe olduğu ve çok düşük oranda Mg, Ti, Sr elementlerinin olduğu gözlemlenmiştir.

300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımından alınan SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları Şekil 5.24’de verilmiştir.

	
300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım	1-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları
	
2-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları	3-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları
	
4-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları	5-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları

Şekil 5.24. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.

Elde edilen EDS sonuçlarının kimyasal analiz kompozisyonları noktasal ve bölgesel olarak Tablo 5.21, Tablo 5.22, Tablo 5.23, Tablo 5.24 ve Tablo 5.25’de verilmiştir.

Tablo 5.21. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Al	Ka	679,44	16.482	82.322	wt.%
Si	Ka	38,33	3.915	9.108	wt.%
Fe	Ka	16,36	2.558	8.570	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.22. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Al	Ka	543,49	14.743	67.313	wt.%
Si	Ka	101,35	6.367	21.771	wt.%
Fe	Ka	15,75	2.510	8.077	wt.%
Zn	Ka	1,89	0.870	2.838	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.23. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Al	Ka	674,58	16.426	84.776	wt.%
Si	Ka	32,64	3.613	8.202	wt.%
Fe	Ka	8,36	1.828	4.536	wt.%
Zn	Ka	1,57	0.792	2.486	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.24. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.

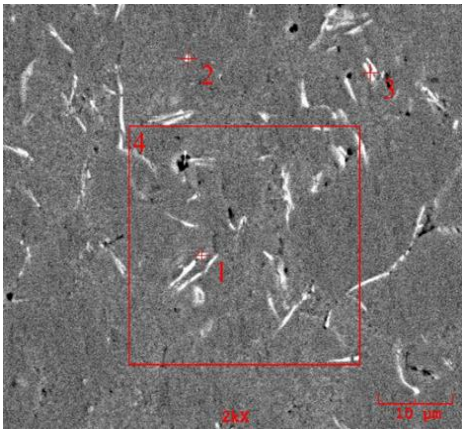
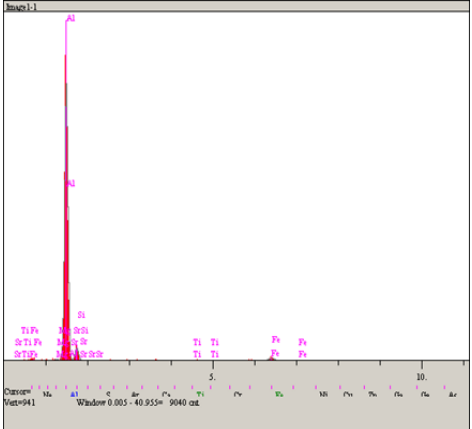
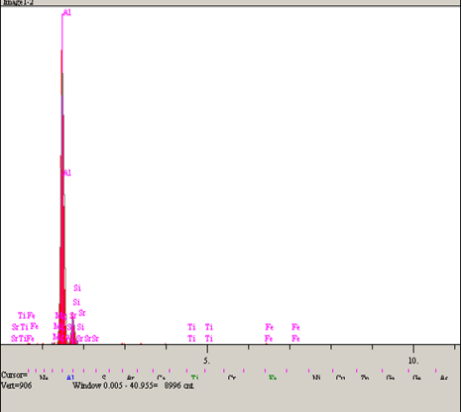
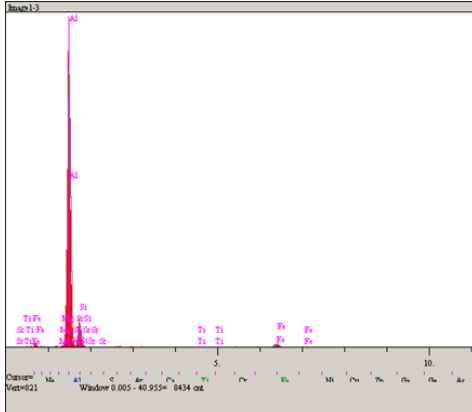
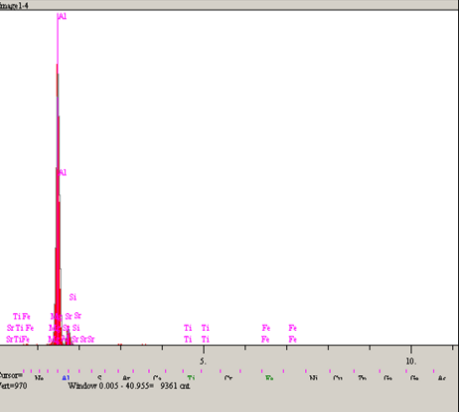
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Al	Ka	458,72	13.543	67.142	wt.%
Si	Ka	114,35	6.762	30.580	wt.%
Zn	Ka	1,18	0.685	2.278	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.% Total

Tablo 5.25. 300ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analiz sonuçları.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-ig	Conc	Units
Mg	Ka	5,06	1.423	0.488	wt.%
Al	Ka	760,71	17.442	92.514	wt.%
Si	Ka	25,94	3.221	6.998	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

EDS analizlerini incelediğimizde noktasal analiz ve bölgesel analiz sonuçlarına bakıldığında, intermetalik fazlardaki elementlerin yüzde (%) ağırlıkça ana bileşenlerin Al, Si, Fe ve Zn elementlerinin olduğu gözlenmiştir.

