

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇİNKO VE STRONSİYUM KATKILARININ EN AC 44100 ALAŞIMININ YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Süha ZİMİTOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU

RİZE
2023

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU danışmanlığında, Süha ZİMİTOĞLU tarafından hazırlanan *Çinko ve Stronsiyum Katkılarının EN AC 44100 Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 07/08/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri		**Unvanı, Adı SOYADI**	**İmza**
Başkan	:	Prof. Dr. Osman BİCAN	
Üye	:	Prof. Dr. İlker USTABAŞ	
Üye	:	Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU	

ETİK BEYAN

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim "Çinko ve Stronsiyum Katkılarının EN AC 44100 Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi" adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.
25/07/2023

Süha ZİMİTOĞLU

ÖN SÖZ

Alüminyum-silisyum alaşımları otomotiv, savunma, havacılık, uzay ve gemi inşa sanayi alanlarında yapılan imalatlarda önemli bir yer tutmakta ve yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşımların söz konusu sektörlerde yaygın olarak tercih edilmelerinin başlıca nedenleri arasında, temin edilmelerinin ve üretimlerinin kolay olması ile yoğunluklarının düşük ve özgül mukavemetlerinin yüksek olması gelmektedir. Korozyon dirençlerinin yüksek, ısıl genleşme katsayılarının düşük ve mukavemet değerlerinin pek çok uygulama için yeterli olması bu alaşımların diğer önemli özellikleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, söz konusu alaşımların bazı uygulamalar için yetersiz olan mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, aşınma dirençlerinin artırılması ve böylece kullanım alanlarının genişletilmesine yönelik çalışmalara da hali hazırda yoğun bir şekilde devam edilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında çinko ve stronsiyum ilavesi yapılarak piyasada yaygın olarak kullanılan bir alüminyum-silisyum alaşımı olan ticari EN AC 44100 alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla piyasadan temin edilen EN AC 44100 alaşımına indüksiyon ocağında ergitme ve kokil kalıba döküm yöntemiyle ağırlıkça %10 oranında çinko ve %0,02-0,14 stronsiyum ilave edildi. Alaşım elementi ilavesiyle elde edilen yeni EN AC 44100-%10Zn ve EN AC 44100-%10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımların yapısal, mekanik, tribolojik özellikleri ve bu özellikler arasındaki ilişkiler araştırıldı.

Tez konumun belirlenmesinde ve tez kapsamındaki gerekli çalışmaların yürütülmesinde beni yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU'na şükranlarımı sunarım. Arsin OSB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Makine Bölümünden Ahmet ÖZOĞLU ve Sebahattin TOKA hocalarım ile Çolakoğlu Mühendislik Makine Ltd. Şti. ailesine ve Arş. Gör. Murat HACIOSMANOĞLU'na çalışmama olan katkılarından ötürü teşekkür ederim. Hem bu çalışmada hem de tüm eğitim ve öğretim hayatımda yanımda olan annem ve babam başta olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Süha ZİMİTOĞLU
TRABZON/2023

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY I
ETİK BEYAN II
ÖN SÖZ III
İÇİNDEKİLER IV
ÖZET V
ABSTRACT VI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR VII
TABLOLAR LİSTESİ VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ IX
GİRİŞ 1
1. LİTERATÜR ÖZETİ 4
1.1. Alüminyum Esaslı Alaşımların Denge Diyagramları 5
1.1.1. İkili Al-Si, Al-Zn, Al-Sr ve Si-Sr Denge Diyagramları 5
1.1.2. Üçlü Al-Si-Sr Alaşımlarının Denge Diyagramları 9
1.2. Alüminyum – Silisyum Esaslı Alaşımların Özellikleri 9
1.2.1. Al-Si Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Yapısal Özellikleri 9
1.2.2. Al-Si Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri 14
1.2.3. Al-Si Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri 17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 19
2.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimi ve Üretimi 19
2.2. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özellikleri 21
2.3. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İrdelenmesi 23
3. BULGULAR 25
3.1. Alaşımların İçyapısı 25
3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular 48
3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular 49
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular 52
3.5. Aşınma Yüzeyleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinde Elde Edilen Bulgular 59
4. TARTIŞMA 74
5. ÖNERİLER 82
KAYNAKÇA 83

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ana Bilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Türü : Tezli Yüksek Lisans
Danışman : Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU
Hazırlayan : Süha ZİMİTOĞLU
Yıl : 2023
Sayfa Sayısı : 95

ÖZET

ÇİNKO VE STRONSİYUM KATKILARININ EN AC 44100 ALAŞIMININ YAPISAL VE MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada bir adet EN AC 44100, bir adet EN AC 44100-%10Zn ve farklı oranlarda Sr içeren yedi adet EN AC 44100-10Zn-XSr alaşımı döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların iç yapısı standart metalografik yöntemlerle incelendi. Söz konusu alaşımların sertliği Brinell yöntemiyle, mekanik özellikleri çekme deneyi ile, tribolojik özellikleri ise bilye-disk esaslı bir sürtünme-aşınma deney düzeneği yardımıyla belirlendi. EN AC 44100 alaşımının içyapısının α, ötektik Al-Si, primer Si ve β(Al-Fe-Si) fazlarından, EN AC 44100-10Zn alaşımının ise α-Al, ötektik Al-Si, Al-Fe-Si-Zn ve primer Si fazlarından oluştuğu gözlendi. EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarında EN AC 44100-10Zn alaşımındaki fazlardan farklı olarak Al-Zn-Fe-Si fazı gözlendi. EN AC 44100-10Zn alaşımında Sr oranı %0,04 olduğunda Sr-Al-Si-Zn fazı oluşmuştur. Ayrıca EN AC 44100-10Zn-0,08Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,1Sr alaşımlarında Al-Sr-Si fazı gözlendi. EN AC 44100 alaşımına yapılan %10Zn oranında Zn ilavesi yoğunluk, sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerini artırmıştır. EN AC 44100-10Zn alaşımına yapılan %0,02-0,08 Sr katkıları ise alaşımın sertlik, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerini azaltmış, %0,12 ve 0,14 oranındaki katkılar ise söz konusu değerleri önemli oranda artırmıştır. En yüksek sürtünme katsayısını EN AC 44100 alaşımı, en düşük sürtünme katsayılarını EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımları sergilemiştir. Zn ve Sr ilavelerinin EN AC 44100 alaşımının sürtünme katsayısını ve hacim kaybını önemli miktarda düşürdüğü görülmüştür. En düşük hacim kayıpları EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımlarında, en yüksek hacim kaybı ise EN AC 44100 alaşımından elde edildi.

Anahtar Kelimeler: Al-Si Esaslı Alaşımlar, İçyapı, Mekanik Özellikler, Triboloji

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Mechanical Engineering
Thesis Type : Master Thesis
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU
Author : Süha ZİMİTOĞLU
Year : 2023
Pages : 95

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ZINC AND STRONTIUM ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE EN AC 44100 ALLOY

EN AC 44100 and EN AC 44100-10%Zn, and seven EN AC 44100-10Zn-XSr alloys were produced by casting. The microstructure of the alloys was investigated by metallographic techniques. The hardness of the alloys was measured by Brinell method, mechanical properties were determined by tensile test, and tribological properties were tested by using a ball-on-disc based friction-wear test setup. It was observed that EN AC 44100 alloy consists of α, eutectic Al-Si, primary Si and β(Al-Fe-Si) phases, while EN AC 44100-10Zn alloy consists of α-Al, eutectic Al-Si, Al-Fe-Si-Zn and primary Si phases. Al-Zn-Fe-Si phase was observed in EN AC 44100-10Zn-(0.02-0.14)Sr alloys, different from the phases in EN AC 44100-10Zn alloy. When the Sr ratio is 0.04% in EN AC 44100-10Zn alloy, Sr-Al-Si-Zn phase is formed. In addition, Al-Sr-Si phase was observed in EN AC 44100-10Zn-0.08Sr and EN AC 44100-10Zn-0.1Sr alloys. Addition of 10%Zn to EN AC 44100 alloy increased the density, hardness, yield, and tensile strength. The addition of 02-08% Sr to the EN AC 44100-10Zn alloy decreased the hardness, yield strength and tensile strength values of the alloy, while the additions of 0.12% and 0.14 increased these values significantly. EN AC 44100 alloy exhibited the highest friction coefficient, EN AC 44100-10Zn-0.12Sr and EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alloys exhibited the lowest friction coefficients. It has been observed that Zn and Sr additions significantly reduces the friction coefficient and wear volume of EN AC 44100 alloy. The lowest wear volumes were obtained from EN AC 44100-10Zn-0.12Sr and EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alloys, and the highest wear volume was obtained from EN AC 44100 alloy.

Keywords: Al-Si Based Alloys, Mechanical Properties, Microstructure, Tribology

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al	:	Alüminyum
Si	:	Silisyum
Zn	:	Çinko
Sr	:	Stronsiyum
BSD	:	Brinel Sertlik Değeri
OM	:	Optik Mikroskop
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
dk	:	Dakika
kg	:	Kilogram
mg	:	Miligram
m	:	Metre
N	:	Newton
Mpa	:	Megapascal
^{o}C	:	Santigrat derece
ΔGT	:	Serbest Enerji Değişimi
ΔGh	:	Hacim Serbest Enerjisi
Ø	:	Çap
W	:	Uygulanan Yük
k	:	Aşınma sabiti
P_o	:	Akma Gerilmesi
V	:	Hacim Kaybı
XRD	:	X ışınları Difraksiyonu

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri 12
Tablo 2. Al-(2,5-30) Si bazlı alüminyum alaşımların mekanik özellikleri 15
Tablo 3. Bazı standart Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri 16
Tablo 4. Döküm yapılarak üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri 19
Tablo 5. EN AC 44100 ve EN AC 44100 alaşımının içyapısındaki fazların kimyasal bileşimi 30
Tablo 6. EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarının içyapılarındaki fazların kimyasal bileşimleri 46
Tablo 7. İncelenen alaşımlarda yoğunluk, sertlik, akma, çekme ve kopma uzaması değerleri 49
Tablo 8. İncelenen alaşımlarının sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve aşınma direnci verileri 59
Tablo 9. Aşınma yüzeylerinin ve aşınma parçacıklarının deney öncesi ve deney sonrası EDS analiz sonuçları 73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Al-Si denge diyagramı 7
Şekil 2. Al-Zn denge diyagramı 7
Şekil 3. Al-Sr denge diyagramı 8
Şekil 4. Si-Sr denge diyagramı 8
Şekil 5. Üçlü Al-Si-Sr alaşım sisteminin 273 ºC sıcaklıktaki izotermal kesiti 9
Şekil 6. Alaşımların üretiminde kullanılan indüksiyon ocağının fotoğrafı 20
Şekil 7. Üretilen alaşımların katılaştırılmasında kullanılan kokil kalıbın teknik resmi ve izometrik görseli 20
Şekil 8. Üretilen alaşım külçelerinden deney numunesi hazırlama sürecini gösteren akış diyagramı..... 21
Şekil 9. Yoğunluk, metalografi ve sertlik ölçüm numunelerinin teknik resmi ve izometrik görüntüsü 22
Şekil 10. Çekme deneyi numunesinin a) teknik resmi b) izometrik görünüşü 23
Şekil 11. Sürtünme-aşınma deney cihazının izometrik görüntüsü 24
Şekil 12. Aşınma deneylerinde kullanılan deney numunesinin teknik resmi ve izometrik görüntüsü 24
Şekil 14. 44100-10Zn alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni..... 29
Şekil 15. 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) yüksek büyütmeli SEM e) XRD deseni..... 33
Şekil 16. 44100-10Zn-0.04Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) düşük büyütmeli SEM görüntüsü d) yüksek büyütmeli SEM e) XRD deseni 35
Şekil 17. 44100-10Zn-0.06Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni..... 37
Şekil 18. 44100-10Zn-0.08Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni..... 39

Şekil 19. 44100-10Zn-0.1Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni..... 41
Şekil 20. 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni 43
Şekil 21. 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni 45
Şekil 22. 44100-10Zn-(0-0,14) Sr alaşımlarının sertlik, akma, çekme ve kopma uzamasının değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler 49
Şekil 23. EN AC 44100 alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 50
Şekil 24. EN AC 44100-10Zn alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 50
Şekil 25. EN AC 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 51
Şekil 26. EN AC 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 51
Şekil 27. EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü 52
Şekil 28. EN AC 44100 ve EN AC 44100-10Zn alaşımlarının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler..... 53
Şekil 29. EN AC 44100 alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri..... 53
Şekil 30. EN AC 44100-10Zn alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 54
Şekil 31. EN AC 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri..... 54
Şekil 32. EN AC 44100-10Zn-0.04Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri..... 55
Şekil 33. EN AC 44100-10Zn-0.06Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma

mesafesine göre değişimini gösteren eğri 55
Şekil 34. EN AC 44100-10Zn-0.08Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 56
Şekil 35. EN AC 44100-10Zn-0.1Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 56
Şekil 36. EN AC 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 57
Şekil 37. EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 57
Şekil 38. EN AC 44100-10Zn-(0-0,14)Sr alaşımlarının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri 58
Şekil 39. EN AC 44100, EN AC 44100-10Zn-(0-0,14)Sr alaşımlarında stronsiyum oranına göre hacim kayıpları, aşınma direnci ve sürtünme katsayılarının değişimini gösteren eğriler 59
Şekil 40. EN AC 44100 alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d) 62
Şekil 41. EN AC 44100-10Zn alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d) 64
Şekil 42. EN AC 44100-10Zn-0,02Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d) 66
Şekil 43. EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d) 68
Şekil 44. EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d) 70
Şekil 45. EN AC 44100 alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 70
Şekil 46. EN AC 44100-10Zn alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .. 71
Şekil 47. EN AC 44100-10Zn-0,02Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM

görüntüsü 71
Şekil 48. EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 72
Şekil 49. EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 72

GİRİŞ

Uzay, havacılık, otomotiv, savunma ve gemi inşa sanayinde giderek önemi artan yakıt ekonomisi nedeniyle hafif ve mukavemeti yüksek yeni alaşımların geliştirilmesi ve/veya kullanılan hafif alaşımlardan daha yüksek performans alınması yönündeki çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır.

Hafif alaşımlar arasında yer alan alüminyum (Al)-silisyum (Si) esaslı alaşımlar kolay ve nispeten ucuz olarak temin edilebilir olmaları, ergime sıcaklıklarının nispeten düşük olması nedeniyle dökümlerinin ekonomik olması, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk), aşınma dirençlerinin, korozyona karşı dayanımları ile birlikte, ısıl ve elektrik iletkenliklerinin yüksek olmaları gibi avantajlarından dolayı yukarıda belirtilen sanayi dallarındaki uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır (Hacıosmanoğlu vd., 2023; A. P. Hekimoğlu & Bayraktar, 2022; Moustafa vd., t.y.; Savaşkan & Hekimoğlu, 2022; Walker vd., 2012). Al-Si alaşımları söz konusu sanayi dallarında özellikle araç şaselerinin, pistonlarının, karbüratörlerinin, şanzıman kutularının, hava filtrelerinin, yatakların, radyatörlerin, motor bloklarının, radarların, uçak fren disklerinin, roket ve harp başlıklarının ve hidrolik dişli pompaların gövdelerinin imalatlarında kullanılmaktadır (Hekimoglu vd., 2020; A. P. Hekimoğlu vd., 2019; Paşa vd., 2018; Savaskan vd., 2022; Zhang & Zhang, 2020). Al-Si alaşımlarının bu mühendislik uygulamalarındaki performanslarının özellikle sertlik, mekanik, tribolojik ve sürünme özelliklerine bağlı olduğu, bu özelliklerin ise söz konusu alaşımların kimyasal bileşimi ve yapısal özellikleriyle yakından ilişkili olduğu bilinmektedir. Silisyum oranı Al-Si alaşımlarının özellikleri üzerinde en belirleyici faktörlerden biridir. Şöyle ki; ağırlıkça yaklaşık %12,6 Si içermeleri durumunda ikili Al-Si alaşımları ötektik bileşime sahip olmaktadır. Ötektik bileşimden (%12,6) daha düşük oranlardaki silisyum içeren Al-Si alaşımları daha yüksek mukavemet, süneklik, korozyon dayanımı ve düşük ısıl genleşme katsayısı sergilerken, ötektik bileşimden (%12,6 Si) daha yüksek oranlarda silisyum içeren Al-Si alaşımları ise daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sergilemektedirler (Du vd., 2023; Farahany vd., 2014; Gowri & Samuel, t.y.; R. Guo vd., 2023). Ötektik üstü Al-Si alaşımlarının daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sergilemeleri iç yapılarında bulunan kaba yapılı sert birincil silisyum parçacıklarının fazlalığından kaynaklandığı ileri sürülmektedir (Al-Helal vd., 2012;

Haghayeghi & Timelli, 2021; Z. Li & Yan, 2015). Ötektik altı Al-Si alaşımlarının daha yüksek mukavemet sergilemelerinin ise ötektik üstü yapıdaki çentik etkisi yaparak kırılmayı kolaylaştıran kaba yapılı birincil silisyum parçacıklarının içyapıdaki azlığından ve alüminyumca zengin sünek fazın hacimsel miktarının fazlalığından kaynaklandığı bilinmektedir (Dahle vd., 2005; Ludwig vd., 2014; C. L. Xu vd., 2006). Birincil silisyum parçacıklarının ve ince uzun iğne şekilli ötektik silisyum parçacıklarının boyutlarının küçültülmesi bir başka deyişle modifiye edilmeleri Al-Si alaşımlarının mukavemet değerlerini ve sünekliklerini artırmak için en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Jiang vd., 2005; Lim vd., 1997; Mao, Chen, vd., 2015; Shi vd., 2010). Katı çözelti sertleşmesi, ikincil faz sertleştirmesi, dispersiyon sertleştirmesi ve ısıl işlem uygulamaları ise söz konusu alaşımların mukavemet değerlerini artırmak için uygulanan diğer yöntemlerdir (Beder & Alemdag, 2021; Dong vd., 2020; Huang vd., 2018). Bu mukavemet artırma mekanizmaları Al-Si alaşımlarında genellikle alaşım elementi ilavesi, kontrollü soğutma veya ısıl işlem uygulamak suretiyle harekete geçirilmektedir (Savaskan vd., 2022; Savaşkan & Bican, 2010; Y. Yang vd., 2015). Söz konusu alaşım elementlerinin başında kalsiyum (Ca), fosfor (P), stronsiyum (Sr), magnezyum (Mg), bakır (Cu), mangan (Mn), vanadyum (V), zirkonyum, sodyum (Na), titanyum (Ti) ve bor (B) gelmektedir. Bu elementlerin Al-Si alaşımlarının içyapısında homojenliği artırdığı, elementlerin çekirdek büyümesini engelleyip tane boyutunun küçülmesine yol açarak silisyum parçacıklarını modifiye ettiği ve bu suretle mukavemetin artmasına neden olduğu bilinmektedir (Fat-Halla vd., 1988; Jiang vd., 2005; Mathew & Srirangam, 2022; Radhika vd., t.y.; Vijeesh vd., 2013).

Çinkonun sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısı nedeniyle alüminyum esaslı alaşımlarda kaymayı kolaylaştırdığı, sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınma direncini artırdığı bilinmektedir (Bican vd., 2014; Mao, Chen, vd., 2015; Savaşkan & Bican, 2010; Zhu vd., 2018). Ancak literatürde Al-Si esaslı alaşımların sertlik, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine çinkonun etkisini konu alan yeterince çalışma bulunmamaktadır. EN AC 44100 alaşımı yaklaşık olarak %12 oranında silisyum içeren bir başka deyişle ötektik bileşime yakın oranda silisyum içeren standartlaşmış bir ticari alaşımdır. Bu alaşımın da yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine çinko-stronsiyumun etkisini inceleyen bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu çalışmada, %10 oranında çinko ilavesi yapılmış EN AC 44100 alaşımının yapısal, mekanik ve

tribolojik özelliklerine modifiye edici stronsiyum elementinin etkilerini incelemek ve EN AC 44100+%10Zn alaşımı için en uygun stronsiyum oranının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1. LİTERATÜR ÖZETİ

Başta otomotiv, savunma, havacılık, elektrik, uzay ve gemi inşa sanayi olmak üzere birçok sanayi dalında hafiflik, üretim maliyeti ve enerji tasarrufu göz önüne alınarak yeterli mukavemete sahip düşük yoğunluklu malzemeler tercih edilmektedir(Bayça vd., 2020; Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Beder & Alemdag, 2021; Haciosmanoglu vd., 2023; Paşa Hekimoğlu & Savaşkan, t.y.; Savaşkan & Bican, 2010). Alüminyum alaşımları ergime noktalarının düşük olması nedeniyle düşük döküm maliyetlerine ve düşük yoğunlukları nedeniyle yüksek özgül mukavemete (mukavemet/yoğunluk) sahiptirler (Çevirir vd., 2018; Durgutlu vd., 2008; Feaugas & Haddou, 2007; Jung vd., 2016; Tebib vd., 2014). Bu nedenle söz konusu alaşımlar yukarıda belirtilen sanayi alanlarında tercih edilen malzemeler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Enerji tasarrufu sayesinde yakıt tüketiminin azaltılması sera etkisine yol açan gazların da azalmasına yol açmaktadır. Alüminyum esaslı alaşımların bir diğer avantajı da döküm, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekillendirme yöntemlerine ve uygun kimyasal bileşimde olmaları durumunda ısıl işleme elverişli olmalarıdır (Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Çaliş & Hekimoğlu, 2023; Scepanovic vd., 2019; Shehata vd., 2021). Alüminyum esaslı alaşımlar bu avantajlarının yanı sıra birçok mukavemet artırma yöntemine de elverişlidir. Söz konusu mukavemet artırma yöntemleri arasında katı çözelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi, modifikasyon, ikincil faz sertleşmesi ve tane incelmesi mekanizmaları başta gelmektedir (Closset & Gruzleski, 1982; Elsebaie vd., 2013; Prukkanon vd., 2009). Alüminyum alaşımlarında sertlik ve/veya mukavemetin artırılmasının genel olarak bu alaşımların aşınma direncinin de artmasına yol açtığı bilinmektedir.

Al-Si esaslı alaşımlar diğer alüminyum alaşımlarına göre daha kolay temin edilebilmeleri, daha düşük yoğunlukta olmaları ve daha kolay dökülebilmeleri gibi avantajlarından dolayı alüminyum esaslı alaşımlar içinde en yaygın kullanılanlardır (Bayça vd., 2020; A. Hekimoğlu vd., t.y.; Paşa vd., 2018). Silisyumun sertliğe ve aşınma direncine olumlu katkısı bu alaşımların yüksek aşınma direnci istenen mühendislik uygulamalarında da kullanımlarının yaygınlaşmasına yol açmıştır. Al-Si alaşımlarının sertlik ve mukavemet özellikleri birçok uygulama için yeterli olsa da, bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini artırarak kullanım alanlarını geliştirmek

veya performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde sürdürülmektedir (Alemdağ vd., 2020; Alemdağ & Beder, 2014; Moustafa vd., 2003). Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Al-Si alaşımlarının tribolojik özelliklerinin de sertlik ve mukavemet değerleriyle ilişkili olduğunu, söz konusu değerlerin artırılması ile aşınma dirençlerinin de iyileştiği ortaya koyulmuştur (Beder & Alemdag, 2021; Radhika vd., t.y.; Shankar vd., 2021). Katı çözelti sertleşmesi ve içyapıdaki silisyum parçacıklarının modifiye edilmesi Al-Si alaşımlarında tercih edilen mukavemet artırma mekanizmaları arasında ön plana çıkanlardandır (Barbosa vd., 2014; Dahle vd., 2005; Knuutinen vd., t.y.; Nogita vd., t.y.).

Çinko kafes parametresi oranı (c/a) yüksek sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısı nedeniyle katı yağlayıcı gibi görev yaparak kaymayı kolaylaştıran ve sürtünmeyi azaltan bir elementtir. Aynı zamanda ikili Al-Zn denge diyagramına göre alüminyumun içerisinde katı durumda çok yüksek oranlarda çözünürlük gösterdiği bilinmektedir (R. Guo vd., 2023; Provisional vd., t.y.). Stronsiyumun ise Al-Si alaşımlarının içyapısında bulunan silisyum parçacıklarını modifiye ederek yapının homojenleşmesine ve mukavemetin artmasına katkı sağladığı bilinmektedir (Czerwinski vd., 2016; Ganiev vd., t.y.; Patel & Prajapati, 2012). Çinko ve stronsiyumun bu özellikleri göz önüne alınarak, %10 oranında çinko içeren Al-Si esaslı bir alaşım olan ticari EN AC 44100+%10Zn alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine stronsiyumun etkisinin detaylı olarak incelenmesi EN AC 44100+%10Zn alaşımı için en uygun stronsiyum oranının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.1. Alüminyum Esaslı Alaşımların Denge Diyagramları

1.1.1. İkili Al-Si, Al-Zn, Al-Sr ve Si-Sr Denge Diyagramları

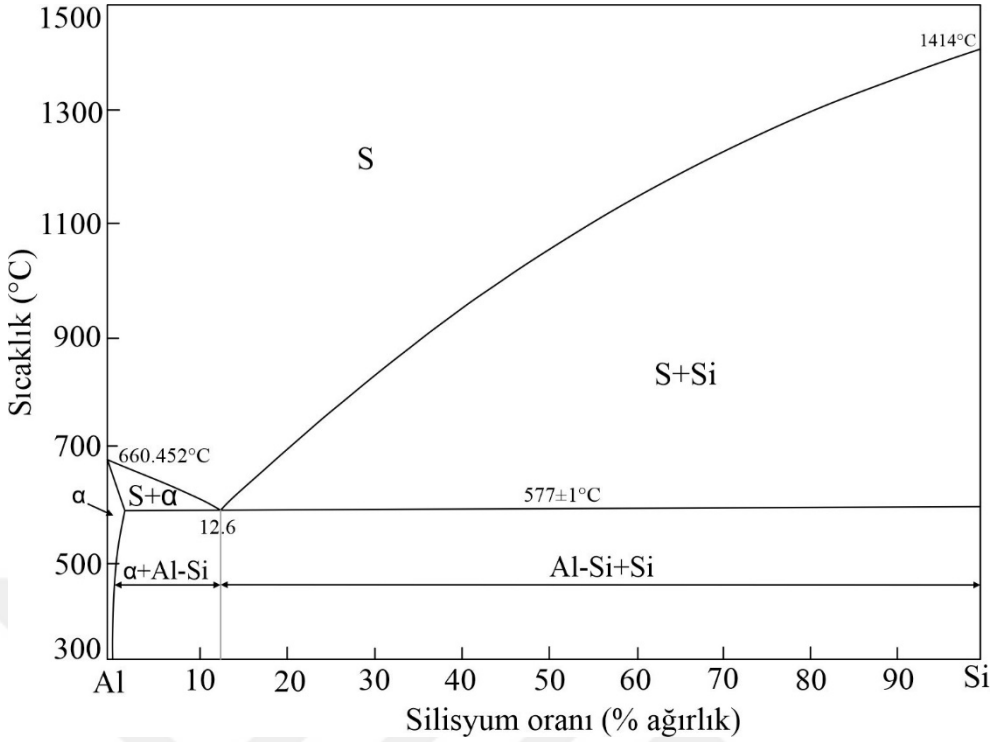
Al-Si, Al-Zn ve Al-Sr denge diyagramları sırasıyla Şekil 1, 2, 3 ve 4'te verilmektedir. Bu diyagramlar farklı sıcaklık ve/veya kimyasal bileşimlerde söz konusu sistemlerde denge durumunda oluşabilecek fazları göstermektedir. İkili Al-Si denge diyagramına göre oda sıcaklığında bu sistemde kimyasal bileşime göre iç yapıdaki hacimsel oranları değişen α-Al fazı, ötektik Al-Si fazı ve birincil silisyum fazları oluşmaktadır, Şekil 1. Denge diyagramında da görüleceği üzere yaklaşık olarak % 12,6 silisyum oranında ve 577 °C sıcaklıkta ötektik dönüşüm meydana gelmektedir.