450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşımından alınan SEM görüntülerinin noktasal ve bölgesel EDS ve analiz sonuçları Şekil 5.25’de verilmiştir.

	
450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım	1-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.
	
2-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	3-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.
	
4-SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.	

Şekil 5.25. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için alınan SEM görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen bölgesel ve noktasal EDS analiz sonuçları.

Elde edilen EDS sonuçlarının kimyasal analiz kompozisyonları noktasal ve bölgesel analiz olarak Tablo 5.27, Tablo 5.28, Tablo 5.29 ve Tablo 5.30 verilmiştir.

Tablo 5.26. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	Elt.
Mg	Ka	4,19	1.294	0.407	wt.%	
Al	Ka	746,96	17.282	85.761	wt.%	
Si	Ka	35,05	3.744	8.217	wt.%	
Ti	Ka	1,11	0.665	0.306	wt.%	
Fe	Ka	10,4	2.040	5.309	wt.%	
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Tablo 5.27. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Mg	Ka	3,94	1.255	0.362	wt.%
Al	Ka	726,01	17.037	81.573	wt.%
Si	Ka	71,74	5.356	16.465	wt.%
Ti	Ka	0,64	0.507	0.183	wt.%
Fe	Ka	1,91	0.874	1.000	wt.%
Sr	La	0,84	0.580	0.416	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Tablo 5.28. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş noktasal analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Mg	Ka	2,08	0.913	0.212	wt.%
Al	Ka	665,52	16.315	79.483	wt.%
Si	Ka	57,27	4.786	13.287	wt.%
Ti	Ka	1,16	0.682	0.330	wt.%
Fe	Ka	12,76	2.259	6.687	wt.%
Sr	La	0	0.000	0.000	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Tablo 5.29. 450ppm Sr alaşımlı AlSi10(Fe) alaşım numunesi için elde edilen BSE – SEM görüntüsü üzerinde işaretlenmiş bölgesel analizi.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Mg	Ka	2,47	0.994	0.216	wt.%
Al	Ka	784,43	17.708	87.248	wt.%
Si	Ka	49,27	4.438	11.715	wt.%
Ti	Ka	0,46	0.429	0.132	wt.%
Fe	Ka	0,34	0.368	0.178	wt.%
Sr	La	1	0.632	0.511	wt.%
				100.000	wt.% Total

EDS analizlerini incelediğimizde noktasal analiz ve bölgesel analiz sonuçlarına baktığımızda intermetalik fazlardaki elementlerin yüzde (%) ağırlıkça ana bileşenlerin Al, Si, Fe olduğu ve çok düşük oranda Mg, Ti, Sr elementlerinin olduğu gözlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada AlSi10(Fe) alaşımına tane incelme ve modifikasyon amaçlı AlTi5B1 ve AlSr10 master alaşımları ilave edilerek %0,08 Ti + farklı miktarlarda Sr içeren beş farklı kompozisyona sahip alaşımlar yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle üretilmiştir. Titanyum ve stronsiyum ilavesinin AlSi10(Fe) alaşımının mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Üretilen alaşımlara sertlik ve mikrosertlik ölçümleri ile çekme ve basma deneyleri gerçekleştirilmiş, optik ve SEM mikroskobu incelemeleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Üretilen alaşımların sertlik incelemelerinde AlSi10(Fe) alaşımına AlTi5B1 master alaşımı kullanılarak ilave edilen %0,08 titanyumun alaşımın tane boyutunu küçülterek sertlik değerlerini net bir şekilde artırdığı gözlenmiştir. %0,08 Ti içeren AlSi10(Fe) alaşımına AlSr10 master alaşımı ilave edilerek ağırlıkça 150ppm, 300ppm ve 450 ppm stronsiyum içeren alaşımlar üretilmiş ve bu alaşımların sertlik değerleri alaşımın Sr miktarındaki artışa bağlı olarak doğrusal artış gözlenmiştir. Bu artış ağırlıkça 150ppm, 300ppm ve 450ppm Sr içeren alaşımların sertliği her bir miktar artış için ortalama olarak 2,5 Brinell sertlik değeri artırmıştır. İlavesiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın Brinell sertlik değerleri arasındaki fark sırasıyla %19 dur. AlSi10(Fe) alaşımına titanyum ilavesi ile α -Al dendiritleri, stronsiyum ilavesi ile ötektik silisyum fazı modifiye edilmiştir. Stronsiyum oranının artışına bağlı olarak fazların mikrosertlik değerleri artmıştır. İlavesiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımındaki α -Al dendiritleri ve ötektik silisyum fazı mikrosertlik değerleri arasındaki fark sırasıyla %181 ve %127 dir. Alaşımına % 0,08 titanyum ilavesi ve stronsiyum oranının artışına bağlı olarak çekme deneyleri sonrasında akma ve çekme dayanım değerleri doğrusal artmış ve en yüksek akma ve çekme dayanım ile % uzama değerleri 450ppm Sr içeren alaşımlarında elde edilmiştir. İlavesiz AlSi12(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın akma, çekme dayanım ve % uzama değerleri arasındaki fark sırasıyla %21, %31 ve %69 dur.