Al-Si denge sisteminde en düşük ergime sıcaklığı ötektik bileşimde görülmektedir. Oda sıcaklığında bazı silisyum atomları alüminyumun kafes yapısı içinde çözünebilse de genel olarak silisyumun alüminyum içerisindeki çözünürlüğü yok denecek kadar azdır.

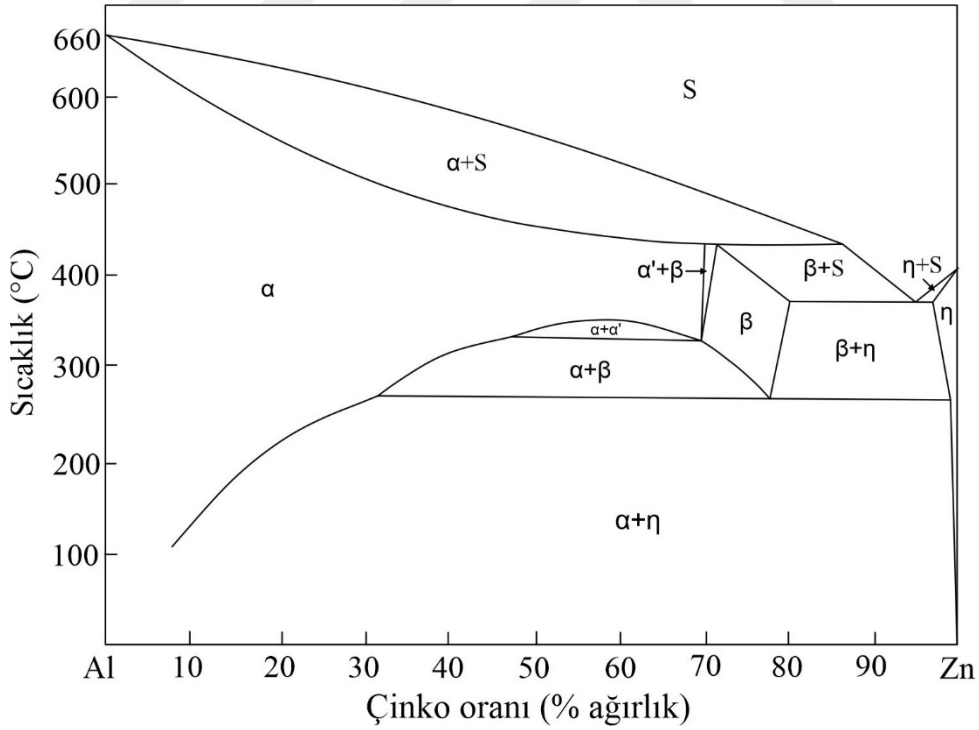
Faz diyagramına göre ikili Al-Zn alaşımları denge koşullarında soğutulmaları durumunda oda sıcaklığında alüminyumca zengin α fazı ve/veya çinkoca zengin η fazlarından oluşan bir içyapı sergilemektedir, Şekil 2. Denge dışı soğuma koşullarında yüksek sıcaklık fazı olan β fazı oda sıcaklığında da Al-Zn alaşımlarının içyapılarında gözlenebilmektedir (Ebhota & Jen, 2018; Feaugas & Haddou, 2007; Labisz vd., 2016). Şekil 2'de verilen faz diyagramından anlaşılacağı üzere alüminyumun içinde çinkonun çözünürlüğü, çinkonun içinde alüminyumun çözünürlüğünden çok daha fazladır.

Al-Sr alaşım sisteminde oda sıcaklığında Al_4Sr, Al_2Sr ve Al_7Sr_8 intermetalik bileşikler oluşmaktadır, Şekil 3. İkili Al-Sr faz diyagramı (Şekil 3) göz önüne alındığında sıvı durumunda birbiri içerisinde tam çözünürlük gösteren alüminyum ve stronsiyumun katı durumda birbiri içerisinde çözünürlüğü yok veya ihmal edilebilecek düzeyde kabul edilebilir.

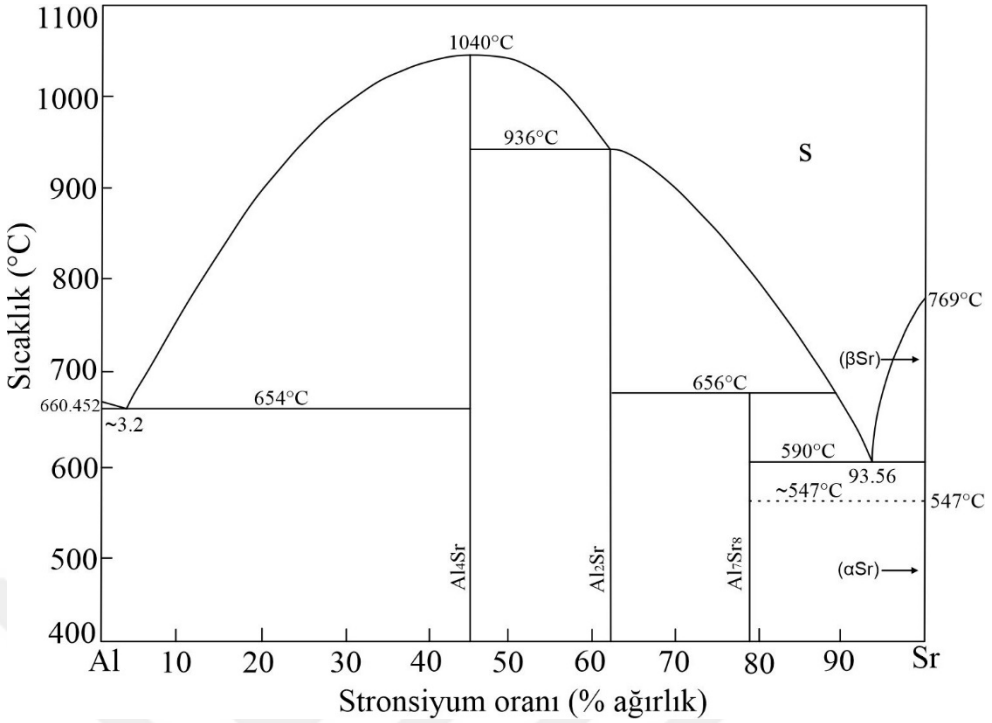
İkili Si-Sr alaşım sistemi de yukarıda açıklanan tüm denge diyagramlarında olduğu gibi sıvı durumda tam çözünürlük sergilemektedir. Söz konusu alaşım sistemi oda sıcaklığında ise katı çözünürlük göstermemektedir ve kimyasal bileşime bağlı olarak Si_2Sr, SiSr ve $SiSr_2$ bileşiklerinden oluşan bir iç yapı sergilemektedir, Şekil 4.



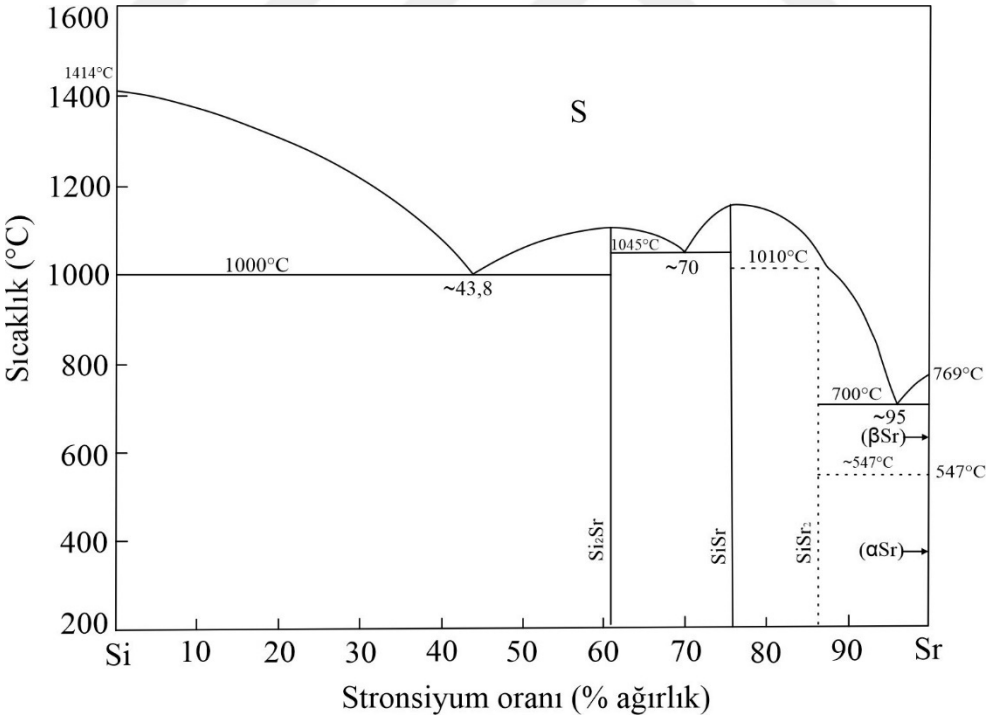
Şekil 1. Al-Si denge diyagramı (Provisional vd., t.y.)



Şekil 2. Al-Zn denge diyagramı (L Murray vd., 1971)



Şekil 3. Al-Sr denge diyagramı (C. Wang vd., 2003)

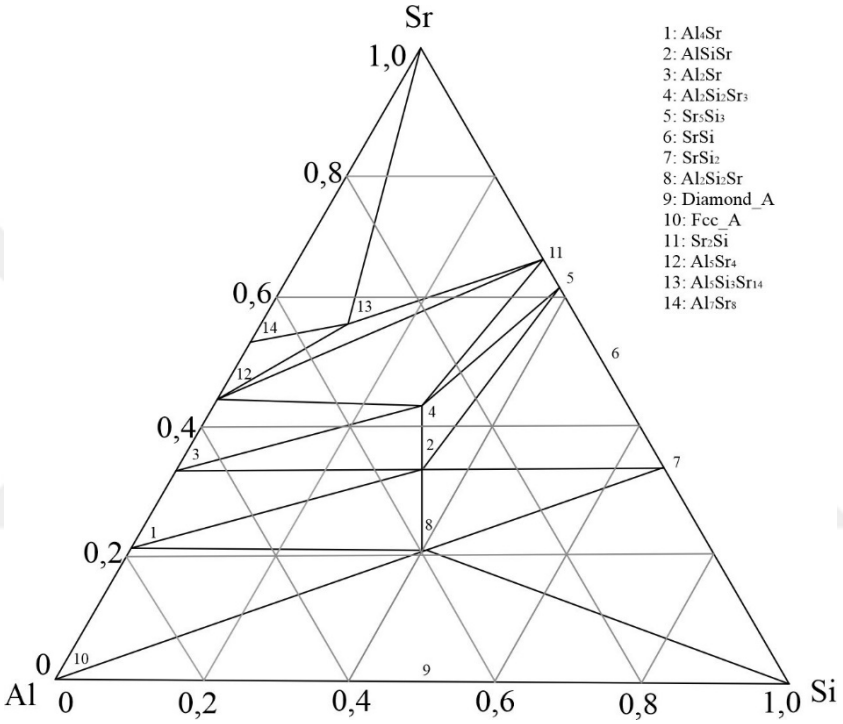


Şekil 4. Si-Sr denge diyagramı (Palenzona & Pani, 2004)

1.1.2. Üçlü Al-Si-Sr Alaşımlarının Denge Diyagramları

Üçlü Al-Zn-Si ve Al-Si-Sr alaşım sistemine ait denge diyagramı henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak bu sistemin 273°C sıcaklıktaki kesiti Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

Üçlü AlSiSr, $Al_2Si_2Sr_3$, Al_2Si_2Sr, $Al_8Si_3Sr_{14}$ ve ikili Al_4Si, Al_2Si, Sr_5Si_3, SrSi, $SrSi_2$, Sr_2Si, Al_5Sr_4, Al_7Sr_8, gibi bileşiklerin oluştuğu görülmektedir, Şekil 5.



Şekil 5. Üçlü Al-Si-Sr alaşım sisteminin 273 ºC sıcaklıktaki izotermal kesiti (Hanna & Hellawell, t.y.)

1.2. Alüminyum – Silisyum Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.2.1. Al-Si Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Yapısal Özellikleri

Ticari ve TS EN 1706 standardında tanımlanmış bazı alüminyum ve/veya silisyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu alaşımlar söz konusu standartta AlCu, AlSiMgTi, AlSi7Mg, AlSi10Mg, AlSi ve AlSi5Cu alaşım grupları altında toplanmakta ve Al-Si esaslı olanlar %1,5-13 arasında silisyum

içermektedir (Beroual vd., 2019; Dai vd., 2012; Ebhota & Jen, 2018). Al-Si esaslı alaşımlarda en yaygın kullanılan alaşım elementlerinin başında Cu, Mg, Ti, Zn, Mn, Sn, Pb ve Ni gelmektedir. Söz konusu alaşımların bileşiminde ayrıca eser miktarlarda safsızlıktan gelen ve/veya modifikasyon amacıyla düşük miktarlarda ilave edilen demir (Fe), kalsiyum (Ca), krom (Cr), titanyum (Ti), bor (B), stronsiyum (Sr), bizmut (Bi), fosfor (P), lantanit (La), antimon (Sb), sodyum (Na), ve lityum (Li) gibi elementlerde yer almaktadır (Barrirero vd., 2014; Jeon vd., 2019; Knuutinen vd., t.y.). Al-Si alaşımlarının kimyasal bileşimleri istenen yapısal, fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerin yanı sıra gerekiyorsa uygulanacak ısıl işleme göre belirlenmektedir (Dong vd., 2020; B. Guo vd., 2022; Ibrahim vd., 2014; Savaşkan & Hekimoğlu, 2014).

Alüminyum silisyum esaslı alaşımlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları hali hazırda yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu alaşımlar üzerinde son zamanlarda yapılan çalışmalarda vanadyum, sodyum, kükürt, molibden, bizmut, bor, neodimyum, stronsiyum, fosfor, antimon gibi katkı elementlerinin yapısal ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır (Z. Chen vd., 2014; Özaydın vd., 2018; Vandersluis vd., 2018; C. Yang vd., 2020).

İkili Al-Si alaşım sisteminde denge koşulları olması durumunda %12,6 silisyum oranında ötektik faz gözlenmektedir (Dahle vd., 2005; Knuutinen vd., t.y.; Vasudevan vd., 2023). Silisyum oranı bu değerin altında olması durumunda alaşımların yapısında alüminyumca zengin α ve ötektik Al-Si fazı gözlenmekte ve artan silisyum oranı ötektik Al-Si fazının yapıdaki oranı artmaktadır (Vandersluis vd., 2018; Wu vd., 2014; H. Yang vd., 2015). Ötektik Al-Si fazı alüminyumca zengin bir matris üzerinde ince uzun iğne şekilli olarak adlandırılan silisyum parçacıkların yer aldığı bir yapıdır (Rao vd., 2018; Shi vd., 2010; C. L. Xu vd., 2006). Denge dışı soğuma durumunda ise yapıda birincil silisyum parçacıkları da yer almaktadır (Z. Li & Yan, 2015; Mao, Chen, vd., 2015; Shi vd., 2010). Al-Si alaşımlarında silisyum oranının %12,6 değerini aşması durumunda ise iç yapı denge koşullarında ötektik Al-Si fazı ve primer Si parçacıklarından, denge dışı katılaşma koşullarında ise ilave olarak α-Al fazlarından oluşmaktadır (Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Paşa HEKİMOĞLU & Emre TURAN, 2019). Ötektik üstü kimyasal bileşime sahip Al-Si alaşımlarında artan silisyum oranı ile yapıdaki primer silisyum parçacıklarının miktarı artmaktadır (Al-Helal vd., 2012; Lim vd., 1997; Vijeesh & Prabhu, 2014; Walker vd., 2012). Al-Si

alaşımlarında silisyum oranı arttıkça soğuma hızı da artmaktadır (El Sebaie vd., 2008; Kasprzak vd., 2009; Shehata vd., 2021).

Al-Si alaşımlarının malzeme özelliklerine birçok alaşım elementinin etkisi detaylı olarak incelenmiştir (Al-Helal vd., 2012; Beder & Alemdag, 2021; Casari vd., 2014; Jeon vd., 2019). Bu çalışmalarda alaşım elementlerinin alüminyum matrisi içerisinde çözünme oranlarının üzerine çıkması durumunda iç yapıda farklı faz yapılarının oluştuğu ve alaşım elementinin içyapı üzerindeki etkisine bağlı olarak mekanik özelliklerde de değişimler olduğu ortaya koyulmuştur (Abedi vd., 2013; Barrirero vd., 2016; Bolzoni vd., 2015; Cáceres vd., 1999; El Sebaie vd., 2008; Mao, Yan, vd., 2015; Suresh vd., 2010).

Al-Si alaşımların malzeme özelliklerine çinkonun etkisi üzerine literatürde yeterince çalışma bulunmamaktadır. Yasin Alemdağ ve Murat Beder tarafından yapılan bir çalışmada (Alemdağ & Beder, 2014; Beder & Alemdag, 2021), Al-7Si alaşımına %5'e kadar farklı oranlarda çinko katılarak çinkonun bu alaşımın yapısal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ilave edilen çinkonun içyapıda yeni bir faz oluşmasına neden olmadığı gözlenmiştir.

Ötektik ve primer silisyum parçacıklarının modifikasyonun sağlanması için Al-Si alaşımlarına Bi, P, Sr, La, Sb, Na, B ve Ti gibi elementlerin ilave edildiği birçok çalışma bulunmaktadır (Hanna & Hellawell, t.y.; Jiang vd., 2005; Vijeesh vd., 2013). Ötektik ve/veya birincil silisyum parçacıklarının küçültülmesi ve küreselleştirilmesi yoluyla modifikasyonun sağlandığı bu çalışmalarda silisyum parçacıklarının içyapıda daha homojen bir dağılım sergiledikleri de gözlenmiştir (Fat-Halla vd., 1988; Raghukiran & Kumar, 2015; Shakiba vd., 2014). Al-Si alaşımlarında söz konusu modifikasyon veya tane inceltilmesi tane büyümesinin engellenmesi mekanizmasına dayandırılmıştır. Bu nedenle modifiye edici elementler literatürde aynı zamanda tane inceltici elementler olarak bilinmektedir (Barrirero vd., 2014; Elsebaie vd., 2013; Niu vd., 2017; Pandee vd., 2017).

Al-Si alaşımlarının malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yönelik literatürde çok sayıda çalışma olmasına rağmen, çinko ilavesi yaparak katı çözelti oluşumunun ve aynı zamanda stronsiyum ilavesi yaparak modifikasyonun malzeme özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışma henüz yapılmamıştır.

Tablo 1. Ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri

Alaşım Grubu	Kimyasal Bileşim	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Her biri	Toplam
AlCu	AlCu4MgTi	Kalan	0,15 0,2	0,3 0,35	4,2 5	0,1	0,2 0,35	-	0,05	0,1	0,05	0,05	0,15 0,25	0,03	0,1
	AlCu4Ti	Kalan	0,15 0,18	0,15 0,19	4,2 5,2	0,55	-	-	-	0,07 0,08	-	-	0,15 0,25	0,03	0,1
AlSiMgTi	AlSi2MgTi	Kalan	1,6 2,4	0,5 0,6	0,08 0,1	0,3 0,5	0,5 0,65	-	0,05	0,1	0,05	0,05	0,07 0,15	0,05	0,15
AlSi7Mg	AlSi7Mg	Kalan	6,5 7,5	0,45 0,55	0,15 0,2	0,35	0,25 0,65	-	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05 0,2	0,05	0,15
	AlSi7Mg0,3	Kalan	6,5 7,5	0,15 0,19	0,03 0,05	0,1	0,3 0,45	-	-	0,07	-	-	0,1 0,18	0,03	0,1
	AlSi7Mg0,6	Kalan	6,5 7,5	0,15 0,19	0,03 0,05	0,1	0,5 0,7	-	-	0,07	-	-	0,1 0,18	0,03	0,1
AlSi10Mg	AlSi10Mg-(a)	Kalan	9 11	0,4 0,55	0,03 0,05	0,45	0,25 0,45	-	0,05	0,1	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
	AlSi10Mg-(b)	Kalan	9 11	0,45 0,55	0,08 0,10	0,45	0,25 0,45	-	0,05	0,1	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
	AlSi10Mg-(Cu)	Kalan	9 11	0,55 0,65	0,30 0,35	0,55	0,25 0,45	-	0,15	0,35	0,1	-	0,15 0,2	0,05	0,15
	AlSi9Mg	Kalan	9 10	0,15 0,19	0,03 0,05	0,1	0,3 0,45	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,10
	AlSi10Mg	Kalan	9 11	0,45 0,90	0,08 0,1	0,55	0,25 0,50	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15 0,2	0,05	0,15

Tablo 1 (Devam). Ticari alüminyum-silisyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri

Alaşım Grubu	Alaşım	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Her biri	Toplam
AlSi	AlSi11	Kalan	10 11,8	0,15 0,19	0,03 0,5	0,1	0,45	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,1
	AlSi12 (b)	Kalan	10,5 13,5	0,55 0,65	0,10 0,15	0,55	0,10	-	0,1	0,15	0,1	-	0,15 0,20	0,05	0,15
	AlSi12 (a)	Kalan	10,5 13,5	0,40 0,55	0,03 0,05	0,35 0,55	-	-	-	0,1	-	-	0,15	0,05	0,15
	AlSi12 (Fe)	Kalan	10,5 13,5	0,45 0,9	0,08 0,1	0,5	-	-	-	0,15	-	-	0,15	0,05	0,25
	AlSi9	Kalan	8 11	0,55 0,65	0,08 0,1	0,2 0,65	0,1	-	0,05	0,15	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
AlSi5Cu	AlSi6Cu4	Kalan	5 7	0,9 0,1	3 5	0,55	0,55	0,15	0,45	2	0,3	0,15	0,2 0,25	0,05	0,35
	AlSi5Cu3Mg	Kalan	4,5 6	0,5 0,6	2,6 3,6	0,2 0,55	0,20 0,45	-	0,1	0,2	0,1	0,05	0,2 0,25	0,05	0,15
	AlSi5Cu3Mn	Kalan	4,5 6	0,7 0,8	2,5 4	0,55	0,4	-	0,3	0,55	0,2	0,1	0,15 0,2	0,05	0,25
	AlSi5Cu1Mg	Kalan	4,5 5,5	0,55 0,65	1 1,5	0,55	0,4 0,65	-	0,25	0,15	0,15	0,05	0,05 0,2	0,05	0,15
	AlSi5Cu3	Kalan	4,5 6	0,5 0,6	2,6 3,6	0,1	0,05	-	0,10	0,20	0,1	0,05	0,2 0,25	0,05	0,15

1.2.2. Al-Si Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

İkili Al-(2,5-30)Si alaşımlarının ve bazı standart Al-Si alaşımlarının mekanik sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir. İkili Al-Si alaşımlarında silisyum oranı arttıkça alaşımların sertliği de sürekli artmaktadır. Akma dayanımı %17 silisyum oranına kadar, çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değeri %9 silisyum oranına kadar artmaktadır (Tablo 2). İkili alaşımlarda çekme mukavemetinin %9 silisyum oranından sonra azalması içyapıda nispeten sünek alüminyumca zengin α fazının miktarının azalması ve nispeten gevrek ötektik Al-Si fazının ve birincil silisyum parçacıklarının yapıdaki miktarının artmasından kaynaklandığı ortaya koyulmuştur (Al-Helal vd., 2012; Jeon vd., 2019; Jiang vd., 2005; Shi vd., 2010; C. L. Xu vd., 2006). Ticari Al-Si alaşımlarının dökülmüş durumdaki sertlik değerleri 45-75BSD, akma dayanımı değerleri 70-180 MPa, çekme dayanımı değerleri 135-200MPa, kopma uzaması değerleri % 1-6 aralıklarında değişim göstermektedir, (Tablo 3). Bu değerler ısıl işlem uygulanmış durumda sırasıyla 50-127 BSD, 120-260 MPa, 220-295 MPa, %1-3 aralıklarında olmaktadır (Tablo 3). İkili Al-Si alaşımlarının sertlik ve mekanik özellikleri alaşım elementi ilavesi, silisyum parçacıklarını modifiye edici element ilavesi ve ısıl işlem uygulamalarıyla artırılabilmektedir (Closset & Gruzleski, 1982; Huang vd., 2018; Radhika vd., t.y.; Vijeesh vd., 2013).

Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere ikili Al-Si alaşımlarına en yaygın ilave edilen alaşım elementi bakır, mangan ve magnezyumdur. Bu elementler katı çözelti sertleşmesinin yanı sıra söz konusu alaşımların ısıl işlem yeteneğinin artırılmasını sağlamaktadır(Bayraktar & Hekimoğlu, 2023; Han vd., 2014). Son zamanlarda yapılan çalışmalarda stronsiyum, fosfor, sodyum, vanadyum, bizmut, çinko ve antimon gibi elementlerin Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir ve söz konusu elementlerin Al-Si alaşımlarının sertlik ve mekanik özelliklerini olumlu etkilediği ortaya koyulmuştur (Hanna & Hellawell, t.y.; Mao, Yan, vd., 2015). Zn, Mg, Li, Cu gibi elementlerin Al-Si alaşıma katılmasıyla katı çözelti sertleşmesi ve ikincil faz sertleşmesi mekanizmalarına bağlı olarak mekanik özelliklerin iyileştiği gözlenmiştir (Bolzoni vd., 2015; Xavier vd., t.y.). Bu mekanizmalar sayesinde sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen artış atomların kafes yapısında çarpılmaya neden olması ve dislokasyon hareketlerini engellenmesine dayandırılarak açıklanmaktadır (X. G. Chen & Fortier, 2010; Y. Chen vd., 2014).