Basma testinde yüzde (%) deformasyon uzaması ilave edilen Ti ve Sr elementlerinin alaşımın tane yapısını küçülmesi ve ötektik silisyumun fibroz/küreselleşmiş yapıya dönüşmesi uygulanan Fm kuvvetini absorbe edilmektedir. Bu durum alaşımın mukavemetinin artışına sağlamaktadır. Böylece Ti ilavesi alaşımın kalıcı deformasyon uzaması düşürmektedir. Buna ilaveten alaşımdaki Sr miktarındaki artışa bağlı olarak kalıcı deformasyon uzaması orantılı olarak daha da düşmektedir. İlavesiz AlSi1(Fe) alaşımı ve %0,08 Ti + 450ppm Sr ilave edilen alaşımın % kalıcı deformasyon uzaması değerleri arasındaki fark sırasıyla %26 dır. Mikroyapıları incelemelerde optik mikroskop görüntülerinde alaşıma Ti ilavesinin α -Al dendiritlerini küçültmesi ile alaşımın tane boyutunu küçülttüğü gözlenmiştir. Ancak bu durumun ötektik silisyuma etki etmediği gözlenmiştir. Diğer taraftan alaşıma Sr ilavesinin silisyum kristallerini küçülttüğü gözlenmiştir. Alaşım içerisinde Sr miktarı ağırlıkça 450ppm ulaştığında mikroyapının kaba lamelli ve iğnemsı yapıdan fibroz/küreselleşmiş yapıya dönüştüğü gözlenmiş ve böylece modifiyenin gerçekteştiği sonucuna ulaşılmıştır. SEM/EDS analizlerinde elde edilen sonuçlar optik mikroskop görüntülerinde elde edilen sonuçları desteklemektedir. Görüntülerde α -Al dendiritlerinin ve Si kristallerinin küçüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca, alaşımın SEM/EDS noktasal ve bölgesel analizlerinden Al, Si ve Fe elementlerinden oluşan intermetalik fazların bulunduğu görülmüştür.

6.2. Öneriler

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlardan yola çıkarak benzer konularda çalışma yapacak araştırmacılara aşağıdaki öneriler sunulabilir: Bu çalışmada kullanılan AlSi10(Fe) alaşımına titanyum + farklı oranlardaki stronsiyum ilavesinin alaşımının korozyon özelliklerine etkileri incelenebilir. Geçirgen elektron mikroskobu gibi farklı mikroyapı karakterizasyon teknikleri kullanılarak tane inceltme ile elde edilen mikroyapı ve mekanik özellikleri detaylı incelenerek mekanizmaları daha net olarak açıklanabilir. AlSi10 (Fe) alaşımına farklı oranlardaki stronsiyum ile fosfor ilavesinin içeren alaşımların bu çalışmada çalışılan mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri araştırılabilir. Bu çalışmada alaşımın üretiminde yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin dışında aynı kompozisyon ile kum ve kokil kalıba döküm gibi alçak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımlarda basıncın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Wang, X. Zhao, G. Sun, L. Wang, Y. & Li, H. (2023). A strategy to promote formability, production efficiency and mechanical properties of Al–Mg–Si alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 3853-3869, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.037>.
- [2] Zupanič, F., Steinacher, M., Žist, S., & Bončina, T. (2023). Microstructure, mechanical properties and fatigue behaviour of a new high-strength aluminium alloy AA 6086, Contents lists available at ScienceDirect, *Journal of Alloys and Compounds* 941 (2023) 168976, www.elsevier.com/locate/jalcom.
- [3] Kadkhodapour, J., Schmauder, S., & Sajadi, F. (2022). Quality Analysis of Additively Manufactured Metals, Simulation Approaches, *Processes, and Microstructure Properties*, Chapter Nine, 1st Edition - November 30, 2022, Paperback ISBN: 9780323886642, 978-0-323-88664-2, eBook ISBN: 9780323886499.
- [4] Al-Zubaydi, A.S.J., Gao, N., Wang, S., & Reed, P.A.S. (2022). Microstructural and hardness evolution of additively manufactured Al–Si–Cu alloy processed by highpressure torsion, *Metals & Corrosion, J Mater Sci* (2022) 57: 8956–8977.
- [5] Altuntaş, O. (2022). Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10 (2), 195-202. doi: 10.29109/gujsc.1108116.
- [6] Zheng, J., Pang, Q., Hu, Z., & Sun, Q. (2022). Recent Progress on regulating strategies for the strengthening and toughening of high-strength aluminum Alloys. *Materials* 2022, 15, 4725. <https://doi.org/10.3390/ma15134725>.
- [7] Hua, L., Yuan, P.G., Zhao, N., Hu, Z.L., & Ma, H.J. (2022). Microstructure and mechanical properties of 6082 aluminum alloy processed by preaging and hot forging, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 32(2022) 790–800, doi:10.1016/S1003-6326(22)65833-3.
- [8] Abushanab, W.S., Moustafa, E.B., Ghandourah, E.I., & Taha, M.A. (2021). The effect of different fly ash and vanadium carbide contents on the various properties of hypereutectic al-si alloys-based hybrid nanocomposites. *Silicon*, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-519252/v1> 14, 5367 - 5377.
- [9] Hatiham A.M., Ahmed, H.A.M., Hefni, M., & Moustafa, E.B. (2021). Effect of grain refinement on the dynamic, mechanical properties and corrosion behaviour of Al-Mg Alloy. *Metals* 2021, 11, 1825. <https://doi.org/10.3390/met11111825>.
- [10] Moustaf, E.B., Khalil, A.M., Ahmed, H.A., Mohammed Hefni, M., & Mosleh, A.O. (2021). Microstructure, hardness, and wear behavior investigation of the surface nanocomposite metal matrix reinforced by silicon carbide and alumina nanoparticles, *Journal of Mineral, Metal and Material Engineering*, 2021, 7, 57-62.