Tablo 2. Al-(2,5-30) Si bazlı alüminyum alaşımların mekanik özellikleri (Hekimoglu vd., 2020)

Alaşım	Sertlik (BSD)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Basma Dayanımı (MPa)
Al- 2,5 Si	45	45,9	92,0	7,8	403,0
Al- 5 Si	48	53,8	110,7	8,4	427,5
Al- 7 Si	50	61,8	132,8	8,9	437,3
Al- 9 Si	52	72,2	154,7	11,0	458,5
Al– 10 Si	53	78,0	142,0	6,0	450
Al-12Si	53	85,7	143,4	3,6	442,7
Al- 12,6 Si	54	86,7	140,3	4,5	443,8
Al- 15 Si	55	88,8	129,2	2,4	443,8
Al- 17 Si	57	93,7	127,6	2,4	435,7
Al- 20 Si	59	91,3	112,8	1,5	434,7
Al- 25 Si	60	88,3	90,3	0,6	411,9
Al- 30 Si	77	45,5	66,6	0,2	393,1

Al-12Si esaslı alaşıma düşük oranlarda katılan stronsiyum, sodyum, fosfor ve antimon gibi tane inceltici ve aşılayıcı elementler silisyum parçacıklarını küçültüp küreselleştirme yoluyla modifiye etmektedir (Dai vd., 2013; Farahany vd., 2014; Vijeesh & Prabhu, 2014). Bu sayede kaba parçacıkların yaptığı çentik ve gerilme yığılması etkileri azaltılarak mukavemet artışı elde edilebilmektedir (Derin vd., 2017; Huang vd., 2018; Sharma vd., 2006).

Al-Si alaşımlarında döküm sonrası hızlı soğutma ve çözündürme-su verme-yaşlandırma aşamalarından oluşan ısıl işlem uygulamaları da diğer mukavemet artırma yöntemleridir (Fabrizi & Timelli, 2016; Kasprzak vd., 2009; Shehata vd., 2021). Hızlı soğuma ile atomların difüzyonu engellenir ve tane yapısının ince kalması sağlanmakta, bu da tane sınırı sayısını artırdığı için mukavemetin artmasına yol açmaktadır (Cai vd., 2020; Savaşkan & Bican, 2010; Y. Yang vd., 2015). Endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan ısıl işlemler T4, T5 ve T6 ısıl işlemleridir (Beroual vd., 2019; Cai vd., 2020; Casari vd., 2014).

Tablo 3. Bazı standart Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri

Alaşım grubu	Kimyasal gösterim	Isıl İşlem	Çekme dayanımı (MPa, min.)	Akma dayanımı (MPa, min.)	Kopma uzaması (% min.)	Brinell Sertlik değeri (BSD, min)
AlSiMgTi	AlSi2MgTi	D	140	70	3	50
		T6	240	180	3	85
AlSi7Mg	AlSi7Mg	D	140	80	2	50
		T6	220	180	1	75
	AlSi7Mg0,3	T6	230	190	2	75
	AlSi7Mg0,6	T6	250	210	1	85
AlSi10Mg	AlSi10Mg(a)	D	150	80	2	50
		T6	220	180	1	75
	AlSi10Mg(b)	D	150	80	2	50
		T6	220	180	1	75
	AlSi10Mg(Cu)	D	160	80	1	50
		T6	220	180	1	75
	AlSi9Mg	T6	230	190	2	50
AlSi	AlSi11	D	150	70	6	75
	AlSi12(b)	D	150	70	4	75
	AlSi12(a)	D	150	70	5	45
	AlSi9	D	170	80	4	50
AlSi5Cu	AlSi6Cu4	D	150	90	1	60
	AlSi5Cu1Mg	T4	170	120	2	80
		T6	230	200	<1	100
	AlSi7Cu0,5Mg	T6	250	190	1	85
AlSi9Cu	AlSi8Cu3	D	150	90	1	60
	AlSi9Cu1Mg	D	135	90	1	60
	AlSi7Cu2	D	150	90	1	60
AlSi(Cu)	AlSi12(Cu)	D	150	80	1	50
AlSiCuNiMg	AlSi17Cu4Mg	D	200	180	1	90
		T5	295	260	1	127
AlMg	AlMg3	D	140	70	3	50
	AlMg5	D	160	90	3	55
	AlMg5(Si)	D	160	100	3	60

D: Dökülmüş durumda.
T4: Çözündürme ve doğal yaşlandırma uygulanmış.
T5: Döküm sonrası yapay veya aşırı yaşlandırma.
T6: Çözündürme ve yapay yaşlandırma uygulanmış.
a: Modifiye edici element içermemektedir.

Alüminyum içerisinde katı çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak yaklaşık %70'e kadar çıkabilen çinkonun Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özellikleri üzerine

yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Bu konuda Alemdağ & Beder ve Hacıosmanoğlu ve arkadaşları tarafından yapılan iki çalışma (Alemdag vd., 2021; Alemdağ & Beder, 2014) ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmalarda Al-7Si ve Al-17Si alaşımlarının özelliklerine maksimum %5 çinko ilavesinin etkisi araştırılmış ve artan çinko alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Ancak hem ikili Al-Si alaşımlarının çeşitliliği hem de çinko ilavesinin düşüklüğü göz önüne alınırsa bu çalışmaların çinkonun Al-Si alaşımlarının özelliklerine etkilerinin ortaya koyulması açısından yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Yüksek oranda çözünürlüğe sahip Çinkonun etkisinin ötektik ve ötektik üstü (Alemdağ & Beder, 2014; Hekimoglu vd., 2020; Labisz vd., 2016). Diğer taraftan hem çinko hem de modifiye edici stronsiyum içeren Al-Si alaşımlarının özelliklerinin incelendiği bir çalışmanın da henüz yapılmadığı görülmektedir.

1.2.3. Al-Si Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Al-Si alaşımlarının yoğun uygulama alanlarından olan özellikle motor bloğu, piston, biyel, yatak, fren diski ve hidrolik dişli pompa gövdelerinde sürtünme ve aşınma davranışları sistem/parça performansı ve ömrü açısından aşırı önem arz etmektedir (Ganiev vd., t.y.; Hao vd., 2022; Moustafa vd., t.y.; Walker vd., 2012). Bu nedenle söz konusu parçaların üretiminde sürtünme katsayısı düşük, aşınma direnci yüksek malzemelerin tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar Al-Si alaşımlarında aşınma direncinin silisyum oranına, alaşımın sertliğine ve çekme dayanımına bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Bican vd., 2014; Elmadagli vd., 2007; Lim vd., 1997; Zhu vd., 2018). Silisyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların aşınma dirençleri de artmaktadır (Savaşkan & Bican, 2010; Vijeesh & Prabhu, 2014; F. Wang vd., 2004). Bu durum artan silisyum oranı ile yapıdaki primer silisyum parçacıklarının ve alaşımın sertliğin artmasına dayandırılmaktadır (Z. Li & Yan, 2015; Shi vd., 2010; C. L. Xu vd., 2006) Bu nedenlerden dolayı özellikle yüksek aşınma direncinin istendiği uygulamalarda genellikle ötektik üstü Al-Si alaşımları tercih edilmektedir (Prukkanon vd., 2009; Walker vd., 2012). Ancak alaşımların içyapısındaki primer silisyum parçacıklarının gevrek ve keskin köşeli olması kolay kırılmalarına ve eş çalıştıkları parçaları çizmelerine/kazımalarına neden olabilmektedir (Savaşkan & Bican, 2010; Savaşkan & Tan, 2014; F. Wang vd., 2004). Hem bu nedenle hem de silisyum oranının

çok fazla yükseltilmesi durumunda mukavemetteki azalma nedeniyle son yıllarda yapılan çalışmalarda silisyum oranını çok fazla yükseltmeden söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetini artırarak üstün aşınma direnci elde etmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Dai vd., 2012; Ebhota & Jen, 2018; Niu vd., 2017). Bu çalışmalarda özellikle alaşım elementi ilavesi, modifikasyon ve ısıl işlem uygulamalarıyla Al-Si alaşımlarının aşınma dirençlerinin artırılabildiği gözlenmiştir(Beder & Alemdag, 2021; El Sebaie vd., 2008; Han vd., 2014; Moustafa vd., 2003; Muhamed vd., 2020).

Çinko kafes parametreleri oranı (c/a) yüksek sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısına sahip bir elementtir. Bu özelliği ve yüzeylerde oluşumuna neden olduğu çinko oksitler sayesinde özellikle yağsız çalışma koşullarında katı yağlayıcı gibi görev yaparak kaymayı kolaylaştırdığı bilinmektedir (Bican vd., 2014; Dai vd., 2012; Savaşkan & Bican, 2010; G. Wang vd., 2022)]. İkili Al-Si alaşımlarının yapısında α-Al fazı ise sünek bir faz olup yağsız çalışma koşullarında eş çalıştığı parçaya yapışıp kaymayı veya sistemin çalışmasını engelleyebilmektedir. Çinkonun katı yağlayıcı gibi davranma özelliğini kullanarak Al-Si alaşımlarının belirtilen dezavantajını gidermek, bir başka deyişle daha az sürtünme ve daha yüksek aşınma direnci elde etme amacıyla son yıllarda Al-Si alaşımlarına çinko ilavesi yapılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda Al-7Si ve Al-17Si alaşımlarının tribolojik özelliklerine %5'e kadar çinko ilavesinin etkileri sistematik olarak incelenmiş ve çinkonun bu alaşımların hem sürtünme katsayılarını düşürdüğü hem de aşınma dirençlerini artırdığı gözlenmiştir. (Hacıosmanoğlu, 2019; Hekimoğlu vd., 2020; Paşa vd., 2018). Al-Si alaşımlarında silisyum parçacıklarının modifiye edilmesiyle tribolojik özelliklerinin geliştirildiğini ortaya koyan bazı çalışmalar da bulunmaktadır (Beder & Alemdag, 2021; Radhika vd., t.y.; Shankar vd., 2021). Ancak alaşımların kimyasal bileşim aralığının genişliği göz önüne alındığında bu çalışmaların yeterli düzeyde olduğunu söylemek mümkün değildir. Ayrıca ticari/standart EN AC 44100 alaşımının tribolojik özelliklerine çinkonun ve modifikasyon elementi stronsiyumun etkilerinin birlikte incelendiği bir çalışma da henüz yapılmamıştır (Alemdağ & Beder, 2014; Öztürk vd., 2018; Farahany vd., 2013; Alemdag vd., 2021).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimi ve Üretimi

Bu çalışmada bir adet EN AC 44100, bir adet EN AC 44100-10Zn ve 7 adet EN AC 44100-10Zn-(0.02-0.14)Sr alaşımı orta frekanslı bir indüksiyon ocağında ergitme ve kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri Tablo 5'te verilmiştir.

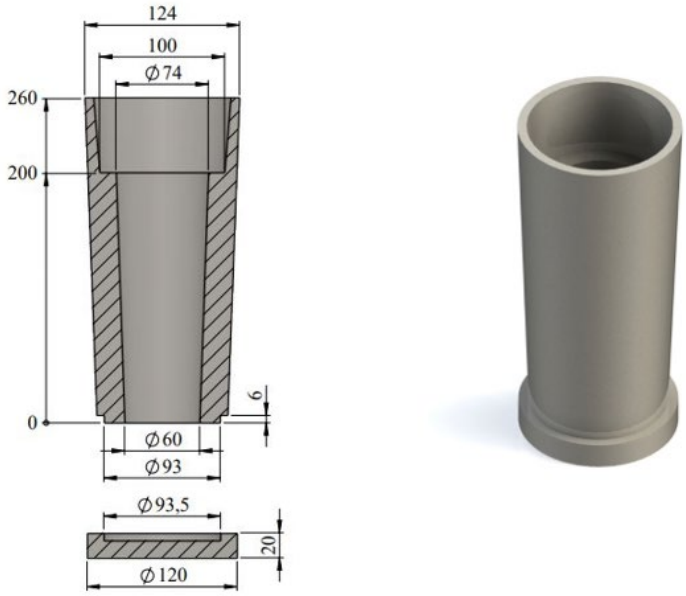
Tablo 4. Döküm yapılarak üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal Bileşim Oranları (%ağırlık)			
	Al	**Si**	**Zn**	**Sr**
EN AC 44100	Kalan	12	---	---
EN AC 44100-10Zn	Kalan	12	10	---
EN AC 44100-10Zn-0,02Sr	Kalan	12	10	0,02
EN AC 44100-10Zn-0,04Sr	Kalan	12	10	0,04
EN AC 44100-10Zn-0,06Sr	Kalan	12	10	0,06
EN AC 44100-10Zn-0,08Sr	Kalan	12	10	0,08
EN AC 44100-10Zn-0,1Sr	Kalan	12	10	0,10
EN AC 44100-10Zn-0,12Sr	Kalan	12	10	0,12
EN AC 44100-10Zn-0,14Sr	Kalan	12	10	0,14

EN AC 44100 alaşımı piyasadan temin edilmiştir ve yeniden ergitilmiştir. EN AC 44100-10Zn alaşımı EN AC 44100 alaşımına ağırlıkça %99,98 saflıkta %10 çinko ilavesi yapılarak üretildi. EN AC 44100-10Zn-(0.02-0.14)Sr alaşımları ise EN AC 44100 alaşımına uygun oranlarda çinko ve Al-15Sr master alaşımı ilave edilerek gerçekleştirildi. İstenen kütlesel oranları verecek şekilde tartılarak hazırlanan alaşım bileşenleri fotoğrafı Şekil 6'da verilen orta frekanslı bir indüksiyon ocağında ergitilmiştir. Ergimiş durumdaki alaşım homojen karışım elde edilmesi amacıyla uygun döküm sıcaklığında (660 °C) 30 dakika bekletildi ve daha sonra teknik resmi Şekil 7'deki verilen SAE 8620 çeliğinden imal edilmiş oda sıcaklığındaki kalıba dökülerek katılaştırıldı.



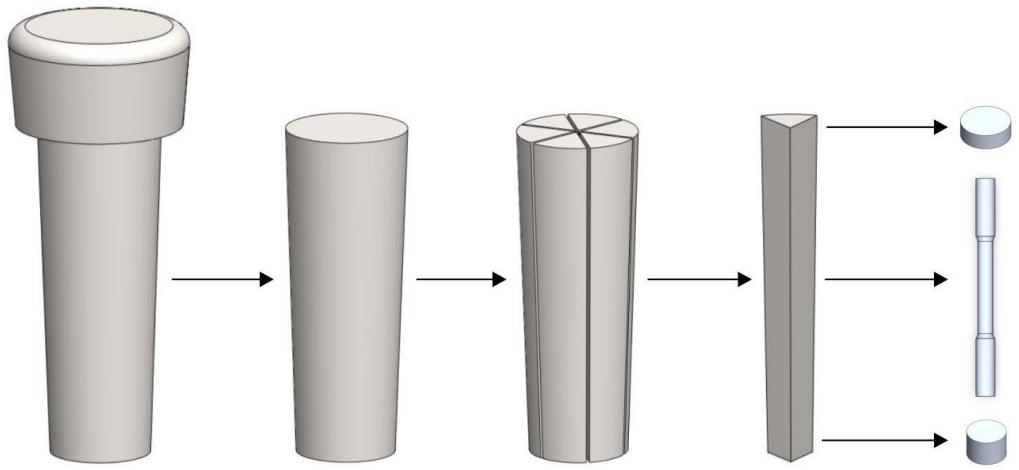
Şekil 6. Alaşımların üretiminde kullanılan indüksiyon ocağının fotoğrafı



Şekil 7. Üretilen alaşımların katılaştırılmasında kullanılan kokil kalıbın teknik resmi ve izometrik görseli (Boyutlar mm'dir)

2.2. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özellikleri

Üretilen alaşımların fiziksel, yapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla alaşım külçelerinden Şekil 8'da verilen işlem akış sırasına göre talaşlı işlem ile uygun boyutlarda numuneler hazırlanmıştır.

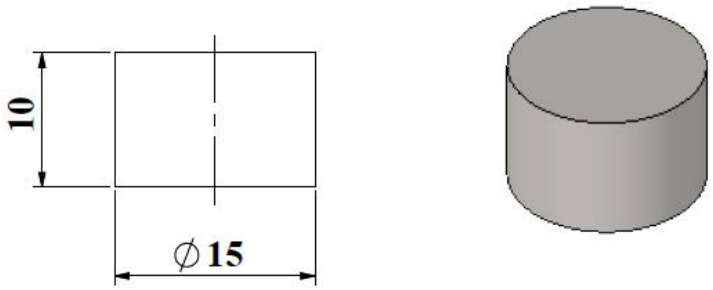


Şekil 8. Üretilen alaşım külçelerinden deney numunesi hazırlama sürecini gösteren akış diyagramı

Yoğunluk, metalografi ve sertlik numuneleri alaşım külçelerinin en alt kısmından hazırlanmıştır. Bu numunelerin teknik resmi Şekil 9'da verilmiştir. Çekme deneyi numuneleri alaşım külçelerinin orta kısmında aşınma deney numuneleri üst kısmından hazırlanmıştır. Çekme deneyi numunesinin teknik resmi ve izometrik görseli Şekil 10a ve Şekil 10b'de verilmiştir. Alaşımların yoğunlukları ölçülen kütle değerlerinin hacim değerlerine bölünmesiyle elde edildi. Yoğunluk ölçümleri için gerekli hacim değerleri dereceli/ölçekli silindir kap yardımıyla belirlendi.

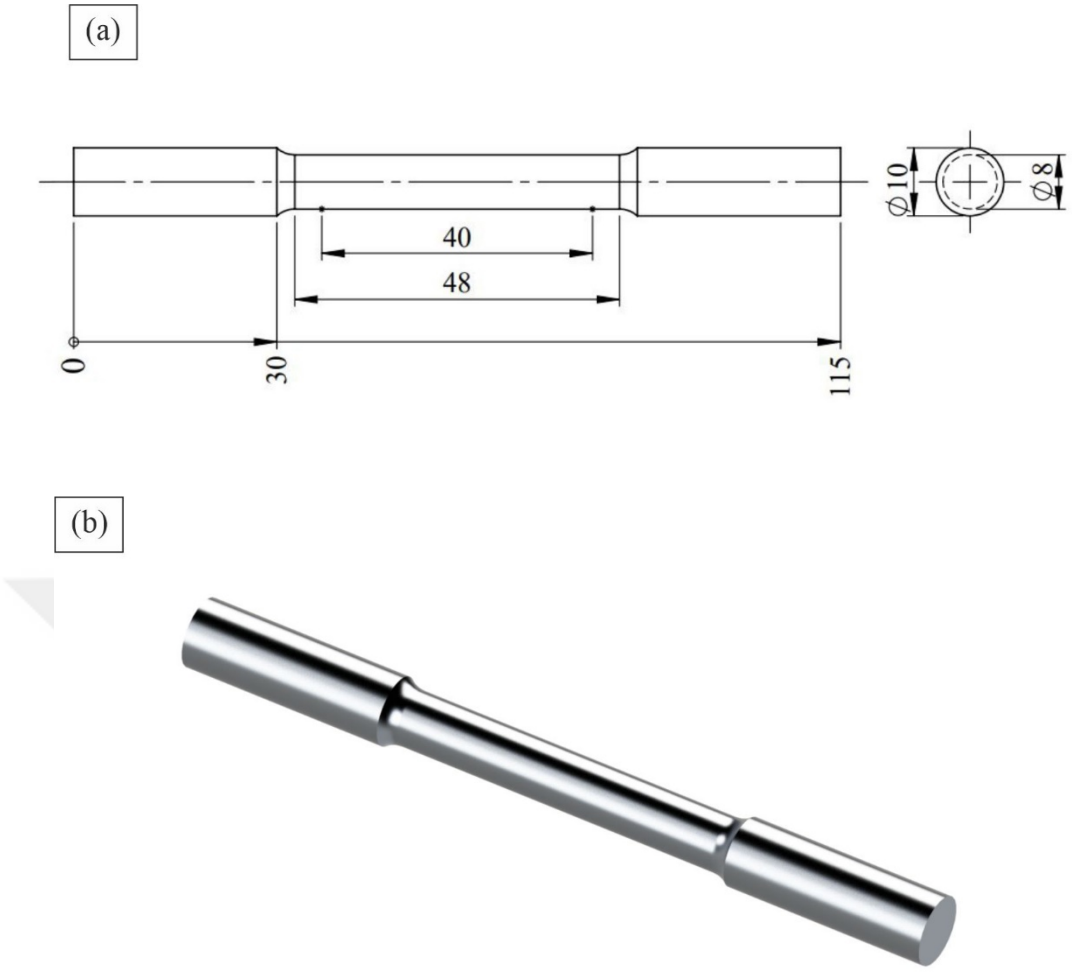
İçyapı incelemeleri Şekil 9'da teknik resmi verilen numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Bu amaçla numuneler 300, 600, 1200 ve 2000 numaralı SiC zımparalar ile zımparalandı. Zımparalama işleminden sonra yüzeyler sırasıyla 9, 3 ve 0.02 μm'lik SiO_2 aşındırıcı partikülleri içeren süspansiyonlar ile parlatıldı. Parlatılan numuneler optik mikroskobunda 100, 200 ve 500 büyütme altında incelendi ve içyapılarını gösteren optik fotoğraflar çekildi. Alaşımların içyapısı optik mikroskop incelemelerine ilave olarak taramalı elektron mikroskobunda da (SEM) incelendi, görüntülendi ve fazların belirlenmesine yönelik enerji dispersif spektroskopisi (EDS)

analizleri gerçekleştirildi. Mikroskop incelemelerinde görüntülenen fazlar X-ışını kırınım deseni (X-RD) çalışmalarıyla teyit edildi. X-RD çalışmaları 3 derece/dakika tarama hızında ve 1,54059 °A olan Cu-Kα radyasyon kaynağı kullanılarak 20°-90° derece arasında gerçekleştirildi.



Şekil 9. Yoğunluk, metalografi ve sertlik ölçüm numunelerinin teknik resmi ve izometrik görüntüsü (Boyutlar mm'dir)

Alaşımların sertliği Brinell Sertlik ölçme yöntemi ile 62,5 kgxf yük altında 2,5 mm çapında bilye uç kullanarak belirlendi. Sertlik ölçümlerinde teknik resmi Şekil 9'da verilen numuneler kullanıldı. Her bir alaşım numunesi üzerinde 10 adet ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalamasının alınması suretiyle alaşımların sertlik değerleri belirlendi. Üretilen alaşımların akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri üniversal bir deney makinasında yapılan çekme deneyleri ile belirlendi. Deneylerde TS 138 standardına göre hazırlanan ve teknik resmi Şekil 10a'da verilen Ø8x40mm ölçü boyutlarına sahip numuneler kullanıldı. Çekme deneyleri 10^{-3} s^{-1}'lik deformasyon hızında gerçekleştirildi. Üretilen her bir alaşım için 6 adet çekme deneyi yapıldı ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

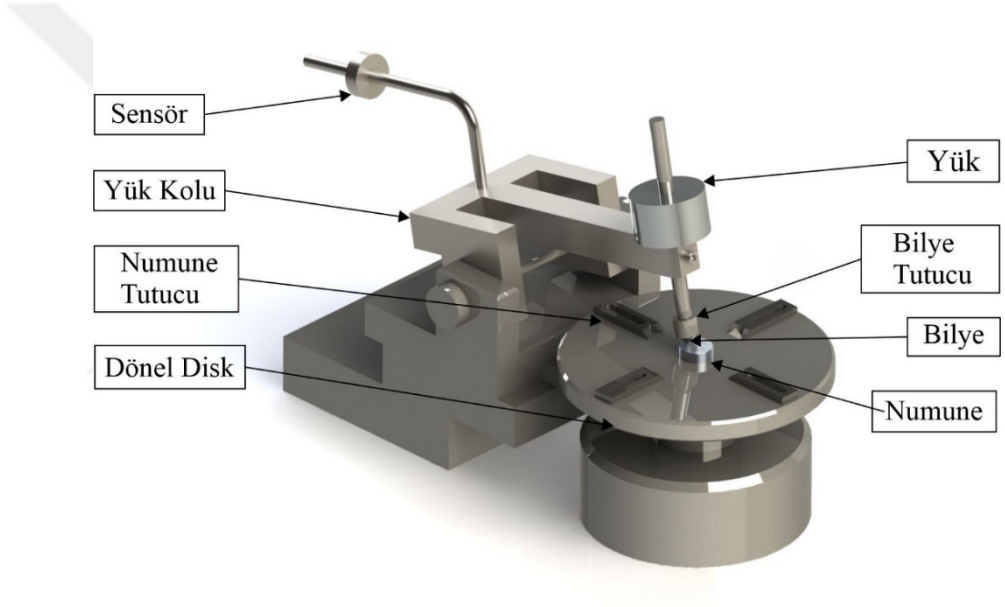


Şekil 10. Çekme deneyi numunesinin a) teknik resmi b) izometrik görünüşü (Boyutlar mm'dir)

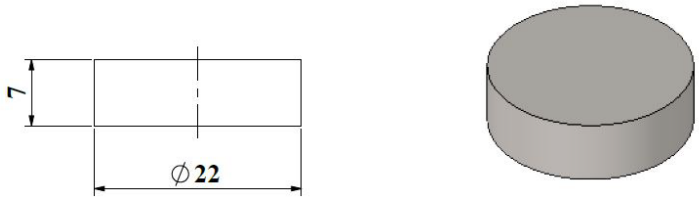
2.3. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İrdelenmesi

Alaşımların tribolojik özellikleri izometrik görüntüsü Şekil 11'de verilen, detayları ve çalışma şekli literatürde (Alemdağ & Beder, 2014; Beder & Alemdag, 2021) yer alan ASTM: G99 standartlarına uygun bir bilye disk esaslı deney düzeneğinde Şekil 12'de teknik resimi verilen numuneler ile gerçekleştirildi. Deneylerde aşındırıcı olarak 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş ve 58-62 RSD sertlik değerine sahip ve 6mm çapında olan bir bilye kullanılmıştır. Aşınma deneylerine başlamadan önce numunelerin yüzeyleri önce 600 ve ardından 1200 numaralı SiC zımparalar ile taşlandı. Deneyler yağsız ortamda (kuru) 5N'luk yük altında, 0,16 m/s kayma hızında ve 1000 m'lik kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Belirtilen deney koşulları literatürde benzer alaşımlar için yapılan çalışmalar (Alemdağ vd., 2020; Çaliş

& Hekimoğlu, 2023; Hacıosmanoğlu vd., 2023; A. P. Hekimoğlu vd., 2019) göz önüne alınarak belirlenmiştir. Aşınma deneylerine başlamadan önce numuneler ultrasonik temizleyicide sırasıyla trikloretilen (C_2HCI_3) ve alkol+aseton karışımında yıkanarak kurutuldu. Kurutma işleminden hemen sonra 0,01 mg'lık hassasiyetli bir terazide kütle ölçümleri gerçekleştirildi. Aşınma deneylerinden sonra da numuneler aynı şekilde temizlenerek kütleleri ölçüldü. Belirlenen kütle farkı alaşımın yoğunluğuna bölünerek alaşımlarda aşınma nedeniyle oluşan hacim kayıpları belirlendi. Üretilen alaşımların aşınma karakteristiklerini belirlemek amacıyla aşınma deney numunelerinin yüzeylerinde ve aşınma parçacıkları üzerinde SEM incelemeleri ve EDS analizleri yapıldı.