- [11] Zhu, S., Shih, H.C., Cui, X., Yu, C.Y., & Ringer, S.P. (2021). Design of solute clustering during thermomechanical processing of AA6016 Al–Mg–Si alloy. *Acta Materialia*, 203, 116455. doi:10.1016/j.actamat.2020.10.074.
- [12] Li, J., Wu, X., Cao, L., Liao, B., Wang, Y., & Liu, Q. (2021). Hot deformation and dynamic recrystallization in Al-Mg-Si alloy. *Materials Characterization*, 173, 110976. doi:10.1016/j.matchar.2021.110976.
- [13] Hitzler, L., Hafenstein, S., Martin, F.M., Clemens, H., Sert, E., Öchsner, A., Merkel, M. & Werner, E. (2020). Heat Treatments and Critical Quenching Rates in Additively Manufactured Al–Si–Mg Alloys, *Materials*, 2020, 13, 720; doi:10.3390/ma13030720 www.mdpi.
- [14] Anderson, K., Weritz, J., & Kaufman, J.G. (2018). ASM International, *Aluminum Science and Technology*, Vol: 2-A, ISBN electronic: 978-1- 62708-207-5, doi: 10.31399/asm.hb.v02a.9781627082075.
- [15] Çetintürk, S. (2021). *A206.0 Differences Of Aluminum Copper Alloys Dilution Of Particle Size With Infoculatants and T6 Heatheat Improvement Of Mechanical Properties By Applying The Process*, Konya Technical University, Graduate Education Institute, Department of Metallurgical and Material Engineering, PhD Thesis.
- [16] Fayomi, O.S.I., Popoola, A.P.I., & Udoeye, N.E. (2017). Effect of alloying element on the integrity and functionality of aluminium-based alloy. *Aluminium Alloys-Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications*. doi:10.5772/intechopen.71399.
- [17] TALSAD (2021). Dünya’da ve Türkiye’de Alüminyum Sektor Raporu Özet, *Türkiye Alüminyum Sanayiciler Derneği*, 2021, www.talsad.org.tr/ (Erişim Tarihi: 25.10.2022).
- [18] Atay, G. (2017). *Production of AlSi10Mg1 alloy containing titanium boride and examination of material properties*, Karabük University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Metallurgy and Materials Science, Published Master’s Thesis.
- [19] Kenar, O. (2019). *Investigation of the effects of mold design changes on part casting quality in aluminum automotive parts produced by high pressure casting process*, Sakarya University Institute of Science and Technology, Published Master’s Thesis.
- [20] Işık, S.B. (2021). *Modeling of aluminum alloy automobile wheel production by high pressure casting method*, Kocaeli University, Institute of Science and Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Published Master’s Thesis.
- [21] Sapmaz, İ. (2021). *Investigation of the effect of sr additions on the microstructure and mechanical properties of the AlSi12(Fe) high pressure casting alloy*, Bursa Technical University, Institute of Science, Advanced Technologies Department, Materials Science and Engineering Program, Published Master’s Thesis.