Şekil 11. Sürtünme-aşınma deney cihazının izometrik görüntüsü



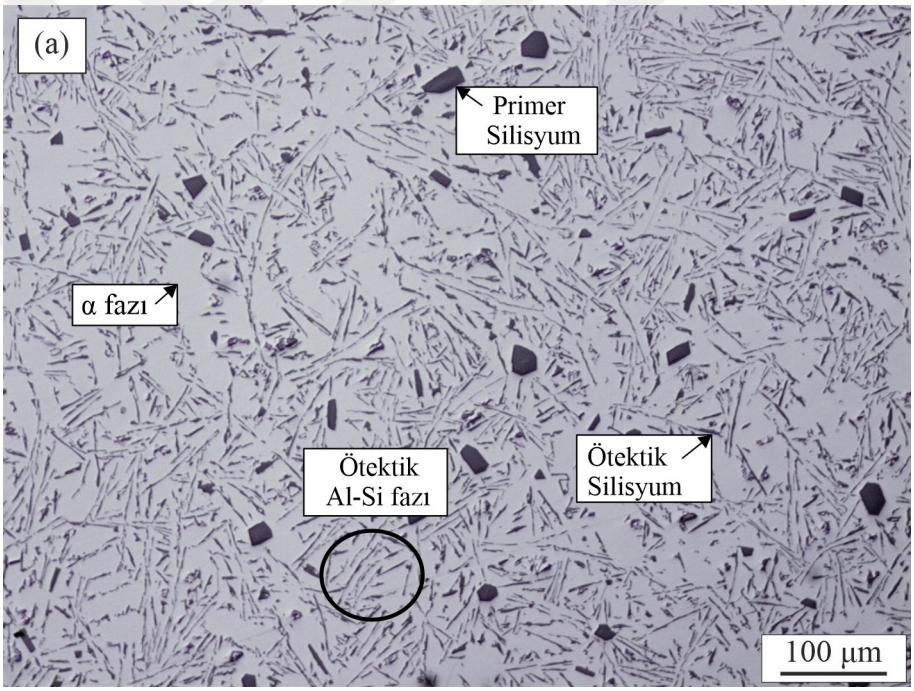
Şekil 12. Aşınma deneylerinde kullanılan deney numunesinin teknik resmi ve izometrik görüntüsü (Boyutlar mm'dir)

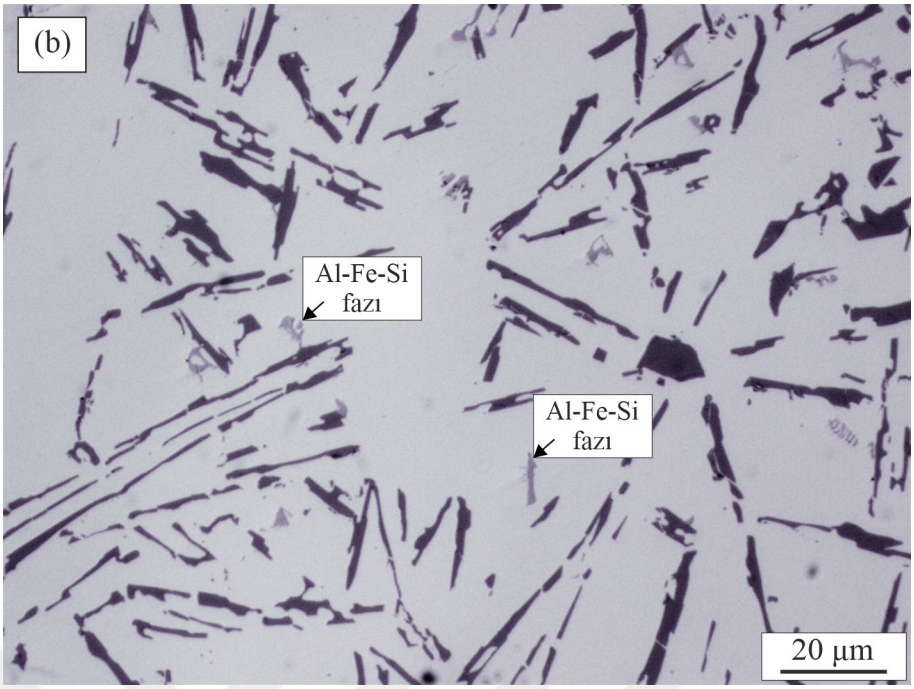
3. BULGULAR

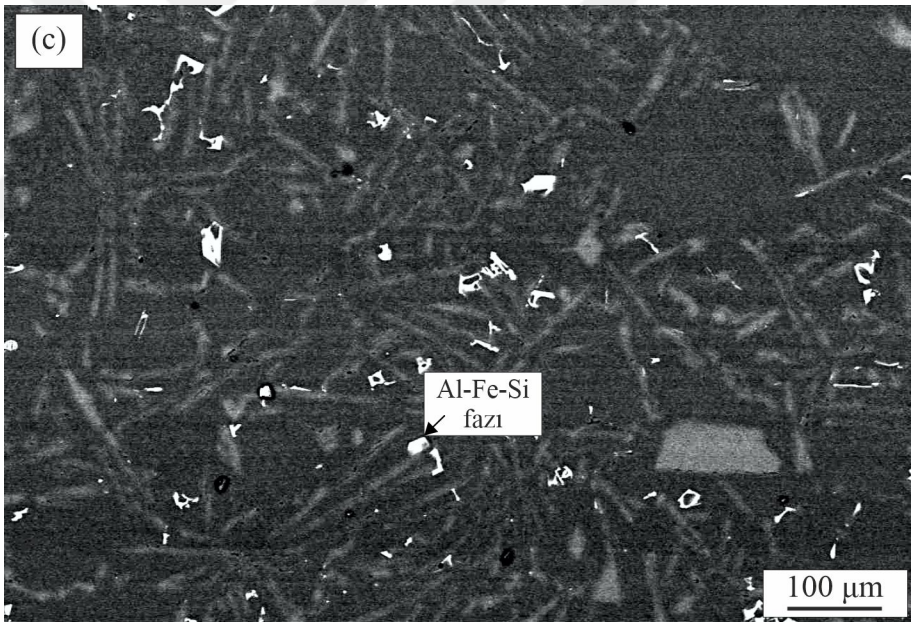
3.1. Alaşımların İçyapısı

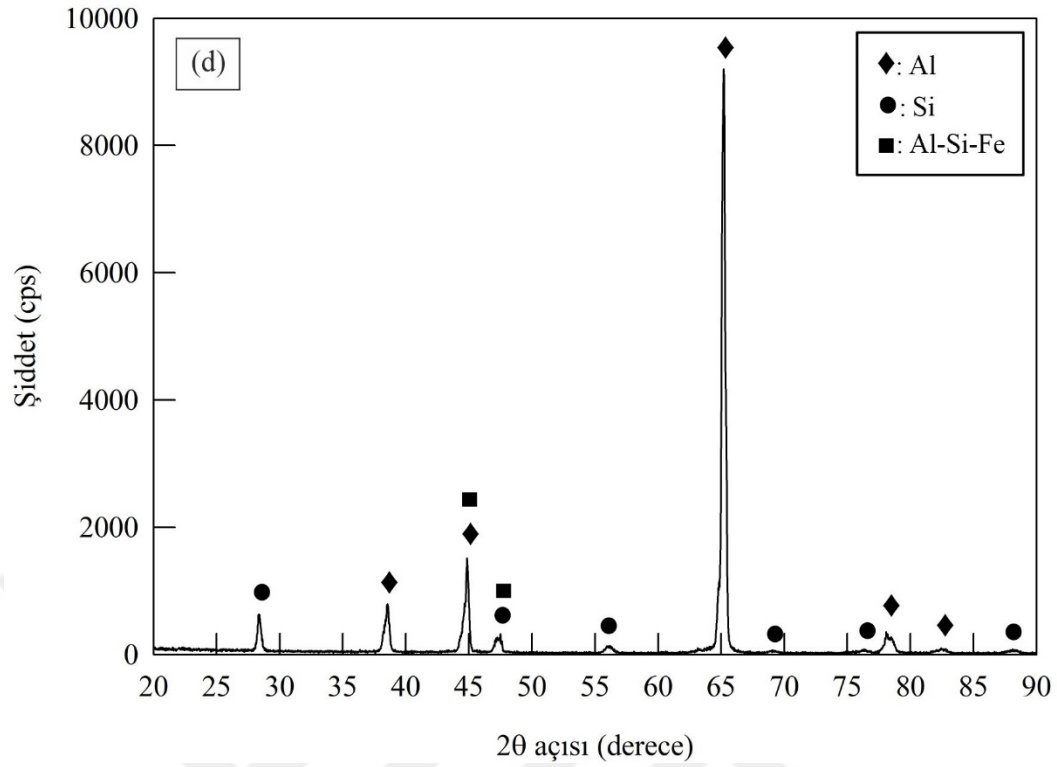
Bu çalışma kapsamında üretilen EN AC 44100 ve EN AC 44100-10Zn-(0-0,14)Sr alaşımların iç yapısını gösteren optik ve SEM mikroskobu görüntüleri ile XRD desenleri Şekil 13-21'de verilmiştir.

EN AC 44100 alaşımının içyapısının alüminyumca zengin α, ötektik Al-Si, birincil (primer) silisyum ve β (Al-Fe-Si) fazlarından oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 13). Birincil silisyum parçalarının farklı geometrilerde kaba ve keskin köşeli, ötektik silisyum parçacıklarının ise ince uzun ve iğne şekilli bir morfolojiye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 13).



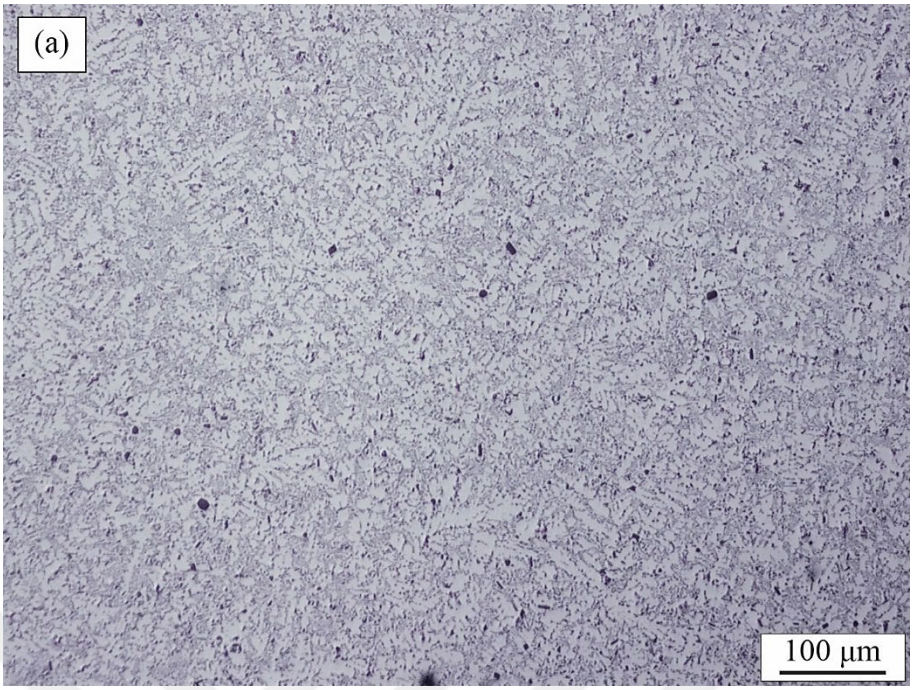

(b)
Al-Fe-Si
fazı
Al-Fe-Si
fazı
20 µm

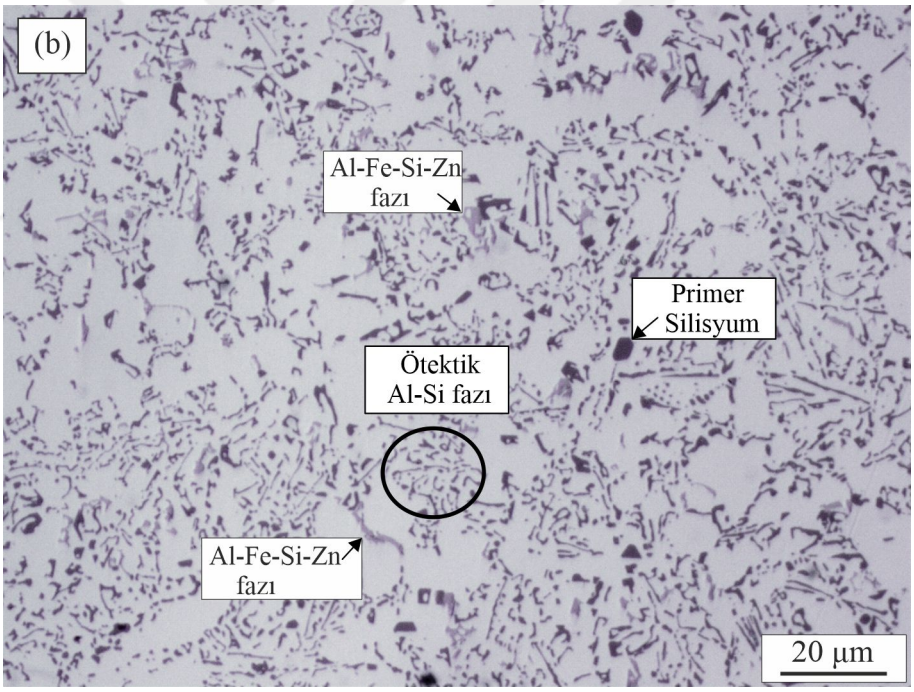

(c)
Al-Fe-Si
fazı
100 µm

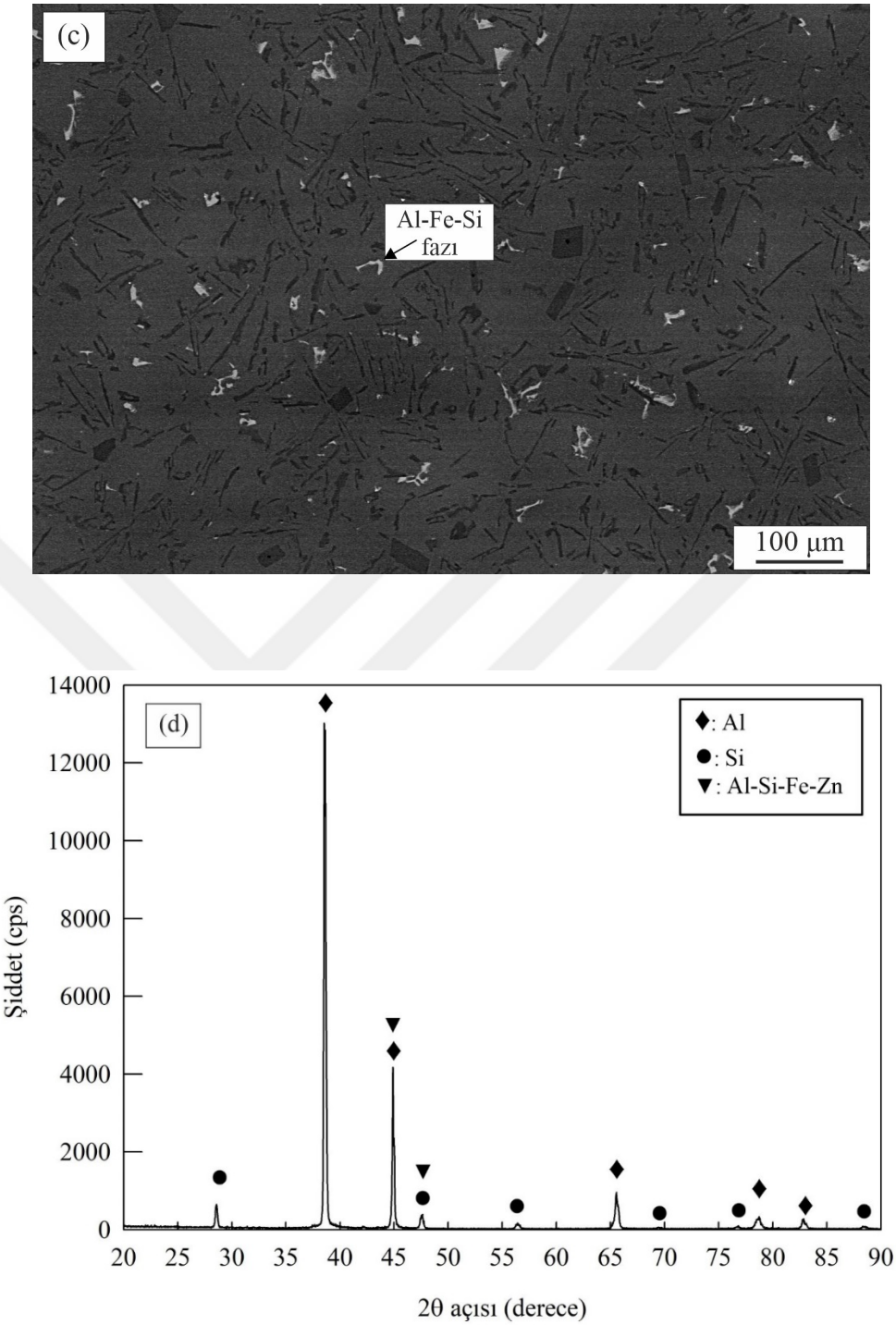


Şekil 13. EN AC 44100 alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

EN AC 44100-10Zn alaşımı α-Al dendritleri, ötektik Al-Si faz bölgeleri, Al-Fe-Si-Zn fazı ve primer silisyum parçalarından oluştuğu, α-Al ile ötektik Al-Si faz bölgelerinin ince taneli ve neredeyse homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir, Şekil 14. EN AC 44100 alaşımına %10 çinko eklenmesiyle β fazının Al-Fe-Si-Zn fazına dönüştüğü gözlenmiştir, Şekil 14. EN AC 44100-10Zn alaşımında α-Al fazında hacimsel bir azalmanın görüldüğü ve ötektik Al-Si fazının iğnemsi uzun şekilli yapısında incelmeler ve parçalanmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Primer silisyum parçacıklarının kaba ve keskin köşeli yapıdan nispeten daha yuvarlak forma geçiş yaptığı ve ayrıca parçacık boyutunun ciddi ölçüde küçüldüğü görülmüştür.


(a)
100 µm


(b)
Al-Fe-Si-Zn fazı
Primer Silisyum
Ötektik Al-Si fazı
Al-Fe-Si-Zn fazı
20 µm



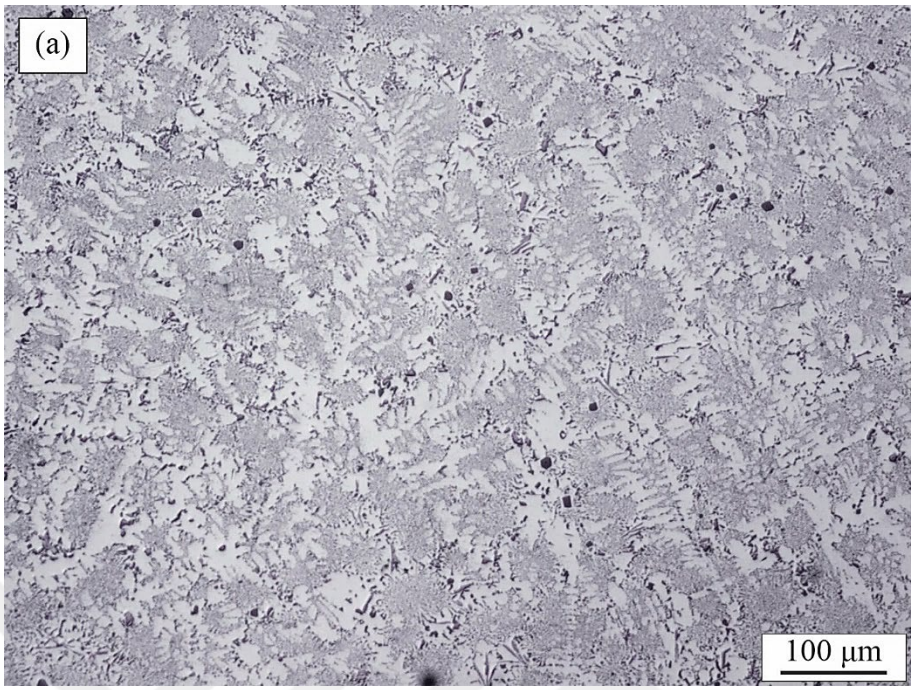
Şekil 13. 44100-10Zn alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

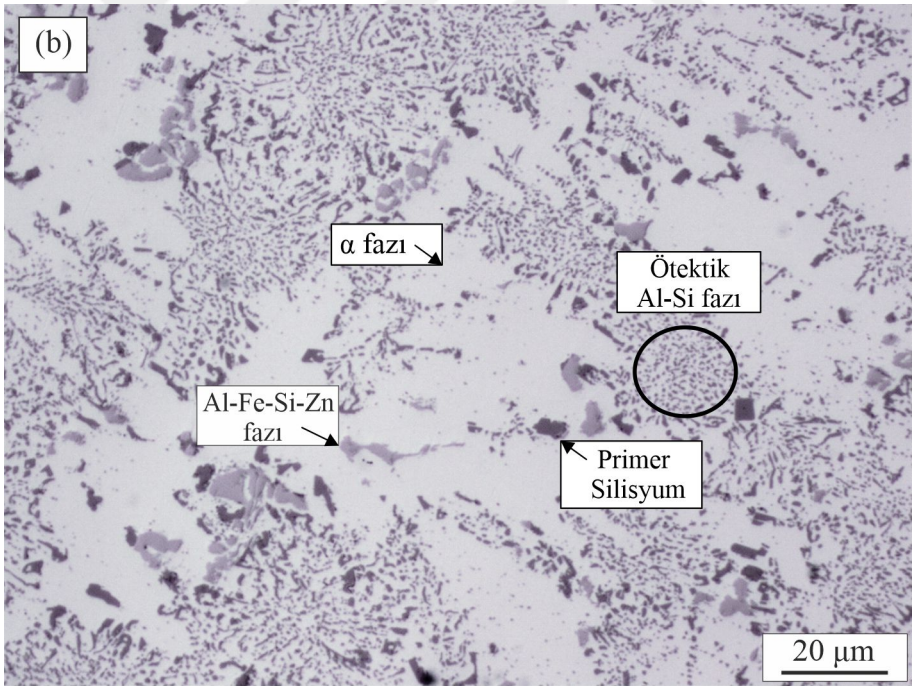
Tablo 5. EN AC 44100 ve EN AC 44100 alaşımının içyapısındaki fazların kimyasal bileşimi

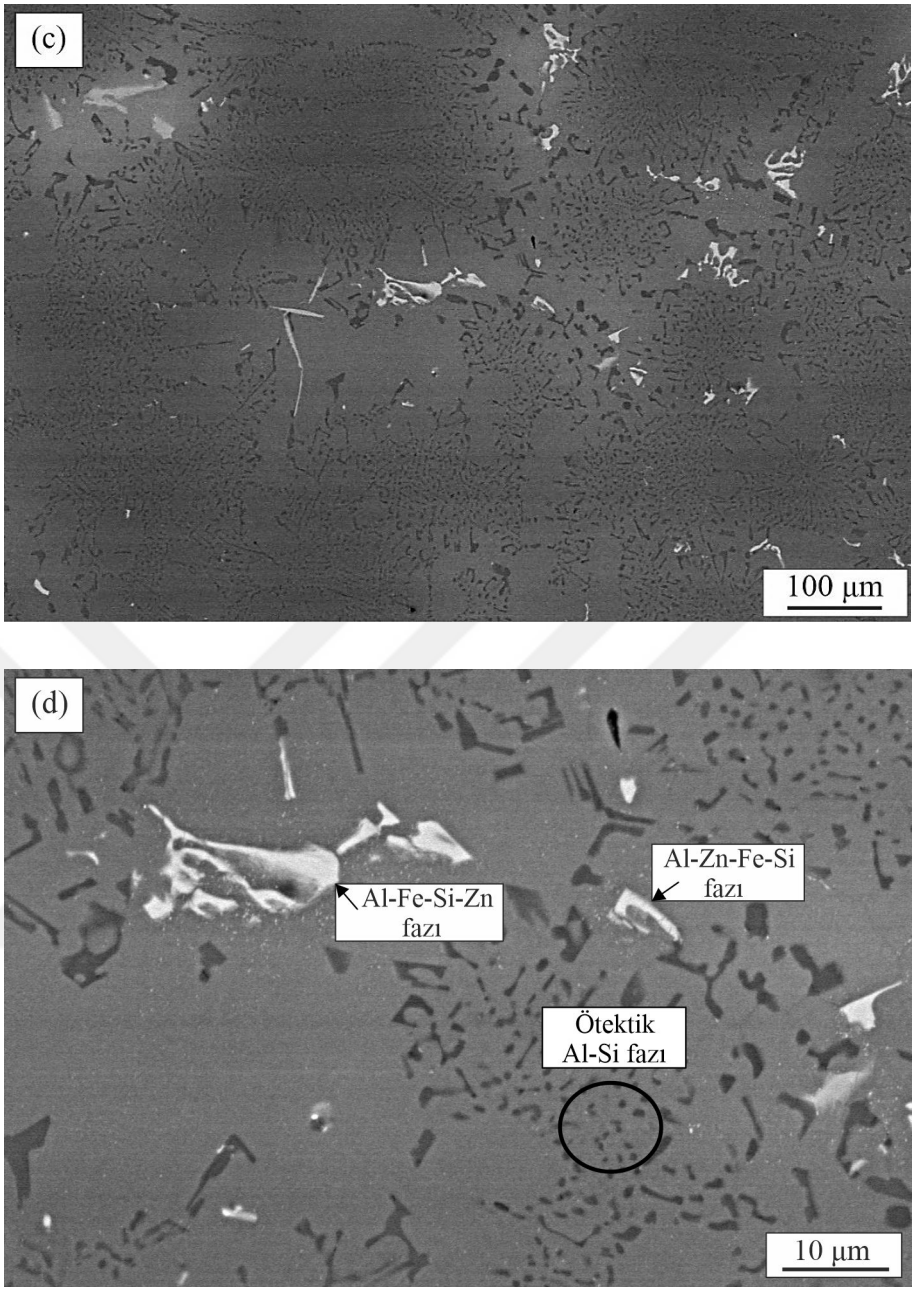
Alaşım	Faz	Element (Ağırlıkça %)			
		Al	Si	Zn	Fe
EN AC 44100	α-Al	98,3-98,6	1,6-1,7	0	0
	Ötektik Si	77,7-78,0	22,0-22,2	0-0,1	0-0,1
	Al-Fe-Si	66,0-84,3	4,7-8,6	-	9,2-24,0
EN AC 44100-10Zn	α-Al	86,4-89,0	0-0,9	10,1-12,8	0-1,0
	Ötektik Si	68,8-74,0	16,7-20,9	8,8-9,2	0,5-1,0
	Al-Fe-Si-Zn	55,7-77,5	2,9-12,6	7,0-11,7	10,1-26,5

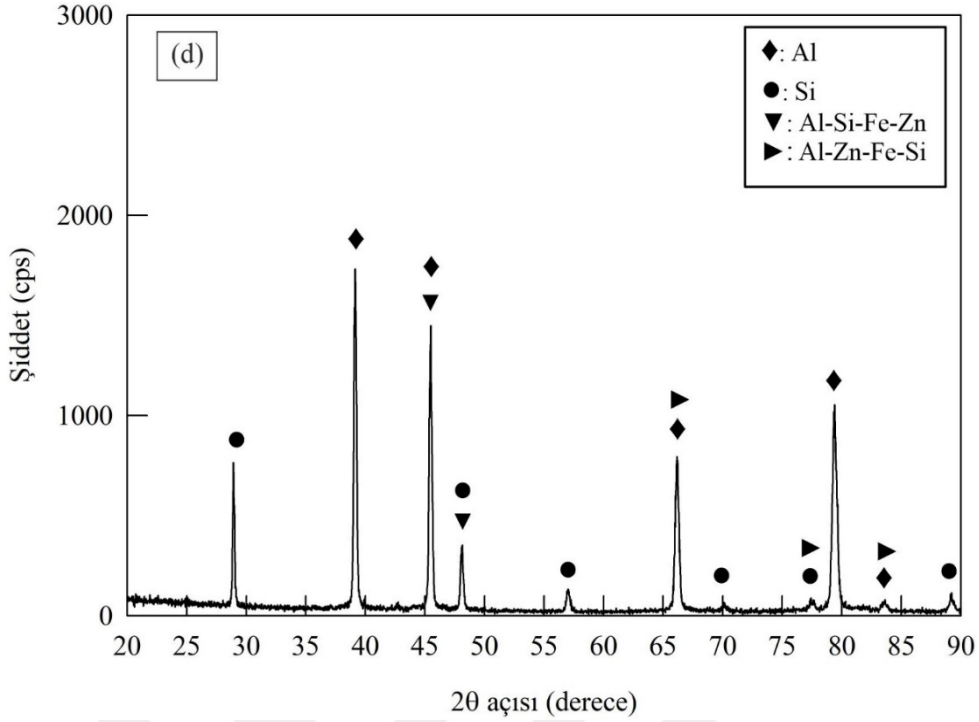
EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarının içyapılarına ait OM, SEM görüntüleri ve XRD desenleri Şekil 15-21'de verilmiştir. Bu alaşımların içyapılarındaki fazların kimyasal bileşimleri ise Tablo 6'da verilmiştir. EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarında EN AC 44100-10Zn alaşımındaki fazlardan farklı olarak Al-Zn-Fe-Si fazı gözlenmiştir, Şekil 15. Al-Zn-Fe-Si fazı artan stronsiyum oranı ile düz ince uzun bir form almıştır, Şekil 19. Stronsiyum oranı %0,1'i aştığında söz konusu fazın morfolojisi değişip, bu faza ait bazı parçacıklar dallanmaya başlamış, bazı parçacıklar ise parçalanarak taneli bir görünüme kavuşmuştur. EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarındaki ötektik silisyum fazının EN AC 44100-10Zn alaşımındaki iğnemsi yapısına göre daha ince ve küresel forma sahip olduğu gözlenmiştir, Şekil 15. Artan stronsiyum oranı ile α fazı belirgin bir dentritik formda büyümüştür. Ancak %0,1Sr oranından sonra α fazının dentritik yapısı bozulmaya başlamıştır. EN AC 44100-10Zn alaşımına yapılan stronsiyum ilavesi oranı %0,04 olduğunda yapıda Sr-Al-Si-Zn fazı oluşmuştur, Şekil 16. Artan stronsiyum oranı ile bu fazın parçacıkları nispeten büyümüştür. Ancak stronsiyum oranı %0,1'i aştığında söz konusu fazın boyutları küçülmüştür (Şekil 19-21). Diğer taraftan EN AC 44100-10Zn-0,08Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,1Sr alaşımlarında Al-Sr-Si fazının oluştuğu görülmüştür Şekil (19-20). Al-Zn-Fe-Si fazının ise EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımında en büyük boyutlara ulaştığı gözlendi, Şekil 21.

EN AC 44100-10Zn-(0,02Sr-0,1)Sr alaşımlarında α fazı ile ötektik Al-Si faz bölgelerinin kendi içlerinde büyüdüğü ve homojen dağılımlarının EN AC 44100-10Zn alaşımına göre azaldığı gözlenmiştir, Şekil 14-19. Alaşımdaki stronsiyum oranı %0,1 değerini aştığında ise α fazı ile ötektik Al-Si faz bölgelerinin tekrar homojen dağılım sergilemeye başladığı ve birincil silisyum parçacıklarının büyüdüğü görülmüştür, Şekil 20-21.

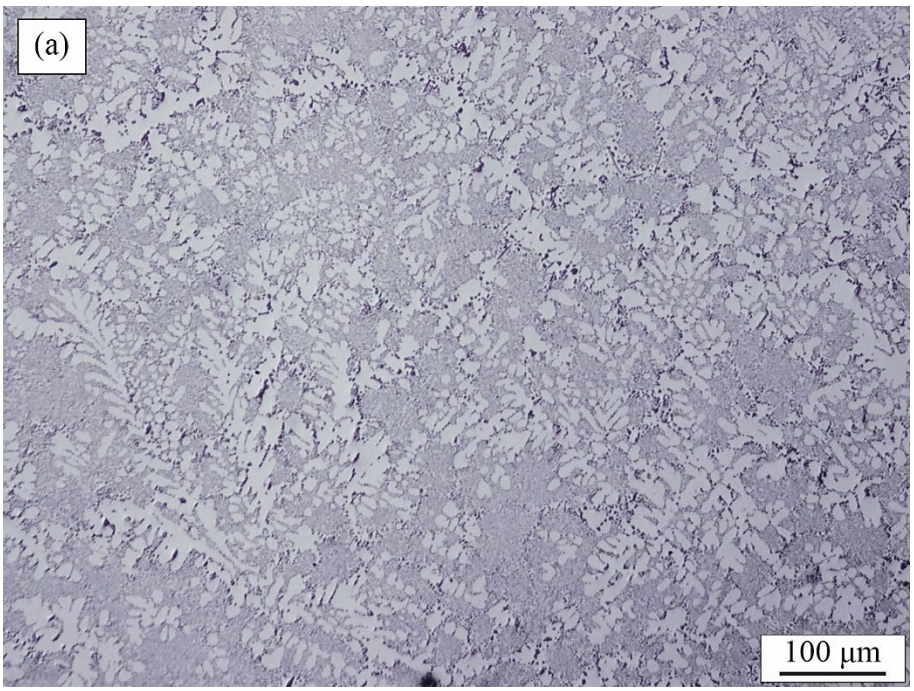

(a)
100 µm

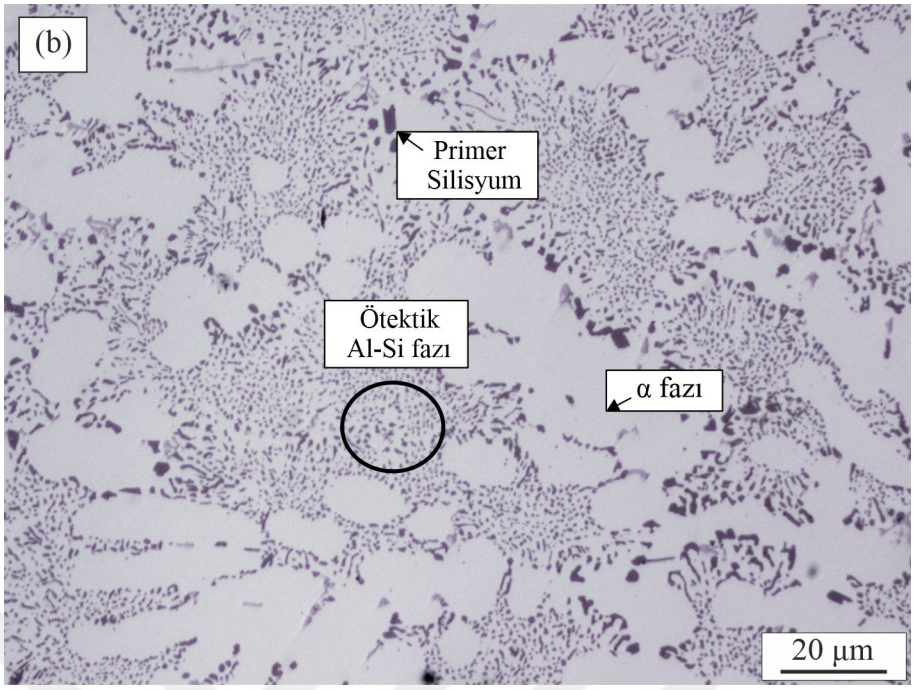

(b)
α fazı
Ötektik
Al-Si fazı
Al-Fe-Si-Zn
fazı
Primer
Silisyum
20 µm

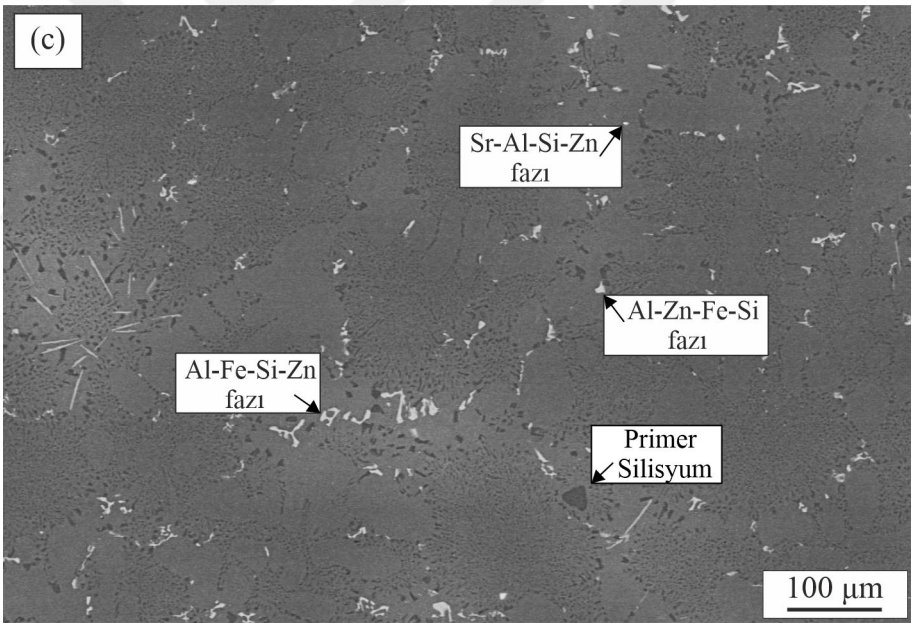

(c)
100 µm
(d)
Al-Fe-Si-Zn fazı
Al-Zn-Fe-Si fazı
Ötektik Al-Si fazı
10 µm

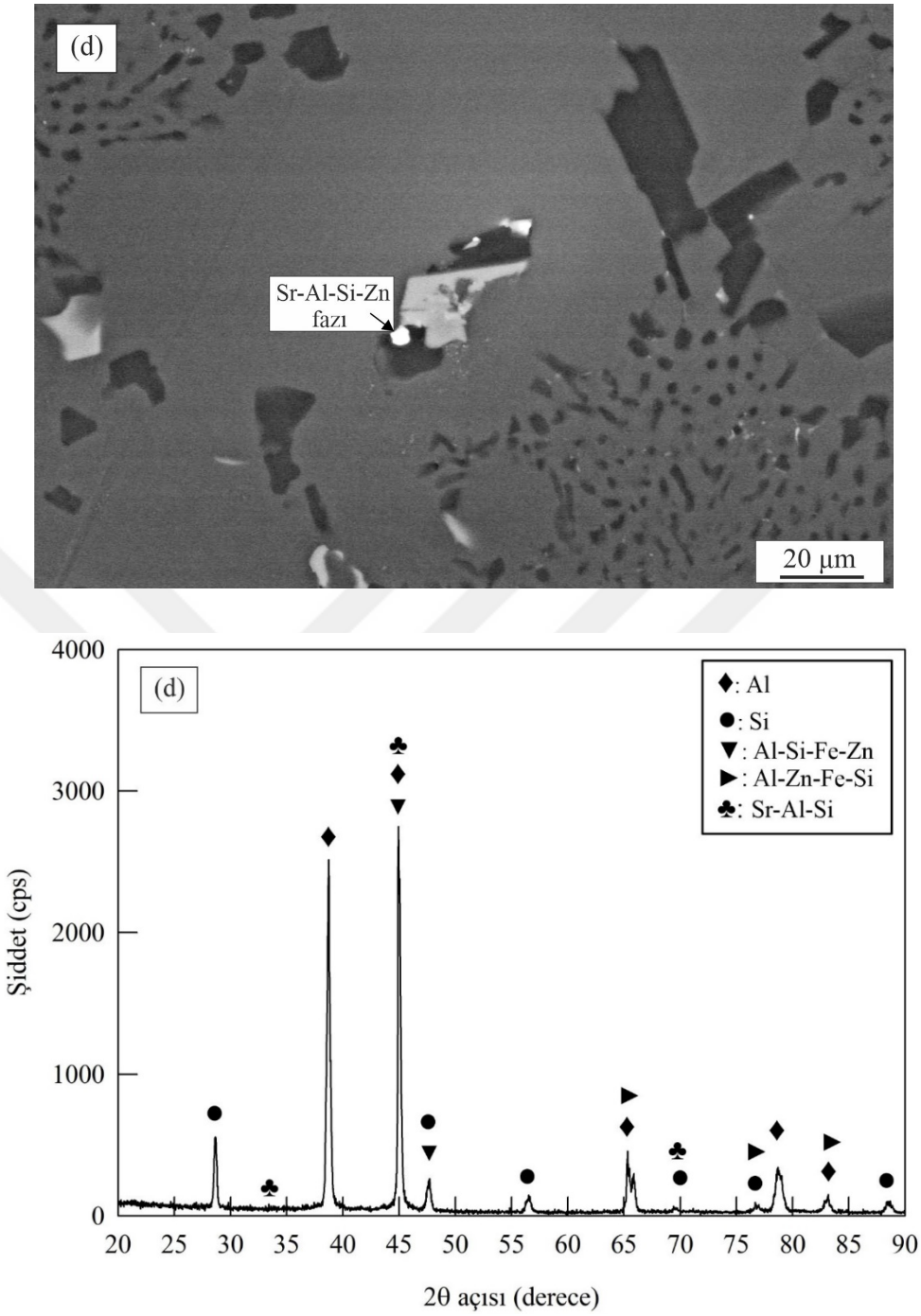


Şekil 14. 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) yüksek büyütmeli SEM e) XRD deseni