- [22] Taşar, B. (2021). *Investigation of microstructure and mechanical properties of boron and nickel added a356 alloy produced by powder metallurgy method*, Karabük University, Graduate Education Institute, Department of Manufacturing Engineering, Published Master's Thesis.
- [23] Sezer, R. (2018). *Production of al-sr master alloy from local celestite ore and investigation of its properties*, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Metallurgical and Materials Engineering Doctoral Program, Published Doctoral Thesis.
- [24] Abdulsahib, Y.N. (2014). Effect of copper addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy, *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences*, Vol: 7, No: 4.
- [25] Mehdi, H., Kumar, V., & Kumar, A. (2015). Effect of silicon content on the mechanical properties of aluminum alloy, *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET), Volume: 02, Issue: 04, July-2015, www.irjet.net.
- [26] Yıldırım, M., & Özyürek, D. (2013). The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys. *Materials and Design*, 51, 767–774. doi:10.1016/j.matdes.2013.04.089.
- [27] Chiu, Y.C., Pan, T.A., Chen, G.M., Jiang, X.C., Bor, H.Y., Tzeng, Y.C., & Lee, S.L. (2021). The effects of a trace amount of manganese and the homogenization on the recrystallization of Al–7Mg–0.15Ti Alloys. *Molecules*, 2021, 26, 168. <https://doi.org/10.3390/molecules26010168>.
- [28] Agbelele, A., Durowaye, S., Oladoye, & Bolasodun, A.B. (2021). Effect of zinc addition on the mechanical and corrosion characteristics of aluminium matrix composites, *Acta Materialia Turcica*, Volume 5, September, 2021, Pages 30-37.
- [29] Zhang, Y., Yan, F., Zhao, Y., Song, C., & Hou, H. (2020). Effect of Ti on microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Mg-Zn-Si alloy, *Mater. Res. Express* 7 (2020) 036526 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7f5d>.
- [30] Song, D., Jia, Y., Li, Q., Zhao, Y., & Zhang, W. (2022). Effect of Initial Fe Content on Microstructure and Mechanical Properties of Recycled Al-7.0Si-Fe-Mn Alloys with Constant Mn/Fe Ratio. *Materials* 2022, 15, 1618. <https://doi.org/10.3390/ma15041618>.
- [31] Demirtaş, H., Karakulak, E., & Babu, N.H. (2022). Understanding the effect of Ni content on microstructure and mechanical properties of A384 HPDC alloy, Contents lists available at ScienceDirect, *Journal of Alloys and Compounds* 896 (2022) 163111, journal homepage: www.elsevier.com/locate/jalcom.
- [32] Kozana, J., Piekos, M., Garbacz-Klempka, A., & Perek-Nowak, M. (2022). The effect of tin on microstructure and properties of the Al-10 wt.% Si alloy. *Materials*, 2022, 15, 6350. <https://doi.org/10.3390/ma15186350>.
- [33] Egole, C.P., & Nzebuka, G.C. (2019). Effect of aluminium addition and grain refinement on the microstructure, mechanical and physical properties of leaded brass alloys, *Journal of Physics: Conference Series*, 1378 022043.

- [34] Aboraia, M.S., Elrab, H.G. & Abdalla, G.A. (2020). Joint addition of zirconium, titanium and chromium to commercial pure Aluminium, *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 22(2)2020, doi: 10.21608/jpme.2020.33579.1037.
- [35] Xiao, F., Wu, M., Wang, Y., Zhou, W., Wang, S., Wang, D., Zhu, G., Jiang, M., Shu, D., Mi, J., & Sun, B. (2022). Effect of trace boron on grain refinement of commercially pure aluminum by Al–5Ti–1B, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume: 32, Issue: 4, 2022, p: 1061- 1069, ISSN 1003-6326, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65855-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65855-2).
- [36] Zhukov, I.A., Kozulin, A.A., Khrustalyov, A.P., Kahidze, N.I., Khmeleva, M.G., Moskvichev, E.M., Lychagin, D.V., & Vorozhtsov, A.B. (2019). Pure aluminum structure and mechanical properties modified by Al₂O₃ nanoparticles and ultrasonic treatment. *Metals*, 9(11), 1199. doi:10.3390/met9111199.
- [37] Khrustalyov, A.P., Kozulin, A.A., Zhukov, I.A., Khmeleva, M.G., Vorozhtsov, A.B., Eskin, D., & Vasilyev, S.V. (2019). Influence of titanium diboride particle size on structure and mechanical properties of an al-mg alloy. *Metals*, 9(10), 1030. doi:10.3390/met9101030.
- [38] Malaki, M., Xu, W., Kasar, A., Menezes, P., Dieringa, H., Varma, R., & Gupta, M. (2019). Advanced Metal Matrix Nanocomposites. *Metals*, 9(3), 330. doi:10.3390/met9030330.
- [39] Promakhov, V., Khmeleva, M., Zhukov, I., Platov, V., Khrustalyov, A., & Vorozhtsov, A. (2019). Influence of vibration treatment and modification of a356 aluminum alloy on its structure and mechanical properties. *Metals*, 9(1), 87. doi:10.3390/met9010087.
- [40] Abbasi, M., & Sajjadi, S. (2017). Manufacturing of Al–Al₂O₃–Mg multilayered nanocomposites by accumulative roll bonding process and study of its microstructure, tensile, and bending properties. *Journal of Composite Materials*, 52(2), 147–157. doi:10.1177/0021998317703693.
- [41] Khabushan, J.K. & Bonabi, S.B. (2017). Investigating of the microstructure and mechanical properties of al-based composite reinforced with nano- trioxide tungsten via accumulative roll bonding process. *Open Journal of Metal*, 7, 9-23. <http://dx.doi.org/10.4236/ojmetal.2017.71002>.
- [42] Zhang, A., & Li, Y. (2023). Thermal conductivity of aluminum alloys-a review. *Materials* (Basel). 2023 Apr 8; 16(8): 2972. doi: 10.3390/ma16082972. PMID: 37109807; PMCID: PMC10144406.
- [43] Lombardi, A., D’Elia, F., Ravindran, C., & MacKay, R. (2014). Replication of engine block cylinder bridge microstructure and mechanical properties with lab scale 319 Al alloy billet castings. *Materials Characterization*, 87, 125– 137. doi:10.1016/j.matchar.2013.11.006.
- [44] Gan, J., Huang, Y., Wen, C., & Du, J. (2020). Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al–Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(11), 2879–2890. doi:10.1016/s1003-6326(20)65428-0.

- [45] Zhai, S., Zhang, P., Xian, Y., Zeng, J., & Shi, B. (2018). Effective thermal conductivity of polymer composites: Theoretical models and simulation models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 358–374. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.067.
- [46] Chen, J.K., Hung, H.Y., Wang, C.F., & Tang, N.K. (2017). Effects of casting and heat treatment processes on the thermal conductivity of an Al-Si-Cu-Fe- Zn alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 189–195. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.090.
- [47] Chen, Y., Liu, C.Y., Zhang, B., Qin, F.C., & Hou, Y.F. (2020). Precipitation behavior and mechanical properties of Al–Zn–Mg alloy with high Zn concentration. *Journal of Alloys and Compounds*, 154005. doi:10.1016/j.jallcom.2020.154005.
- [48] Wang, G., Guan, Z., Wang, J., Ren, M., Yan, R., & Song, J. (2021). Effect of Cooling Rate and Modification by Strontium on the Thermal Conductivity of Al-8Si Alloy. *Metals* 2021, 11, 1334. <https://doi.org/10.3390/met11091334>.
- [49] Zhang X., Zhou Y., Zhong G., Zhang J., Chen Y., Jie, W., Schumacher P., & Li, J. (2022). Effects of Si and Sr elements on solidification microstructure and thermal conductivity of Al–Si-based alloys. *Mater Sci*, (2022) 57: 6428– 6444. doi:10.1007/s10853-022-07045-7.
- [50] Stalios, A.D. (2014). Research and innovation metallurgy made in and for europe the perspective of producers and end-users roadmap, *Metallurgy made in and for Europe*, The Perspective of Producers and End-Users Roadmap, European Commission.
- [51] Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Overview and evaluation of academic and industrial developments on aluminum casting alloys in recent years, *Uludağ University Faculty of Engineering Journal*, 26 (2021): 1191-1210 <https://dergipark.org.tr/tr/pub/uumfd/issue/66023/882586>.
- [52] Li, J., Li, F., Wang, W., Ma, X., & Li, J. (2018). Achieving Grain Refinement and Related Mechanical Property Improvement of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Through Severe Plastic Deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi:10.1007/s11665-018-3758-z.
- [53] Bahadır, A. (2021). *Effect of titanium-boron addition on microstructure and mechanical properties of eutectic aluminum-silicon alloy*, Karabük University, Graduate Education Institute, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Master's Thesis.
- [54] Ai, X., Wang, J., Wen, T., Yang, F., Dong, X., Yang, H., Ji, S., (2022). A high Fe-containing AlSi12 alloy fabricated by laser powder bed fusion, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 18, 2022, Pages 4513-4521, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.008>.
- [55] Aksoy, S., Ünüvar, E. & Acarer, M. (2017). *Investigation of abrasive wear behavior in compressor cylinder head made of als12 alloy*, Düzce University Journal of Science and Technology, 5 (1), 161-168. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/27453/289251>.