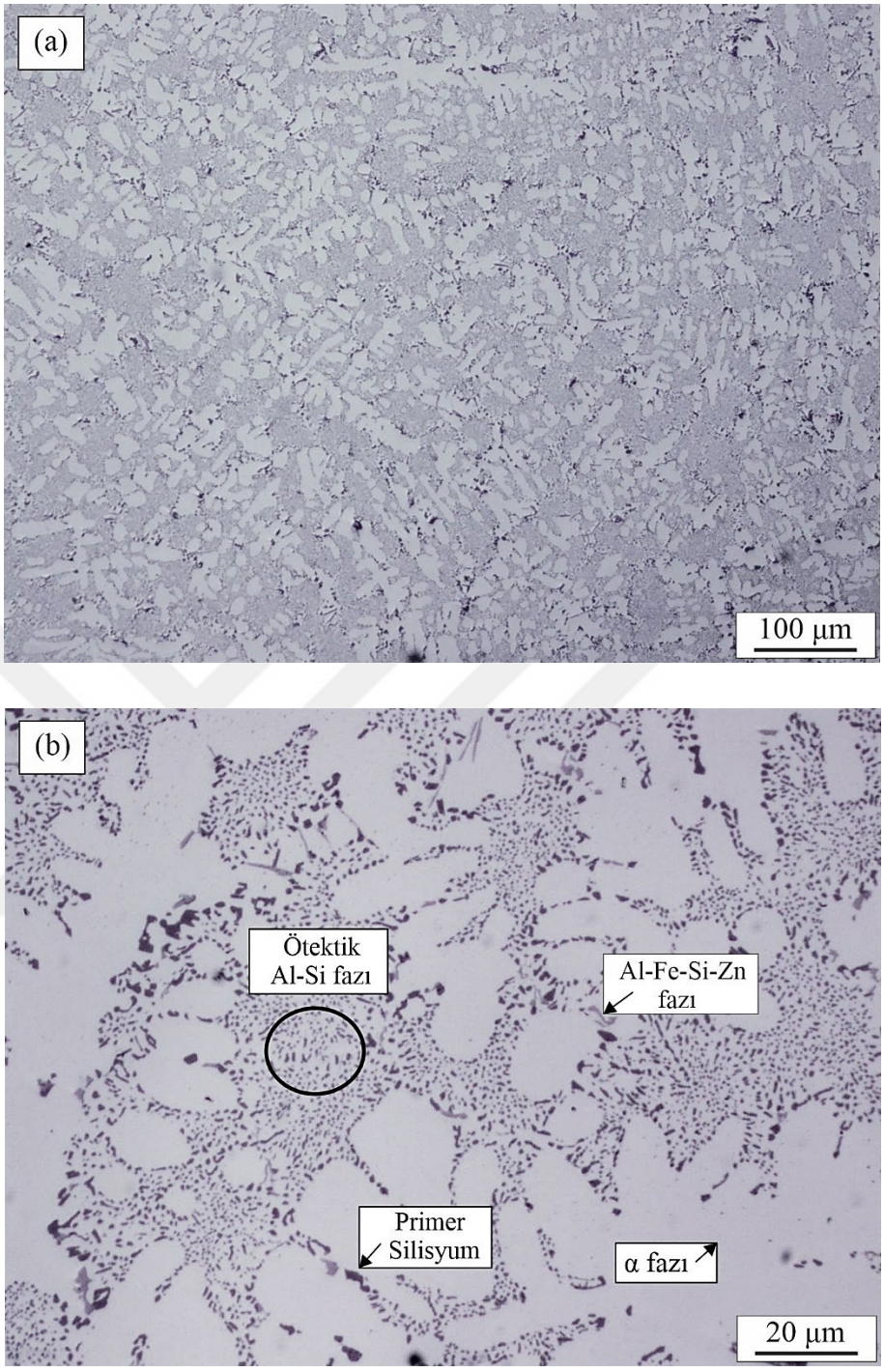


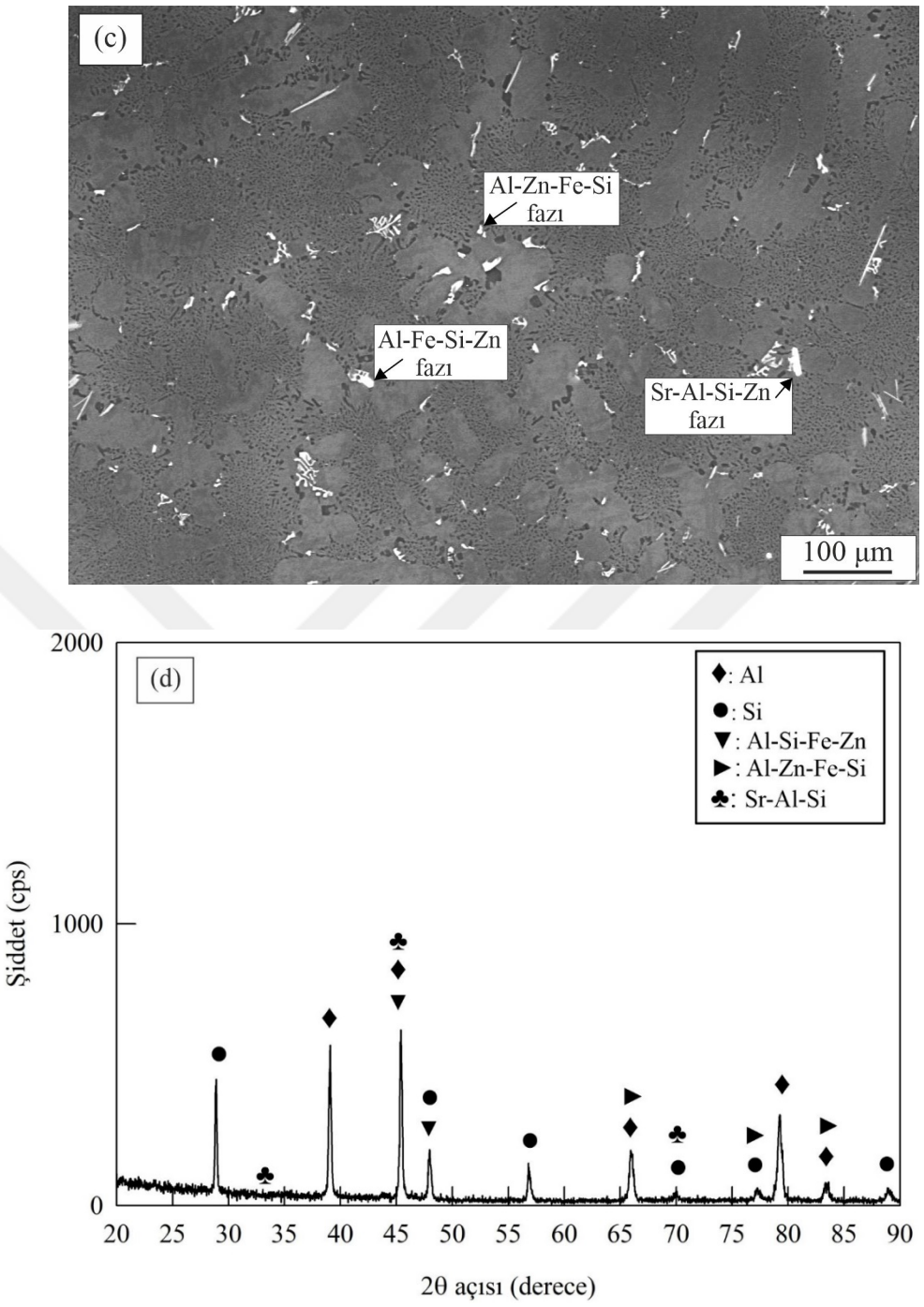

(b)
Primer Silisyum
Ötektik Al-Si fazı
α fazı
20 µm


(c)
Sr-Al-Si-Zn fazı
Al-Zn-Fe-Si fazı
Al-Fe-Si-Zn fazı
Primer Silisyum
100 µm

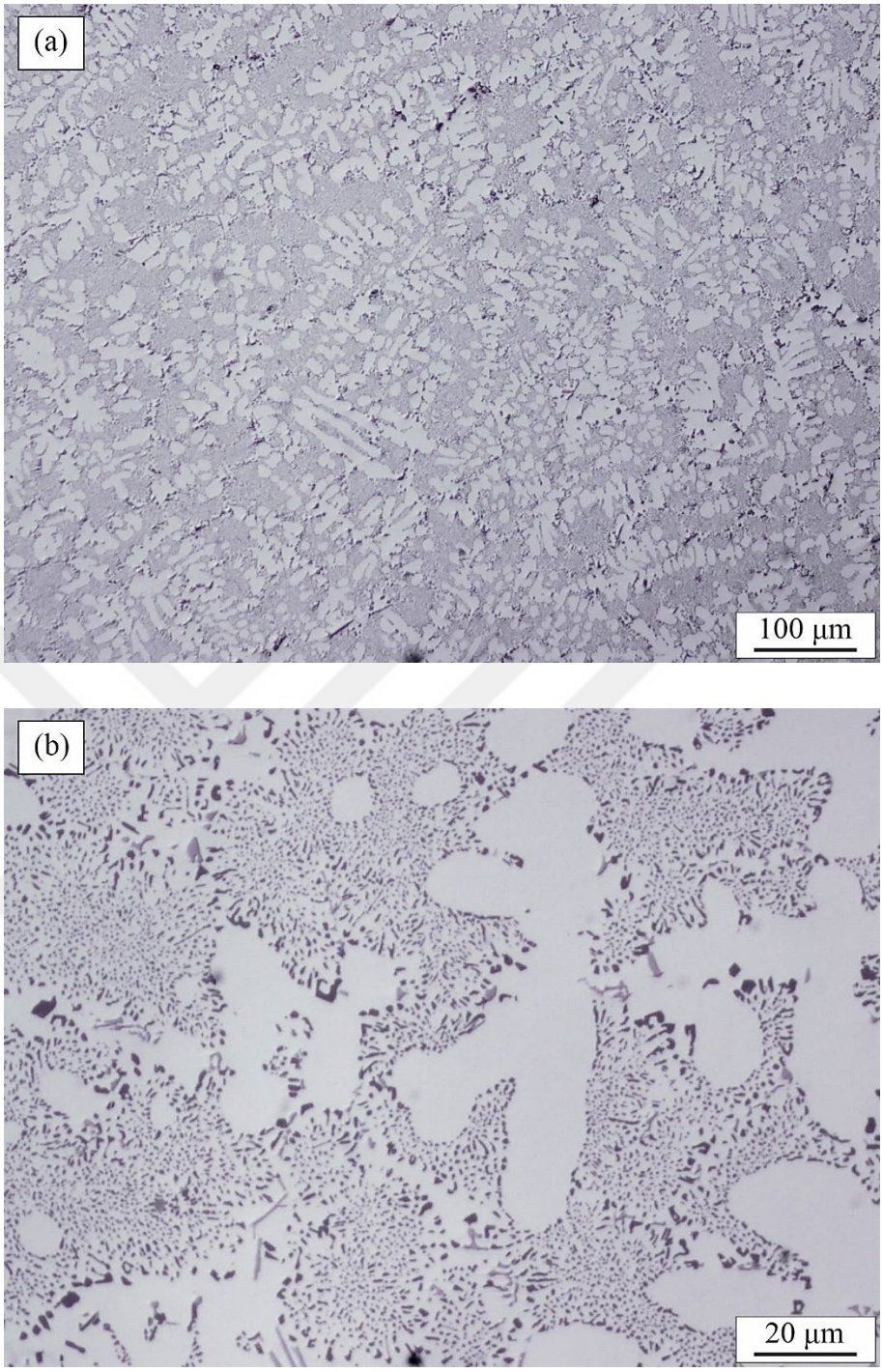


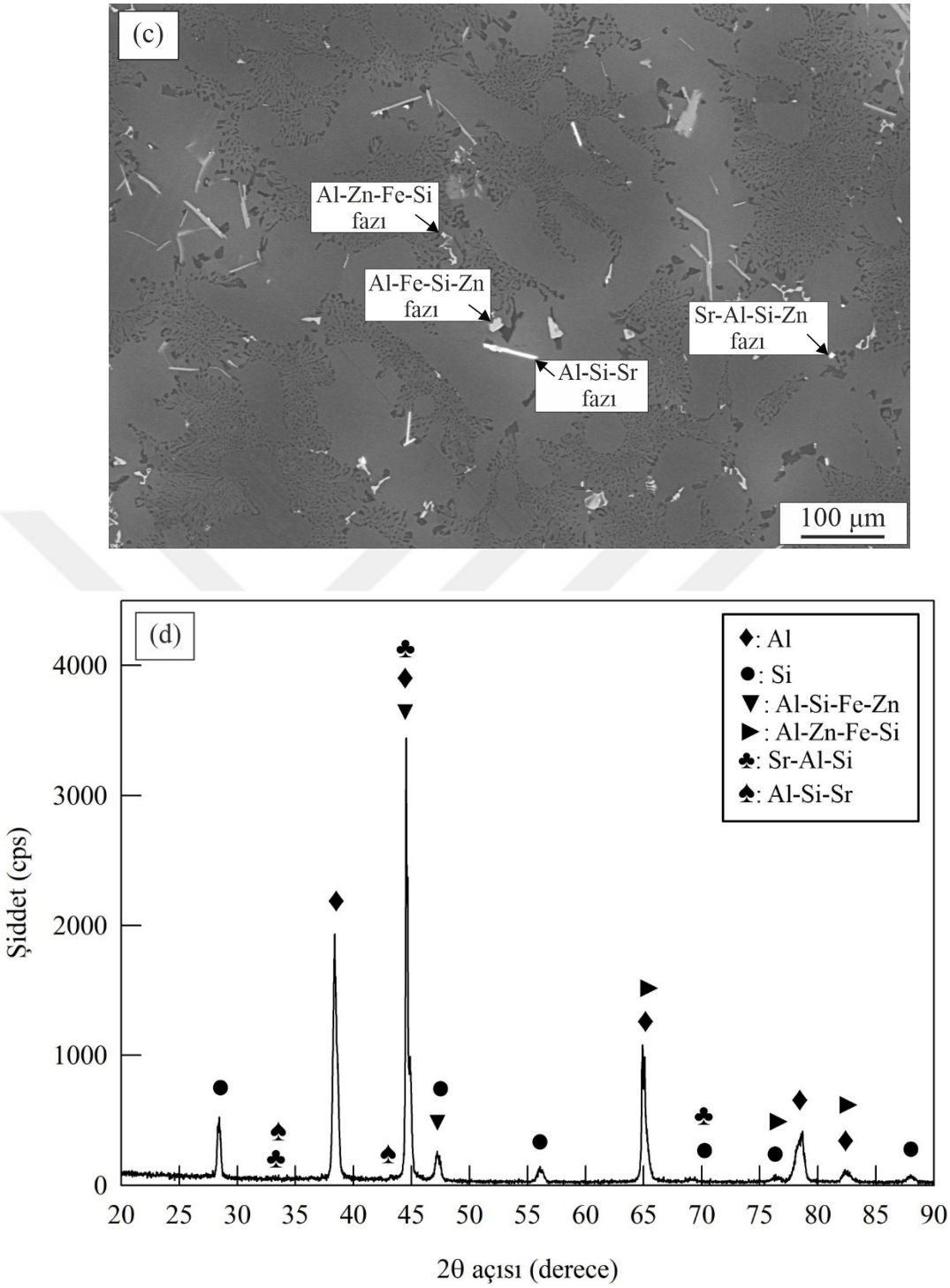
Şekil 15. 44100-10Zn-0.04Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) düşük büyütmeli SEM görüntüsü d) yüksek büyütmeli SEM e) XRD deseni


(a)
100 µm
(b)
Ötektik
Al-Si fazı
Al-Fe-Si-Zn
fazı
Primer
Silisyum
α fazı
20 µm

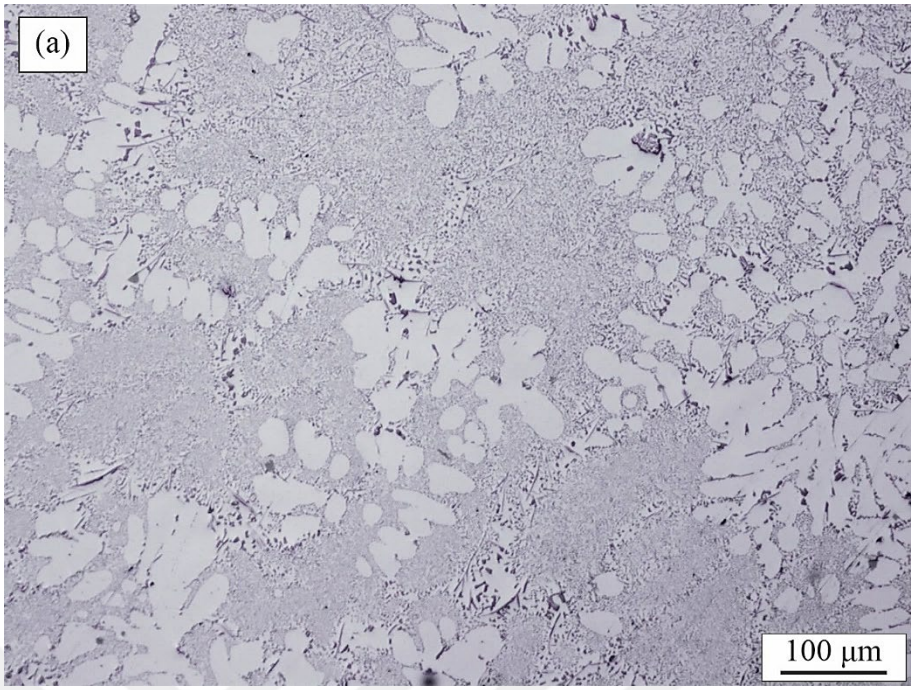


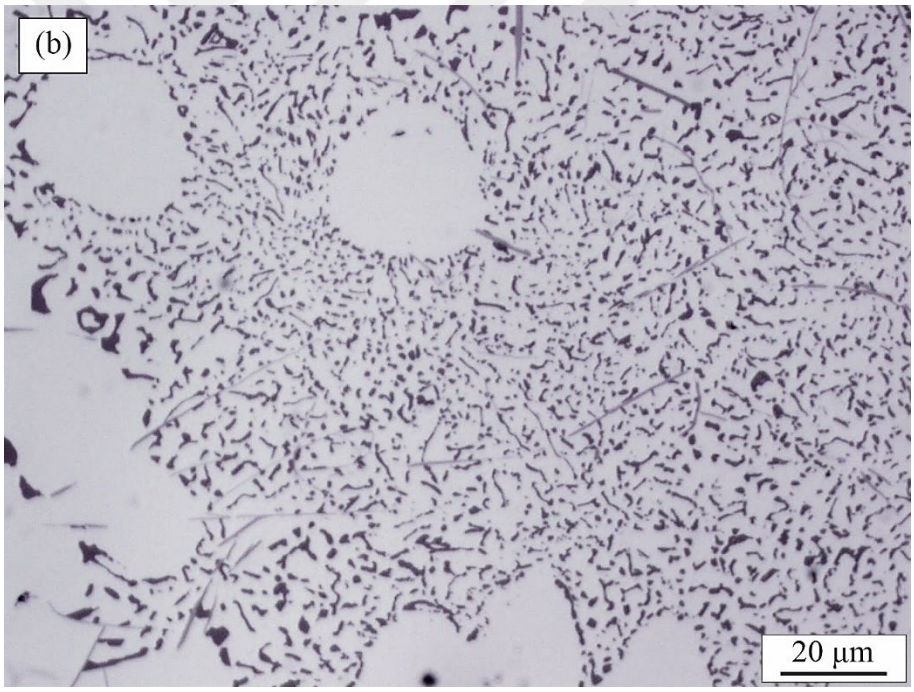
Şekil 16. 44100-10Zn-0.06Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

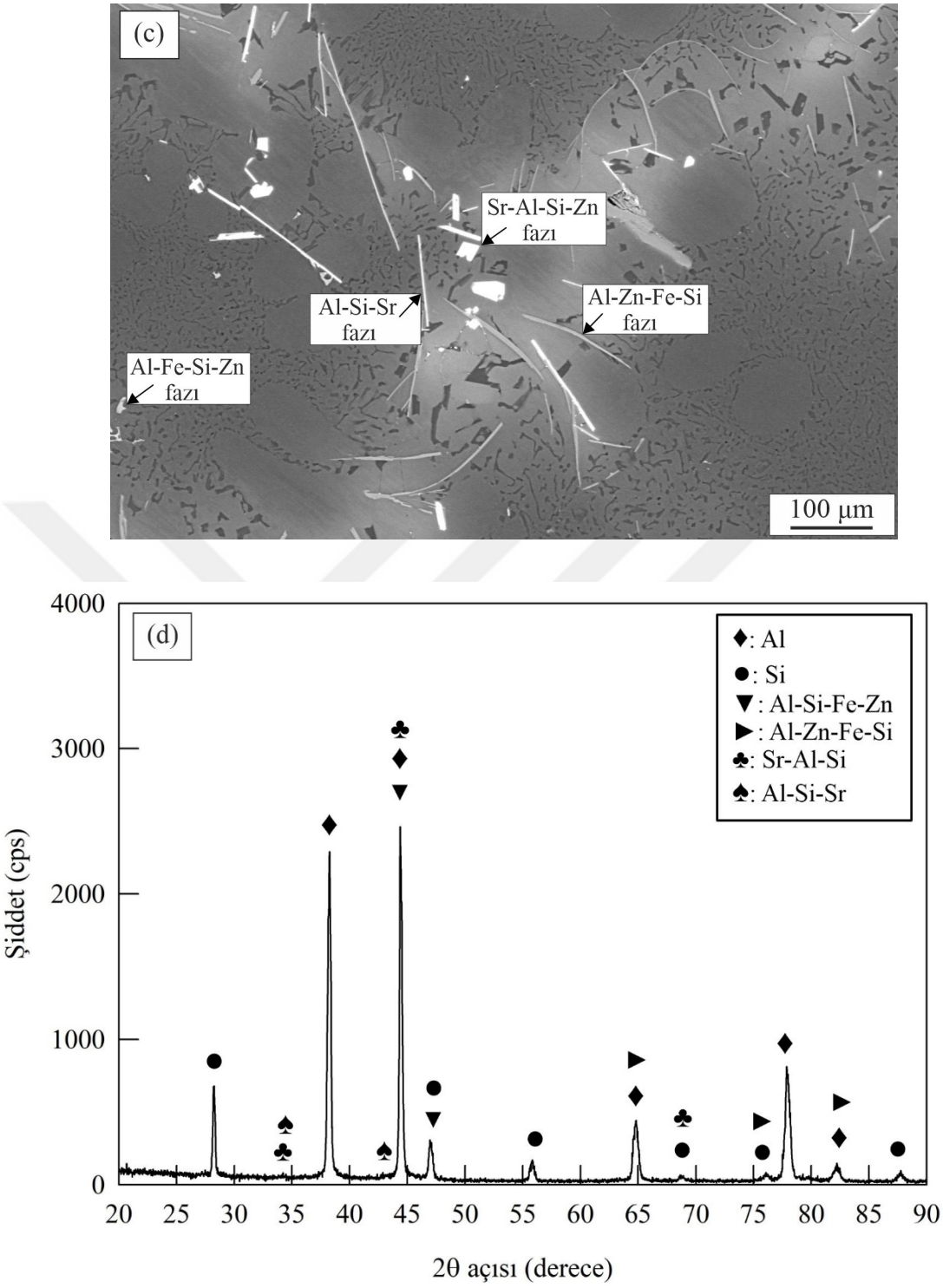

(a)
100 µm
(b)
20 µm



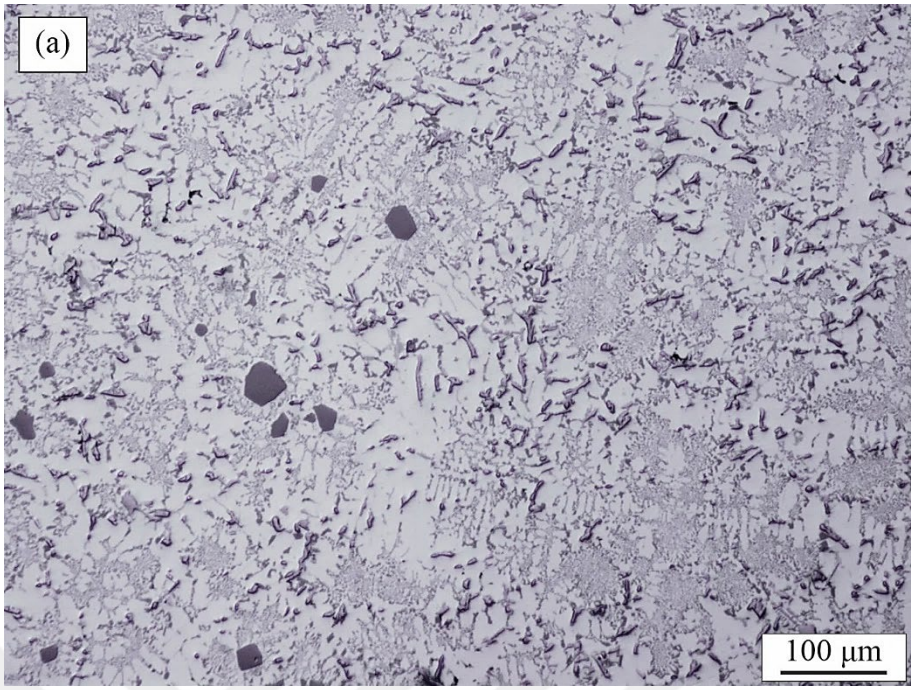
Şekil 17. 44100-10Zn-0.08Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

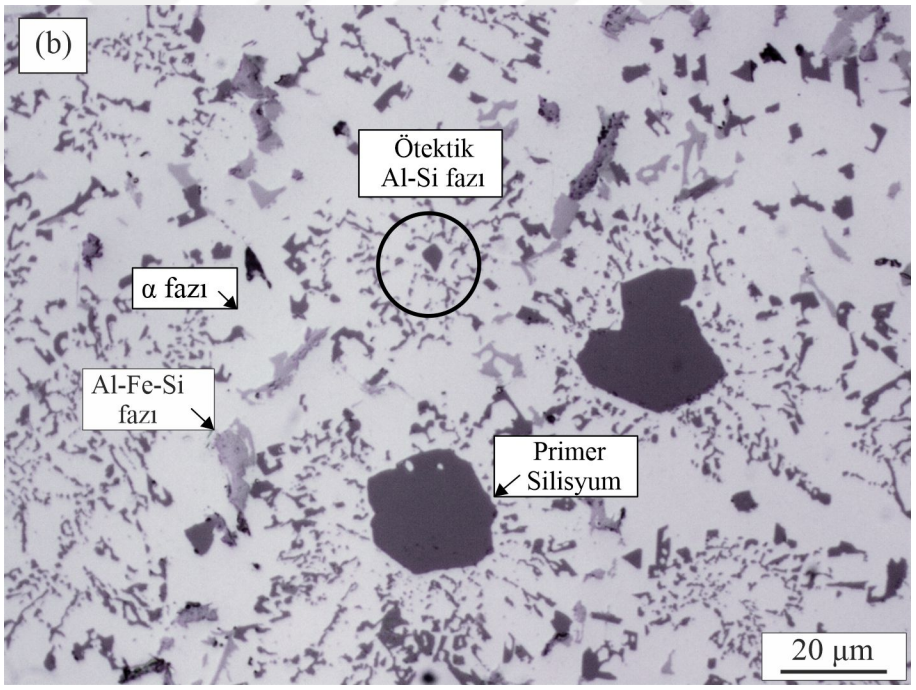

(a)
100 μm

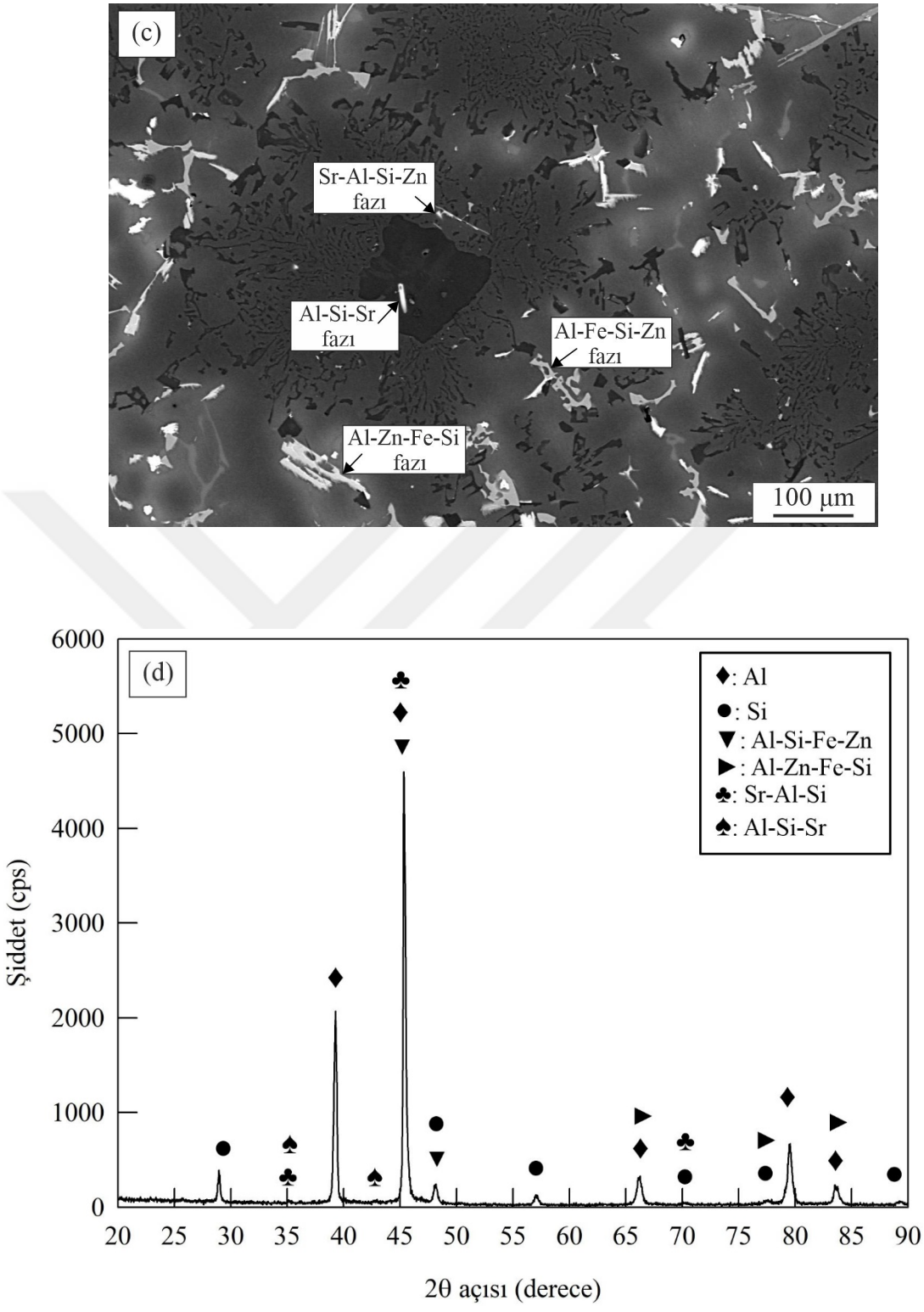

(b)
20 μm



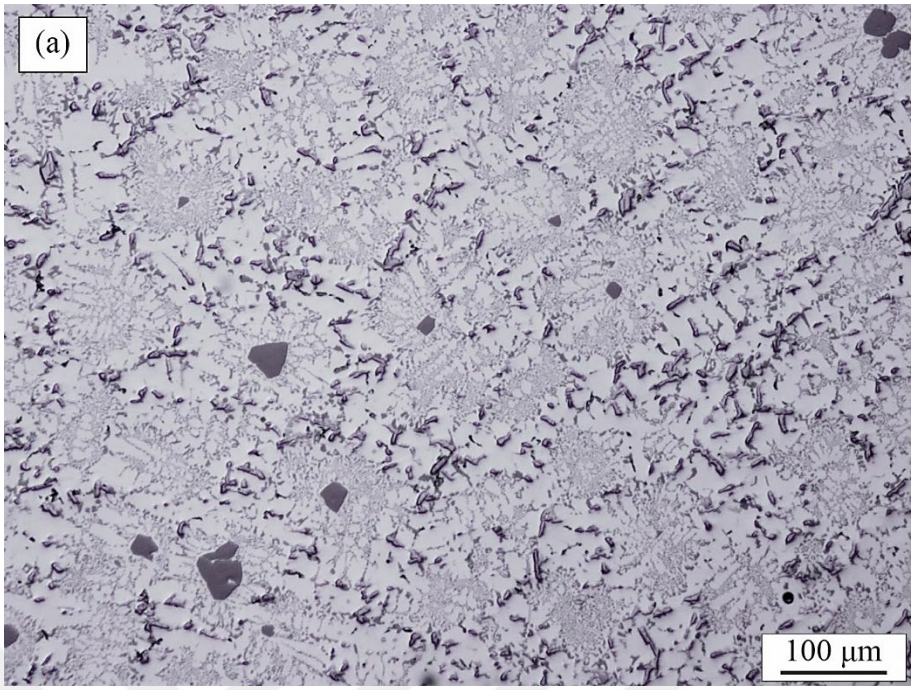
Şekil 18. 44100-10Zn-0.1Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

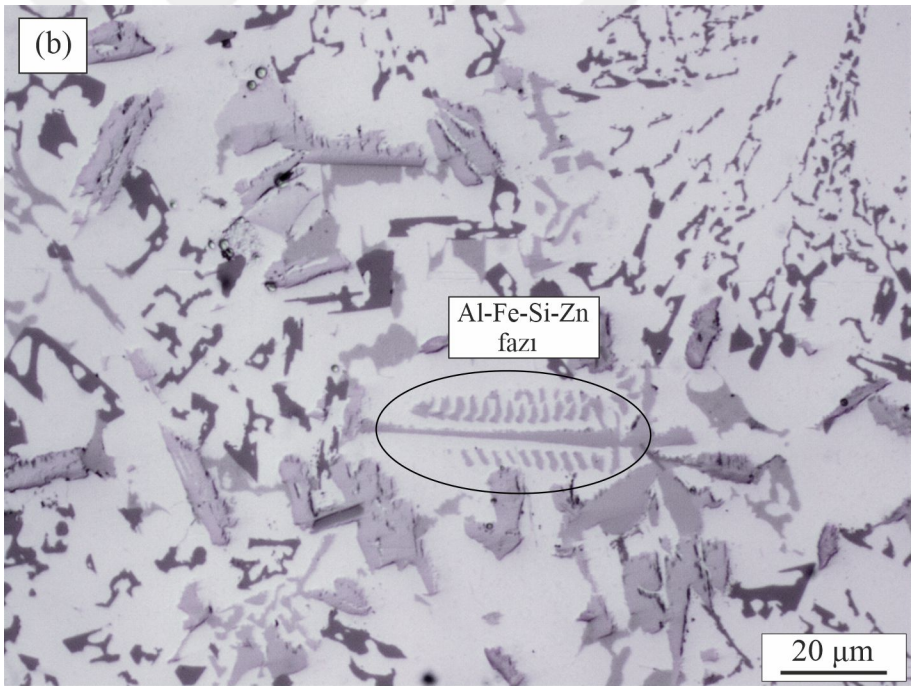

(a)
100 µm

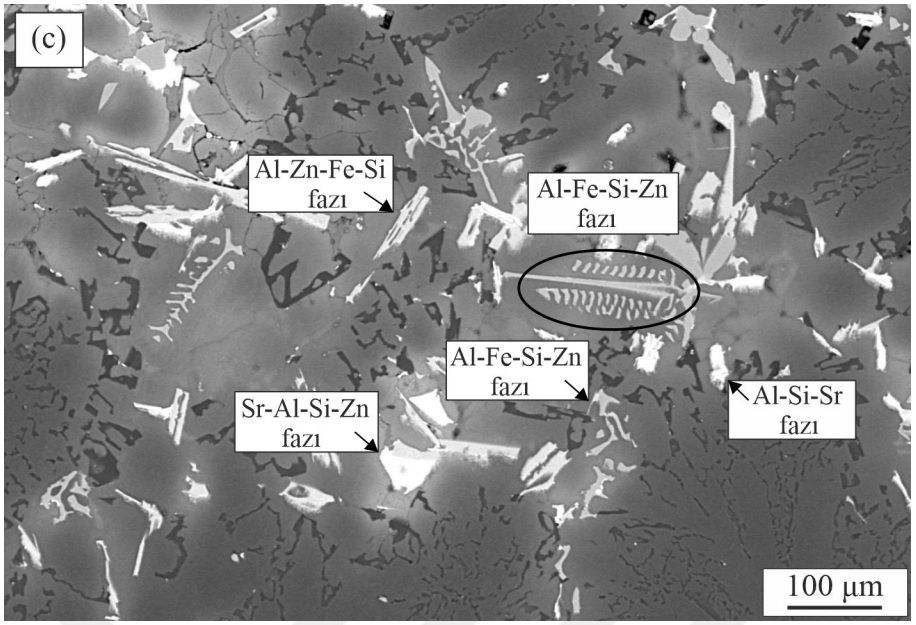

(b)
Ötektik
Al-Si fazı
α fazı
Al-Fe-Si
fazı
Primer
Silisyum
20 µm

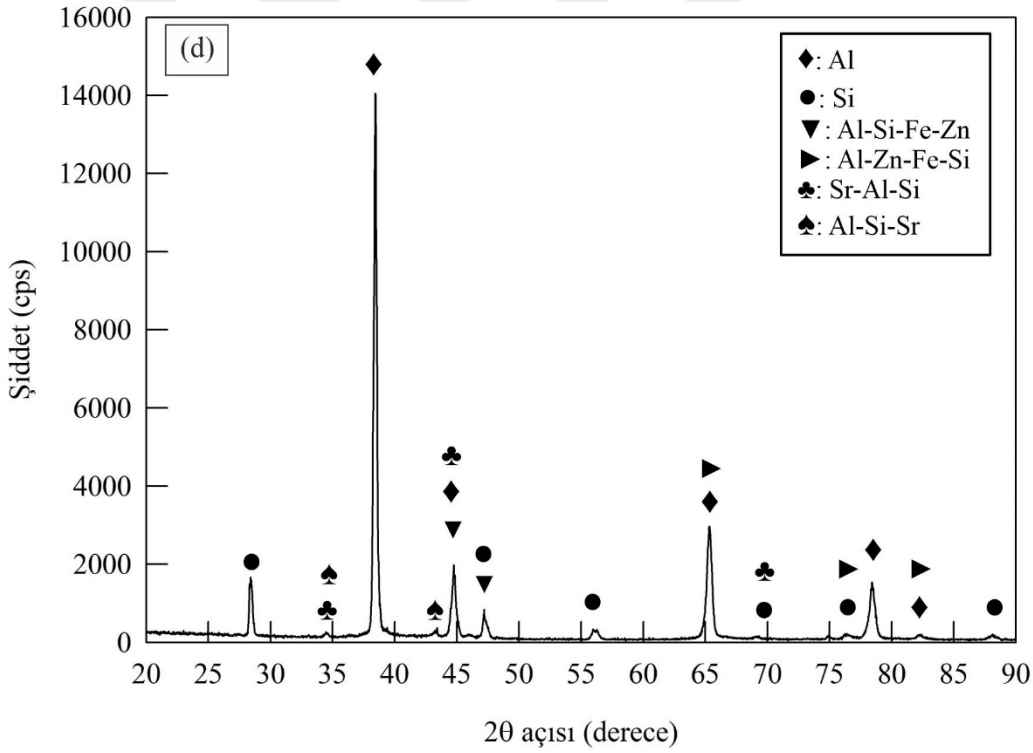


Şekil 19. 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni


(a)
100 µm


(b)
Al-Fe-Si-Zn
fazı
20 µm





Şekil 20. 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının içyapısının a) düşük büyütmeli OM görüntüsü b) yüksek büyütmeli OM görüntüsü c) SEM görüntüsü d) XRD deseni

Tablo 6. EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarının içyapılarındaki fazların kimyasal bileşimleri

Alaşım	Faz	Element				
		Al	Si	Zn	Sr	Fe
EN AC 44100-10Zn-0,02Sr	α-Al	82,7-87,5	0,2-2,9	10,6-13,1	0-0,9	0-3,8
	Ötektik Si	72,2-74,4	14,3-17,4	9,6-12,1	0	0-0,9
	Al-Zn-Fe-Si	77,7-89,1	0,5-5,3	8,6-16,4	0-0,4	0-2,4
	Al-Fe-Si-Zn	59,5-74,7	3,9-17,2	5,1-10,9	0,4-0,7	10,7-20,2
EN AC 44100-10Zn-0,04Sr	α-Al	84,9-89,7	0-0,4	10,3-14,2	0-1,0	0-0,4
	Ötektik Si	71,8-75,3	13,1-17,8	10,4-13,0	0-0,7	0-0,3
	Al-Zn-Fe-Si	82,1-85,3	0,3-1,5	11-13,8	0-0,9	0-4,6
	Al-Fe-Si-Zn	60,0-73,6	5,4-10,2	8,3-12,7	0-0,1	9,1-21,5
	Sr-Al-Si-Zn	48,3-51,3	20,0-30,1	12,5-17,0	9,1-11,7	0
EN AC 44100-10Zn-0,06Sr	α-Al	87,6-90,0	0,3-0,7	9,6-11,8	0-0,3	0-0,1
	Ötektik Si	73,0-74,6	15,2-16,2	8,6-11,8	0-0,5	0-0,3
	Al-Zn-Fe-Si	74,4-80,7	5,0-8,4	9,8-11,3	0	0-8,4
	Al-Fe-Si-Zn	60,5-76,7	4,2-10,4	7,3-11,5	0-0,8	8,9-21,8
	Sr-Al-Si-Zn	30,0-55,7	15,5-28,2	1,1-7,8	22,9-40,0	0-2,7
EN AC 44100-10Zn-0,08Sr	α-Al	85,9-88,7	0,7-1,2	10,1-13,2	0-0,4	0-0,1
	Ötektik Si	73,4-75,7	12,8-17,0	8,3-12,3	0-0,2	0-0,7
	Al-Zn-Fe-Si	79,9-87,6	0,4-2,0	9,3-16,4	0-1,3	0-4,4
	Al-Fe-Si-Zn	56,3-65,2	5,9-14,4	8,5-12,3	0-0,8	16,7-22,8
	Al-Si-Sr	53,8-60,4	13,8-25,8	7,2-9,5	10,3-20,9	0-1,0
	Sr-Al-Si-Zn	28,6-30,0	28,1-28,4	0,2-0,3	41,5-42,4	0,1-0,3
EN AC 44100-10Zn-0,10Sr	α-Al	85,9-88,8	1,2-1,5	9,2-12,4	0-0,4	0-0,3
	Ötektik Si	67,2-75,5	13,7-22,6	9,3-11,2	0-0,4	0-0,3
	Al-Zn-Fe-Si	79,0-84,3	0,9-4,8	12,2-14,2	0-0,6	0,1-3,7
	Al-Fe-Si-Zn	53,8-72,3	9,0-21,7	3,5-11,7	0-0,4	8,4-21,1
	Al-Si-Sr	52,1-66,0	12,1-19,3	6,7-11,3	12,6-21,8	0-0,1
	Sr-Al-Si-Zn	28,3-31,8	27,2-29,0	1,2-1,8	39,3-41,6	0

Tablo 6 (Devam). EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarının içyapılarındaki fazların kimyasal bileşimleri

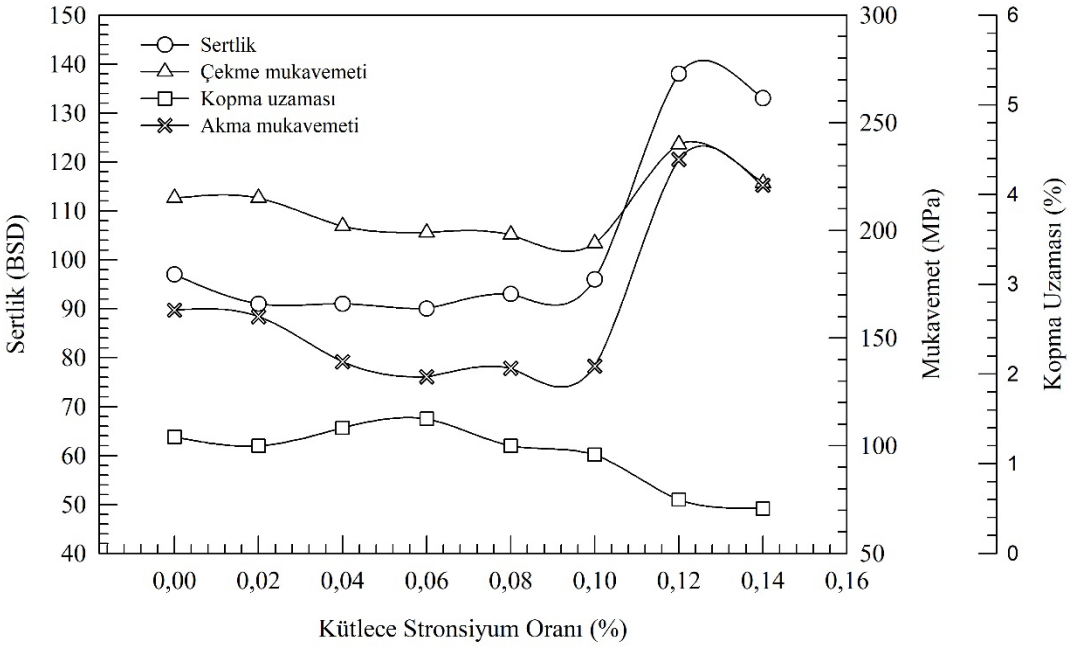
Alaşım	Faz	Element				
		Al	Si	Zn	Sr	Fe
EN AC 44100-10Zn-0,12Sr	α-Al	84,3-89,7	0,6-0,9	9,1-14,4	0,3-0,6	0,1-0,3
	Ötektik Si	68,2-78,7	14,5-24,2	6,3-7,7	0-0,6	0-0,2
	Al-Zn-Fe-Si	80,5-92,8	0,7-6,1	3,3-12,8	0-1,2	0-6,6
	Al-Fe-Si-Zn	64,4-79,9	7,3-12,2	2,2-4,5	0-0,4	8,9-20,2
	Al-Si-Sr	76,7-78,4	9,5-12,1	4,5-9,0	3,9-5,5	0,9-4,0
	Sr-Al-Si-Zn	39,2-43,8	26,4-23,3	1,1-3	29,5-39,2	0-0,4
EN AC 44100-10Zn-0,14Sr	α-Al	80,7-90,2	0,6-1,4	7,8-18,0	0-0,5	0-1,0
	Ötektik Si	65,3-73,0	19,7-28,7	5,7-6,9	0-0,4	0-0,1
	Al-Zn-Fe-Si	78,6-85,4	0,4-7,8	6,3-18,6	0-0,5	0-7,4
	Al-Fe-Si-Zn	60,1-78,6	7,5-21,3	1,8-10,8	0-0,6	7,4-19,5
	Al-Si-Sr	59,2-73,9	9,5-21,7	6,1-8,8	4,0-10,3	2,7-3,8
	Sr-Al-Si-Zn	25,3-29,8	27,8-38,8	0-1,0	38,8-40,8	0,4-0,6

3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Bu tez kapsamında üretilen tüm alaşımların yoğunluk, sertlik, akma ve çekme dayanımları ile kopma uzamaları değerleri Tablo 7'de verilmiştir. EN AC 44100 alaşımına %10Zn oranında çinko ilave edilmesiyle söz konusu alaşımın yoğunluk, sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin arttığı, kopma uzaması değerinin ise azaldığı gözlenmiştir, Tablo 7. EN AC 44100+%10Zn alaşımına yapılan stronsiyum ilavesi yoğunlukta belirgin bir değişime neden olmamıştır, Tablo 7. Stronsiyum katkılarının EN AC 44100+%10Zn alaşımının sertlik, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerinde yol açtığı değişimleri gösteren eğriler Şekil 22'deki grafikte verilmiştir. Bu eğrilerden de anlaşılacağı üzere %0,02-0,08 aralığındaki stronsiyum katkıları alaşımın sertlik, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerini azaltmakta, %0,12 ve 0,14 oranındaki katkılar ise EN AC 44100+%10Zn alaşımının söz konusu değerlerini önemli oranda artırmaktadır, Şekil 22. EN AC 44100+%10Zn alaşımının kopma uzaması değeri %0,12 stronsiyum katkı oranına kadar belirgin bir seyir göstermemiş, ancak %0,12 ve 0,14 katkı oranlarında önemli bir azalma sergilemiştir, Tablo 7 ve Şekil 22.

Tablo 7. İncelenen alaşımlarda yoğunluk, sertlik, akma, çekme ve kopma uzaması değerleri

Alaşım	Yoğunluk (gr/mm^3)	Sertlik (BSD)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
44100	2,57	59±7	76±3	139±2	3,0±0,6
44100-10Zn	2,74	97±5	163±3	215±5	1,3±0,04
44100-10Zn-0,02Sr	2,74	91±4	160±3	215±5	1,2±0,04
44100-10Zn-0,04Sr	2,73	91±6	139±3	202±3	1,4±0,03
44100-10Zn-0,06Sr	2,72	90±4	132±6	199±7	1,5±0,02
44100-10Zn-0,08Sr	2,72	93±6	136±2	198±4	1,2±0,02
44100-10Zn-0,1Sr	2,71	96±5	137±5	194±7	1,1±0,03
44100-10Zn-0,12Sr	2,71	138±8	233±5	240±10	0,6±0,04
44100-10Zn-0,14Sr	2,70	133±5	221±3	222±4	0,5±0,04

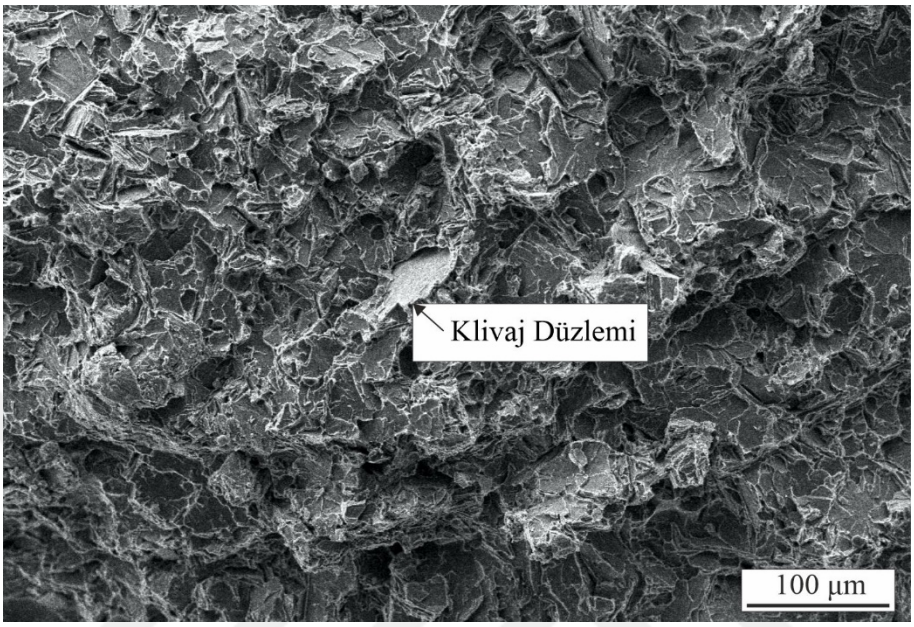


Şekil 21. 44100-10Zn-(0-0,14) Sr alaşımlarının sertlik, akma, çekme ve kopma uzamasının değerlerinin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

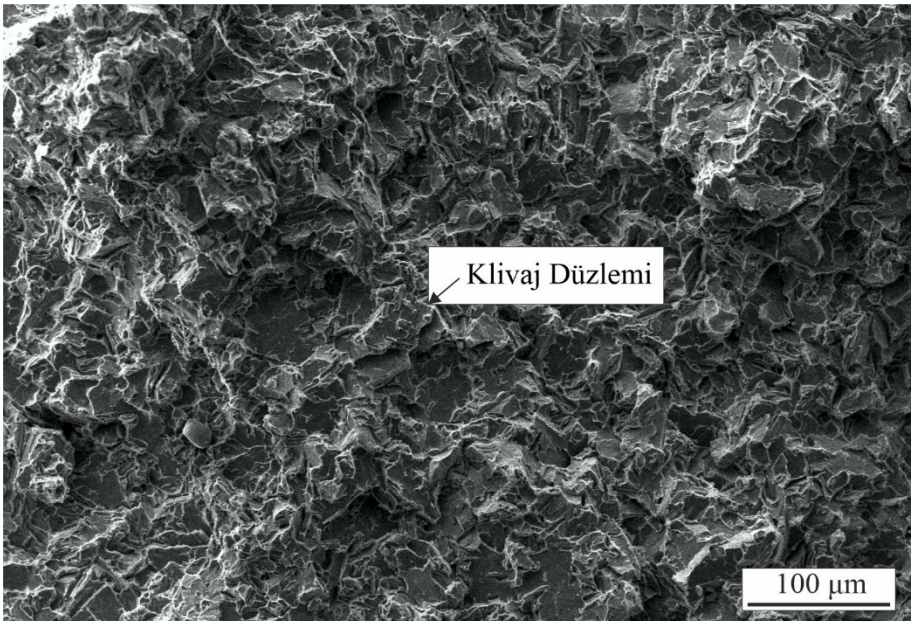
3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

İncelenen alaşımların çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM fotoğraflarını Şekil 23-27'de verilmiştir. Bu fotoğraflarda kırılma yüzeylerinin

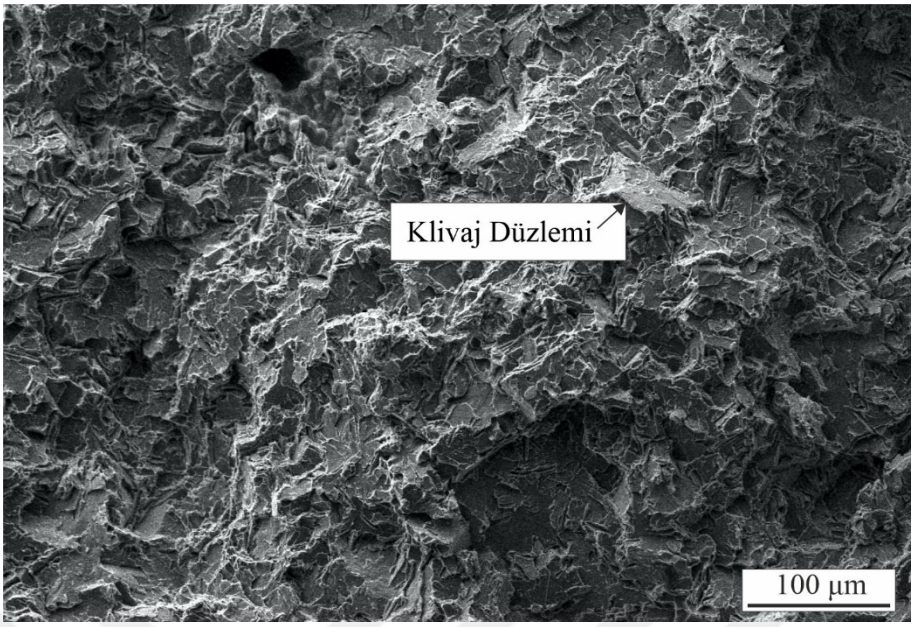
ağırlıklı olarak klivaj düzlemlerinden ve kopma sırtlarından oluştuğu, stronsiyum oranı arttıkça klivaj düzlemlerinin boyutlarının küçülüp sayılarının arttığı ve kopma sırtlarının da yüzeylerde yer almaya başladığı görülmektedir.



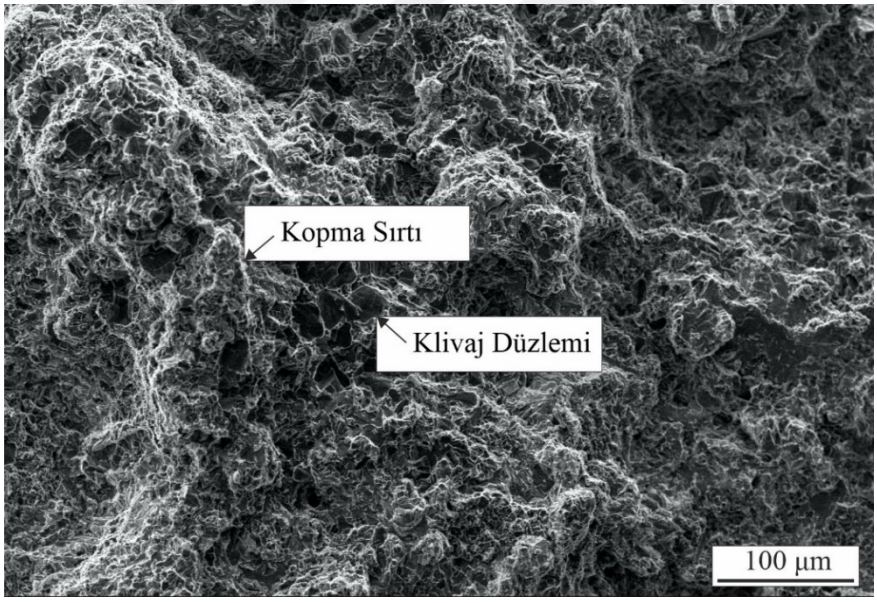
Şekil 22. EN AC 44100 alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



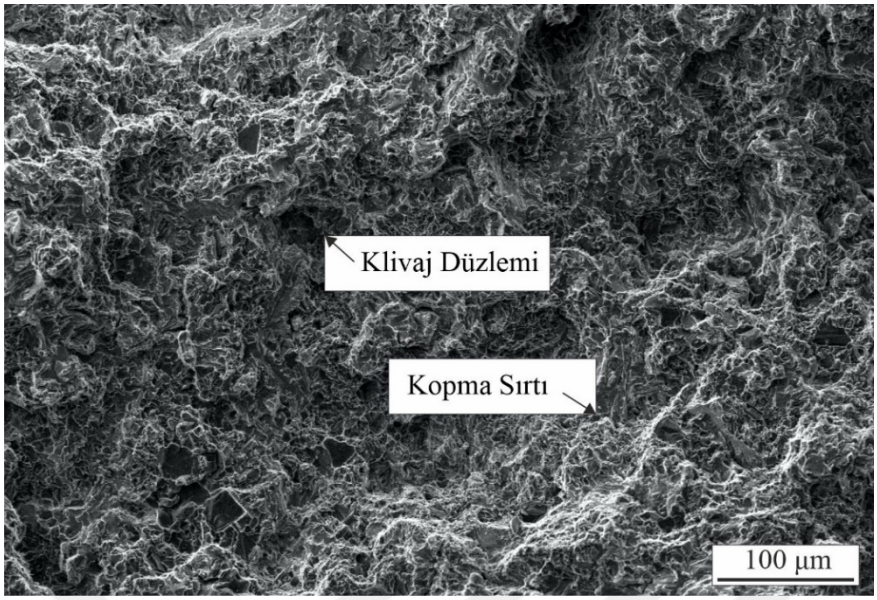
Şekil 23. EN AC 44100-10Zn alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 24. EN AC 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



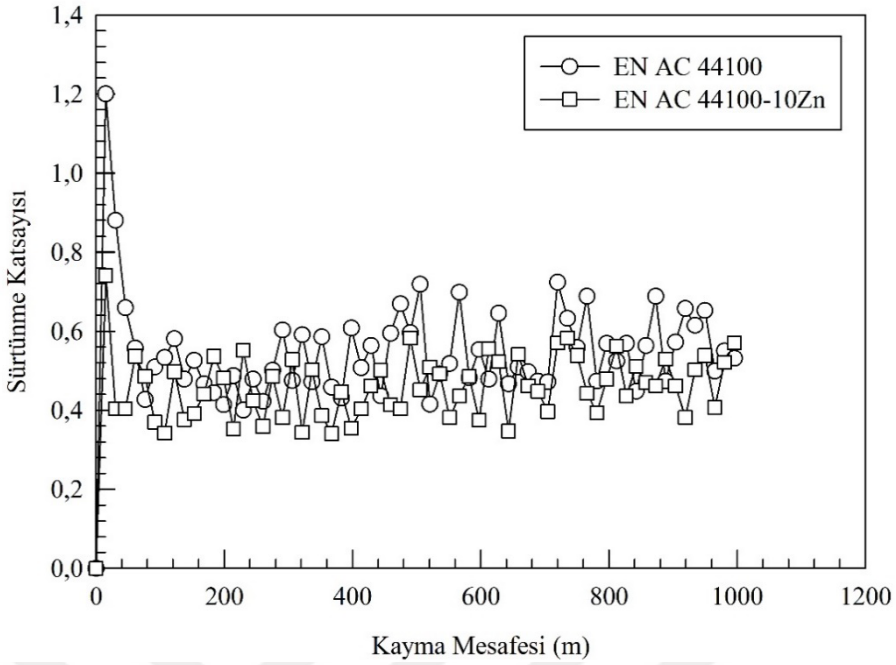
Şekil 25. EN AC 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



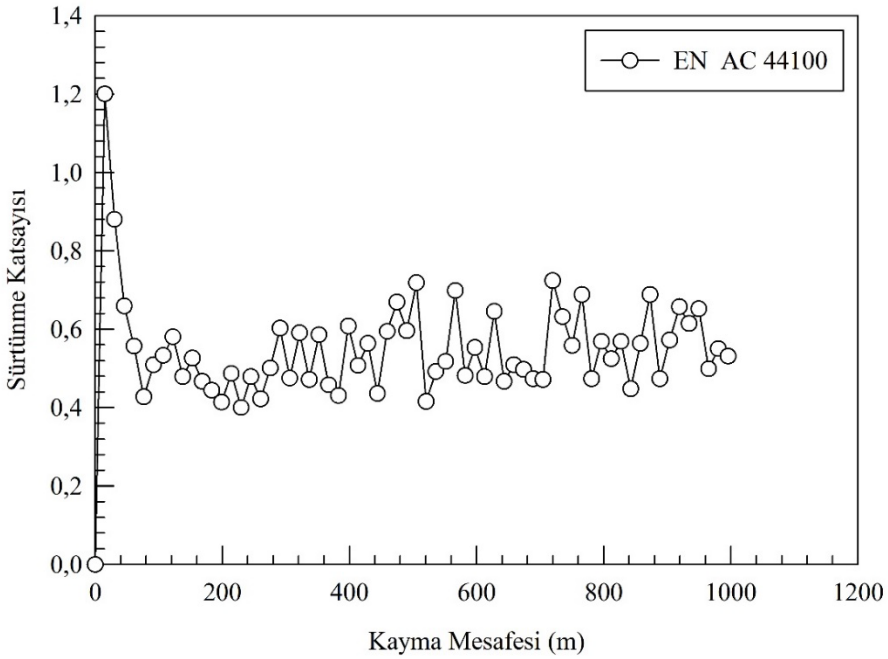
Şekil 26. EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının çekme deney numunesine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

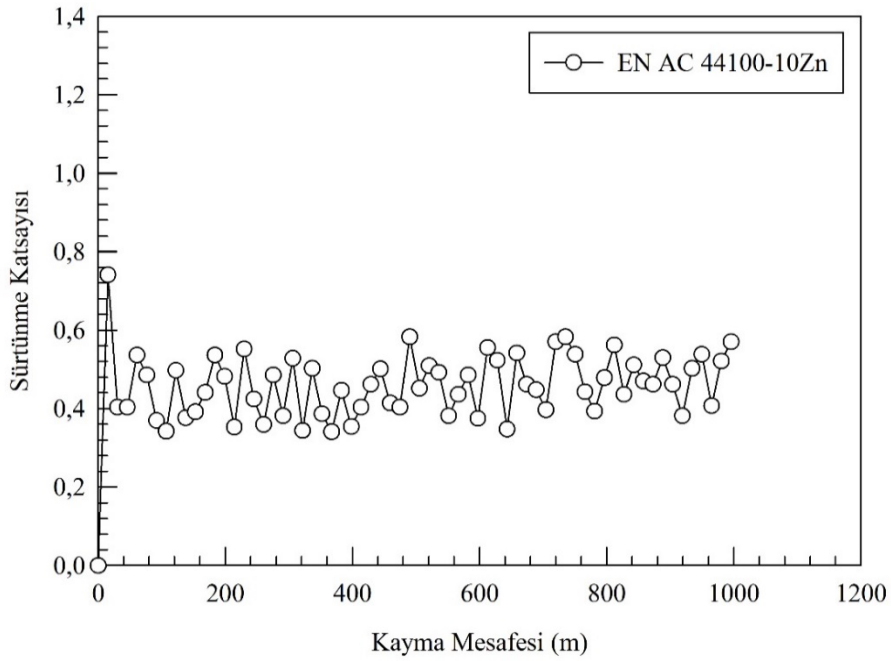
Sürtünme ve aşınma deneyleri boyunca sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 28-38'da verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayılarının kayma mesafesinin başlangıcında hızlı bir artış gösterdiğini daha sonra azalarak belli aralıklarda kararlı bir duruma geldiğini göstermektedir.