- [56] Zhang, M., Liu, K., Han, J., Qian, F., Wang, J., & Guan, S. (2021). Investigating the role of Cu, Zr and V on the evolution of microstructure and properties of Al-Si-Mg cast alloys. *Materials Today Communications*, 26, 102055. doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102055.
- [57] Kılıç, Ö. (2020). *The effect of orbital shaking on microstructure and mechanical properties in the casting of aluminum alloys*, Yıldız Technical University, Institute of Science and Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Materials Program, Published Master's Thesis.
- [58] Wang, D., Liu, S., Zhang, X., Li, X., Zhang, H., & Nagaumi, H. (2021). Fast aging strengthening by hybrid precipitates in high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg-Zn alloy. *Materials Characterization*, 179, 111312. doi:10.1016/j.matchar.2021.111312.
- [59] Tanyel, Z. (2014). Investigation of the Effect of Grain Refinement Process on Al-4.5Cu Casting Alloy over Time, Gazi University, Institute of Science and Technology, *Metal Education*, Published Master's Thesis.
- [60] Lei, Z., Wen, S., Huang, H., Wei, W., Nie, Z. (2023). Grain Refinement of Aluminum and Aluminum Alloys by Sc and Zr. *Metals* 2023, 13, 751. <https://doi.org/10.3390/met13040751>.
- [61] Türker, A. & Saklakoğlu, N. (2018). Investigation of the effect of Ag addition on the microstructure in semi-solid formed AlSi12 aluminum alloy, *Balıkesir University Journal of Science Institute*, 20 (1), 602-611. doi: 10.25092/baunfbed.423268.
- [62] Karun, A.S., Hari, S., Ebhota, W.S. (2017). Design and Processing of Bimetallic Aluminum Alloys by Sequential Casting Technique. *Metall Mater Trans A*, 48, 279–293 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3824-9>.
- [63] Liu, R., Zheng, J., Godlewski, L., Zindel, J., Li, M., Li, W., & Huang, S. (2020). Influence of pore characteristics and eutectic particles on the tensile properties of Al-Si-Mn-Mg high pressure die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 139280. doi:10.1016/j.msea.2020.139280.
- [64] Gu, C., Lu, Y., Cinkilic, E., Miao, J., Klarner, A., Yan, X., Alan A. Luo, A.A. (2019). Predicting grain structure in high pressure die casting of aluminum alloys: a coupled cellular automaton and process model, *Published by Elsevier*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025619300291>, Manuscript: 7d257a082038332affe4c01940dc4033.
- [65] Wang, Y., Deng, Y., Dai, Q., Jiang, K., Chen, J., & Guo, X. (2020). Microstructures and strengthening mechanisms of high Fe containing Al-Mg-Si-Mn-Fe alloys with Mg, Si and Mn modified. *Materials Science and Engineering: A*, 140477. doi:10.1016/j.msea.2020.140477.
- [66] Rakhmonov, J., Liu, K., Rometsch, P., Parson, N., & Chen, X.-G. (2020). Effects of Al(MnFe)Si dispersoids with different sizes and number densities on microstructure and ambient/elevated-temperature mechanical properties of extruded Al-Mg-Si AA6082 alloys with varying Mn content. *Journal of Alloys and Compounds*, 157937. doi:10.1016/j.jallcom.2020.157937.

- [67] Guan, R.-G., & Tie, D. (2017). A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30(5), 409–432. doi:10.1007/s40195-017-0565-8.
- [68] Zuo, M., Sokoluk, M., Cao, C., Yuan, J., Zheng, S., Li, X. (2019). Microstructure Control and Performance Evolution of Aluminum Alloy 7075 by Nano-Treating, *Scientific Reports*, 9: 0671, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47182-9>, www.nature.com/scientificreports.
- [69] Khoshghadam, P., Javidani, M.M., Maltais, A., Lévesque, J., Chen, X.G. (2023). Effect of Annealing Temperature on the Microstructure, Mechanical Properties, and Electrical Conductivity of 4xxx Series Al-Based Alloys, *Engineering Proceedings*, 43, no.1, 14. <https://doi.org/10.3390/engproc2023043014>.
- [70] Zhao, K., Gao, T., Yang, H., Hu, K., Liu, G., Sun, Q., Nie, J., Liu, X., (2021). Enhanced grain refinement and mechanical properties of a high-strength Al–Zn–Mg–Cu–Zr alloy induced by TiC nano-particles, *Materials Science and Engineering: A*, Volume: 806, 140852, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140852>.
- [71] Mofarreh, M., Javidani, M., Chen, X.G. (2022). Effect of Mn content on the hot deformation behavior and microstructure evolution of Al–Mg–Mn 5xxx alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 2022, 845, 143217.
- [72] Flipon, B., Grand, V., Murgas, B., Gaillac, A., Nicolaÿ, A., Bozzolo, N., & Bernacki, M. (2021). Grain size characterization in metallic alloys using different microscopy and post-processing techniques. *Materials Characterization*, 174, 110977. doi:10.1016/j.matchar.2021.110977.
- [73] Banerjee, S., Chakraborti, P. C., & Kumar Saha, S. (2019). An automated methodology for grain segmentation and grain size measurement from optical micrographs. *Measurement*. doi:10.1016/j.measurement.2019.03.
- [74] Li, X., Cui, L., Li, J., Chen, Y., Han, W., Shonkwiler, S., McMains, S. (2022). Automation of intercept method for grain size measurement: A topological skeleton approach, *Materials & Design*, Volume 224, December 2022, 111358, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111358>.
- [75] Miesenberger, B., Kozeschnik, E., Milkereit, B., Warczok, P., Povoden, K.E., (2022). Computational analysis of heterogeneous nucleation and precipitation in AA6005 Al-alloy during continuous cooling DSC experiments, Contents lists available at ScienceDirect, *Materialia*, 25, 101538, www.elsevier.com/locate/mtla.
- [76] Vijaya Ramnath, B., Elanchezhian, C., Jaivignesh, M., Rajesh, S., Parswajinan, C., & Siddique Ahmed Ghias, A. (2014). Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy–alumina–boron carbide metal matrix composites. *Materials & Design*, 58, 332–338. doi:10.1016/j.matdes.2014.01.068.
- [77] Birol, Y. (2012). AlB3 master alloy to grain refine AlSi10Mg and AlSi12Cu aluminium foundry alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 513, 150– 153. doi:10.1016/j.jallcom.2011.10.010.
- [78] Bolzoni, L., & Hari Babu, N. (2016). Engineering the heterogeneous nuclei in Al-Si alloys for solidification control. *Applied Materials Today*, 5, 255–259. doi:10.1016/j.apmt.2016.11.001.

- [79] Rodríguez, S.H., Goytia-Reyes, R.E. Dwivedi, D.K., Baltazar-Hernández, V.H., Flores-Zúñiga, H., & Pérez-López, M.J. (2011). On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al–Si–Mg alloy, *Materials and Design*, 32 (2011) 1865–1871, journal homepage: www.elsevier.com/locate/matdes.
- [80] Hekimoğlu, A.P., Hacıosmanoğlu, M., & Baki, M. (2019). Effect of zinc additives at different rates on the structural, mechanical and tribological properties of EN AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35: 4 (2020) 1799-1814.
- [81] Dong, J., Jiang, J. Wang, Y., Huang, M., Liu, Y., & Zhang, Y. (2023). Effect of Ti and Sr on the microstructure and mechanical properties of Al-12Si-4.5Cu-2Ni alloy, *Materials Letters*, 352 (2023) 135129, journal homepage: www.elsevier.com/locate/matlet.
- [82] Yalçın, B., & Varol, R. (2009). Determination of wear performance and some mechanical properties of sintered titanium alloys, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* Vol 24, No 1, 63-72, 2009.
- [83] Lipiński, T. (2023). Effect of AlTi5B1 Master Alloy with P on the Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7Mg Alloy, *Metals* 13, no. 9: 1560. <https://doi.org/10.3390/met13091560>.
- [84] Yu, J. M., Wanderka, N., Rack, A., Daudin, R., Boller, E., Markötter, H., & Banhart, J. (2018). Influence of impurities, strontium addition and cooling rate on microstructure evolution in Al-10Si-0.3Fe casting alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 818–827. doi:10.1016/j.jallcom.2018.06.372.
- [85] Samuel, A.M., Doty, H.W., Valtierra, S. F.H. Samuel, F.H. (2014). Effect of grain refining and Sr-modification interactions on the impact toughness of Al–Si–Mg cast alloys, *Materials and Design* 56 (2014) 264–273 Contents lists, journal homepage: www.elsevier.com/locate/matdes.
- [86] Balaban, C., Özkan Şen, Ö., Gökhan Özer, G., & Güler, K.A. (2006). Effect of grain refinement on the cooling curve and fluidity of alloy 380. 13th International Metallurgy and Materials Congress, Istanbul, Turkey
- [87] Beşergil, B. (2023). Nanoteknoloji ilişkili kavramlar açıklamalı sözlük. https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/hallpatch-iliskisi-hallpatch_13.html (Erişim Tarihi: 30.11.2023).
- [88] Wikipedia Contributors (2023). Grain boundary strengthening. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Grain_boundary_strengthening&oldid=1161972593 (Erişim Tarihi: 30.11.2023).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Alpaslan KILIÇARSLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- Yüksek Lisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri Ayhan Metal Pres Döküm A.Ş.'de Kalite Müdürü olarak çalışmaktayım.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kılıçarslan, A., Akbulut, H. (2024), Investigation of Modifier Elements Effect in the High Pressure Injection Casting For Eutectic Al-Si Alloys. Sakarya University, Faculty of Engineering, Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya University Journal of Science, 00(0), 000-000, DOI: 00.00000/saufenbilder.0000000.