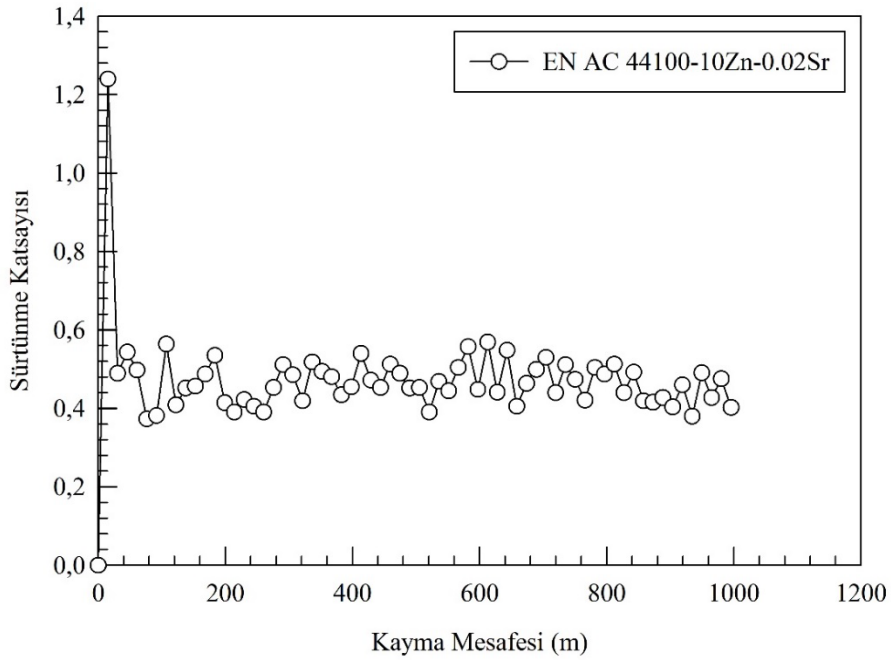
Şekil 27. EN AC 44100 ve EN AC 44100-10Zn alaşımlarının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler



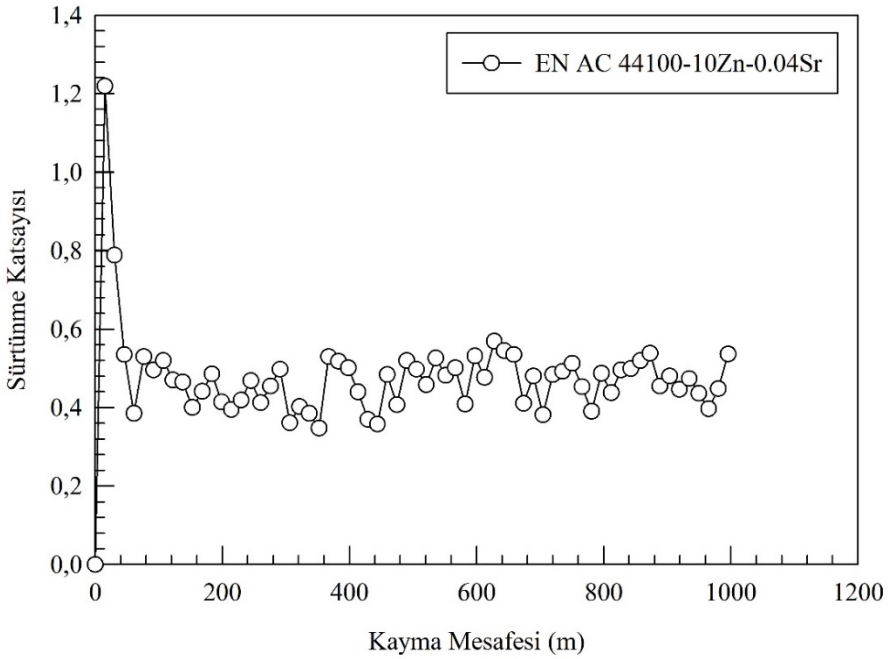
Şekil 28. EN AC 44100 alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



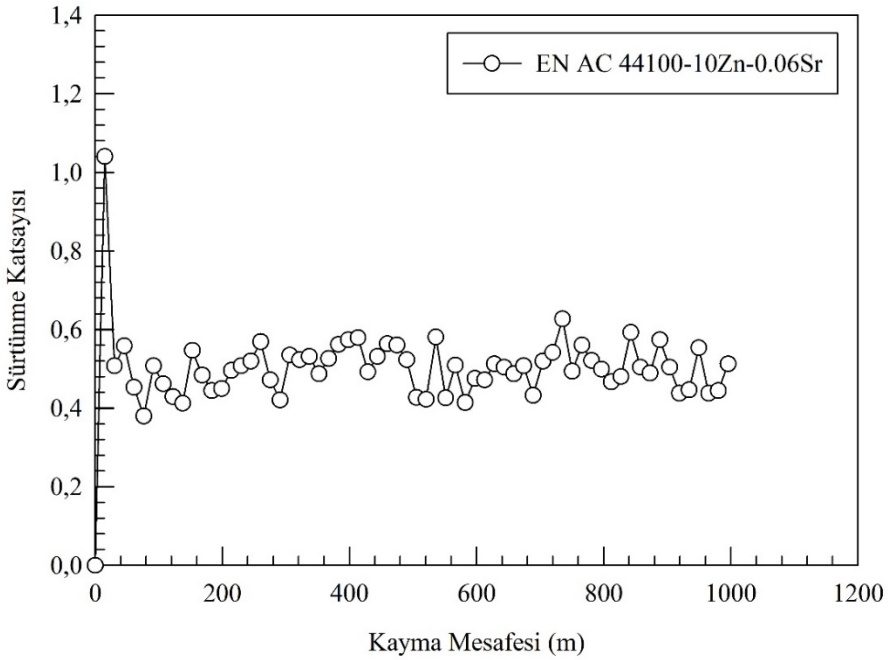
Şekil 29. EN AC 44100-10Zn alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



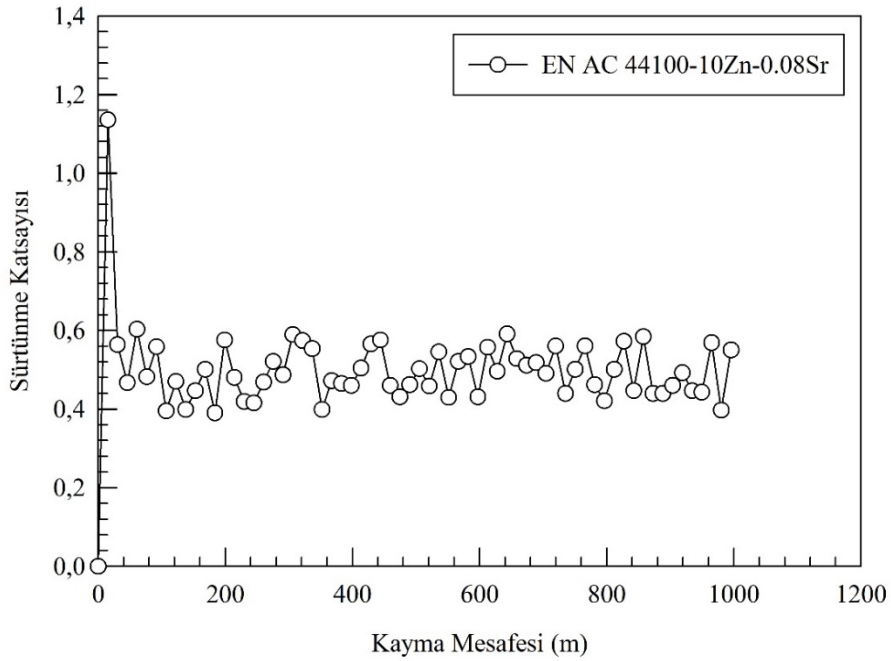
Şekil 30. EN AC 44100-10Zn-0.02Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



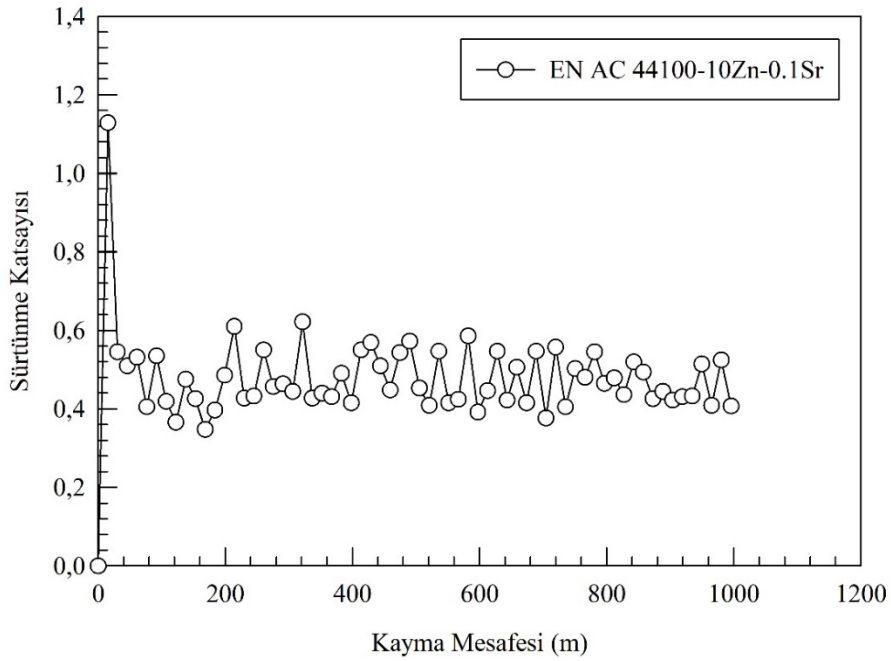
Şekil 31. EN AC 44100-10Zn-0.04Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



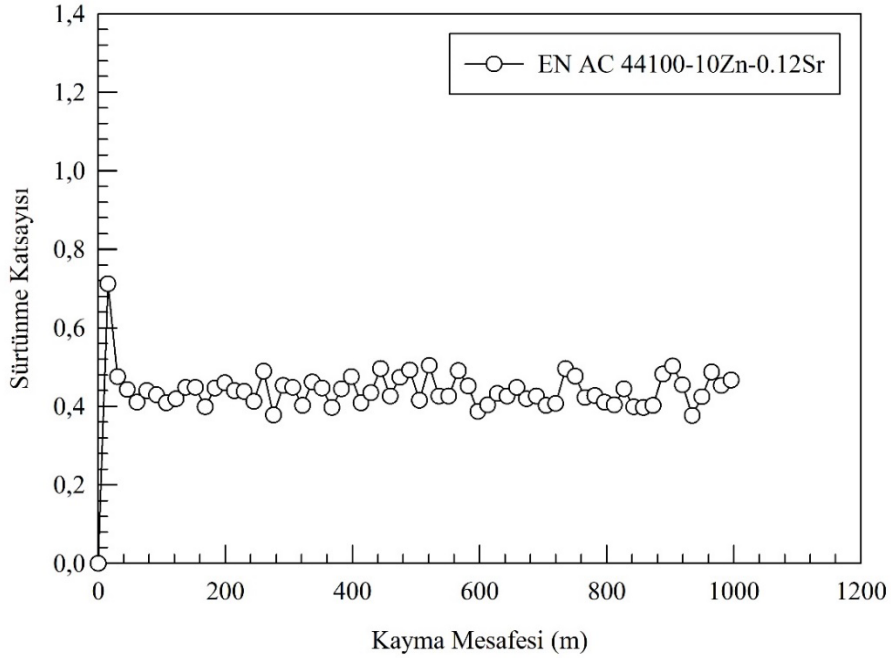
Şekil 32. EN AC 44100-10Zn-0.06Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



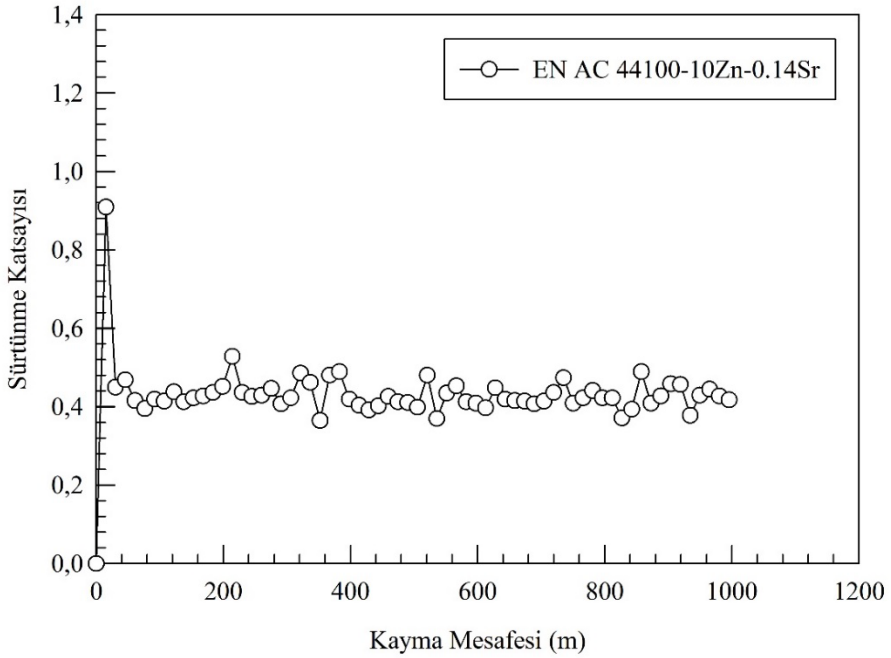
Şekil 33. EN AC 44100-10Zn-0.08Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



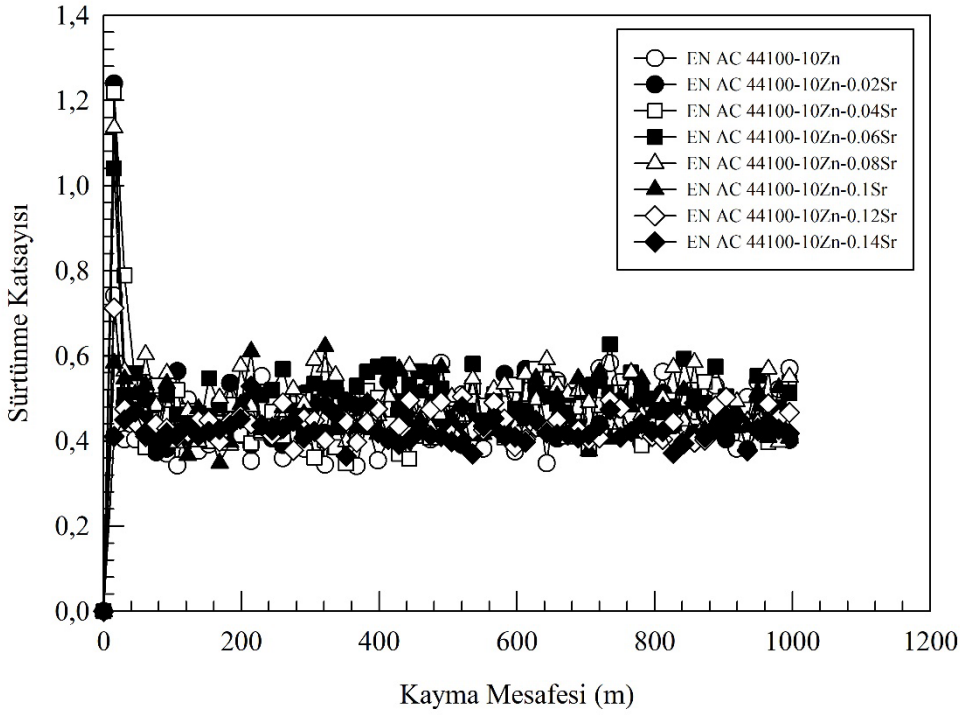
Şekil 34. EN AC 44100-10Zn-0.1Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



Şekil 35. EN AC 44100-10Zn-0.12Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri



Şekil 36. EN AC 44100-10Zn-0.14Sr alaşımının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri

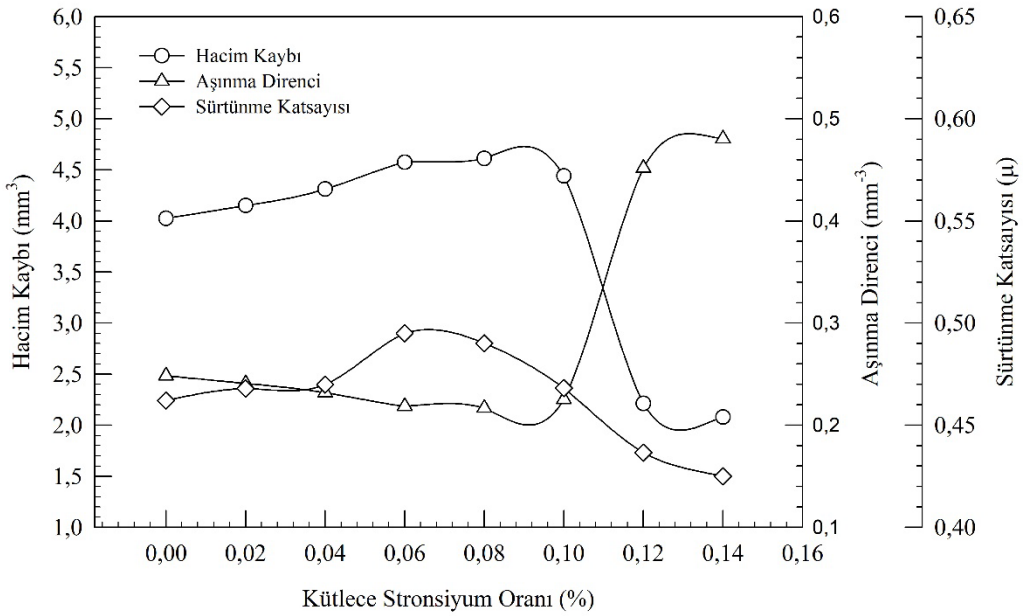


Şekil 37. EN AC 44100-10Zn-(0-0,14)Sr alaşımlarının sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğri

İncelenen alaşımlarının sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri ile hacim kaybı değerleri göz önüne alınarak hesaplanan aşınma direnci değerleri Tablo 8'de, söz konusu değerlerin stronsiyum oranına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 39'da verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere en yüksek sürtünme katsayısını EN AC 44100 alaşımı, en düşük sürtünme katsayılarını EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımları sergilemiştir. Ayrıca çinko ilavesinin EN AC 44100 alaşımının sürtünme katsayısını ve hacim kaybını önemli miktarda düşürdüğü görülmüştür, Tablo 8. İncelenen alaşımlar içerisinde aşınma nedeniyle en düşük hacim kayıpları EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımlarında, en yüksek hacim kaybı ise EN AC 44100 alaşımında elde edilmiştir, Tablo 8. Bir başka deyişle en düşük aşınma direncini EN AC 44100 alaşımı, en yüksek aşınma dirençlerini EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımları sergilemiştir.

Tablo 8. İncelenen alaşımlarının sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve aşınma direnci verileri

Alaşım	Sürtünme katsayısı (μ)	Hacim kaybı (mm^3)	Aşınma Direnci (mm^{-3})
EN AC 44100	0,5189	4,488	0.2228
EN AC 44100-10Zn	0,4621	4,025	0,2484
EN AC 44100-10Zn-0,02Sr	0,4680	4,151	0,2409
EN AC 44100-10Zn-0,04Sr	0,4699	4,311	0,2319
EN AC 44100-10Zn-0,06Sr	0,4950	4,574	0,2186
EN AC 44100-10Zn-0,08Sr	0,4901	4,611	0,2168
EN AC 44100-10Zn-0,10Sr	0,4682	4,440	0,2252
EN AC 44100-10Zn-0,12Sr	0,4366	2,213	0,4518
EN AC 44100-10Zn-0,14Sr	0,4250	2,081	0,4805

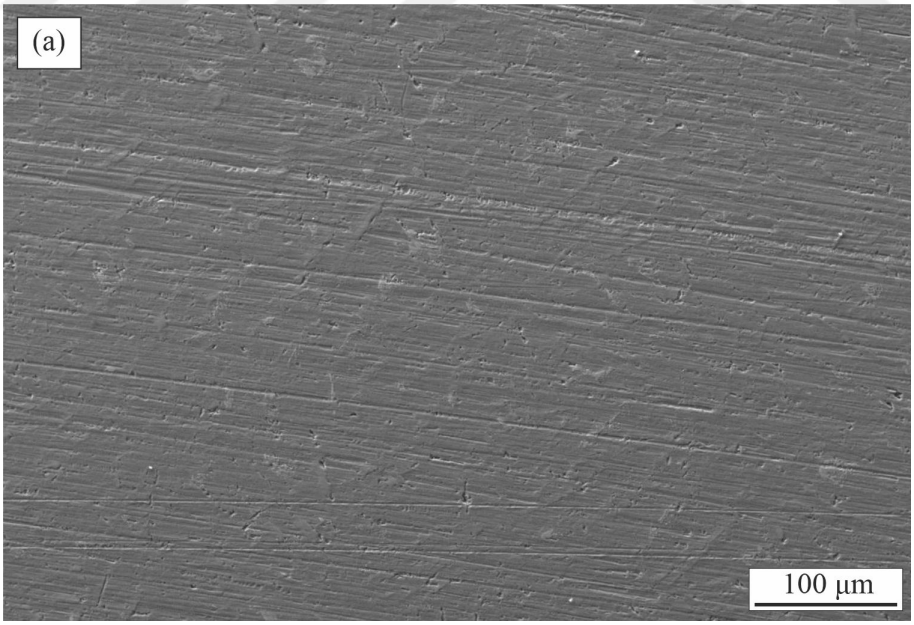


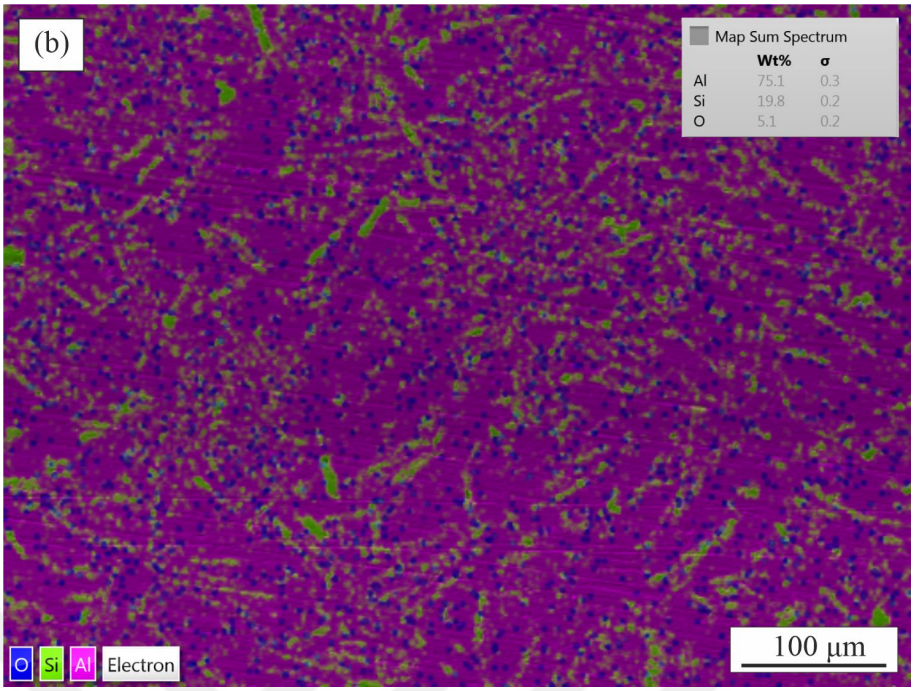
Şekil 38. EN AC 44100, EN AC 44100-10Zn-(0-0,14)Sr alaşımlarında stronsiyum oranına göre hacim kayıpları, aşınma direnci ve sürtünme katsayılarının değişimini gösteren eğriler

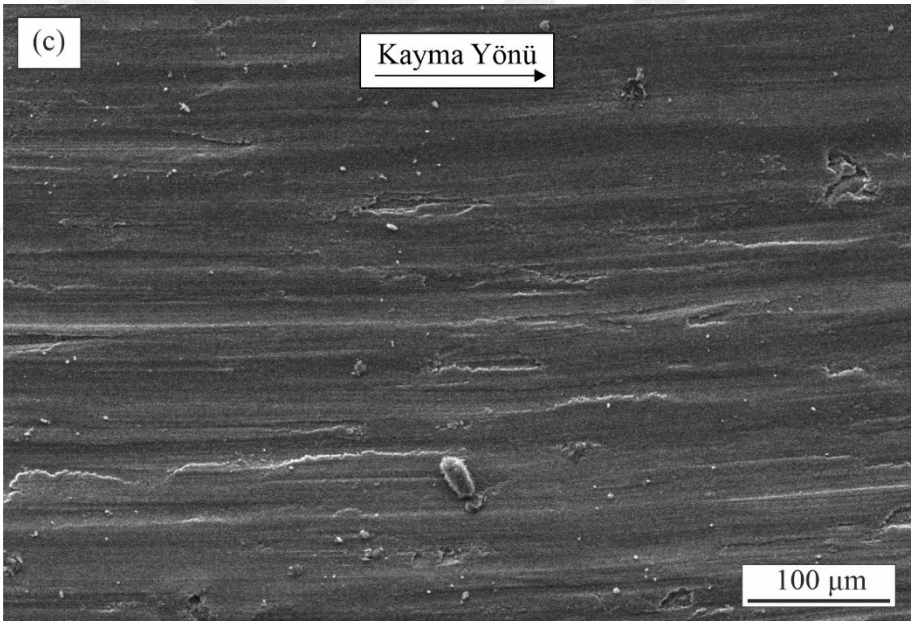
3.5. Aşınma Yüzeyleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinde Elde Edilen Bulgular

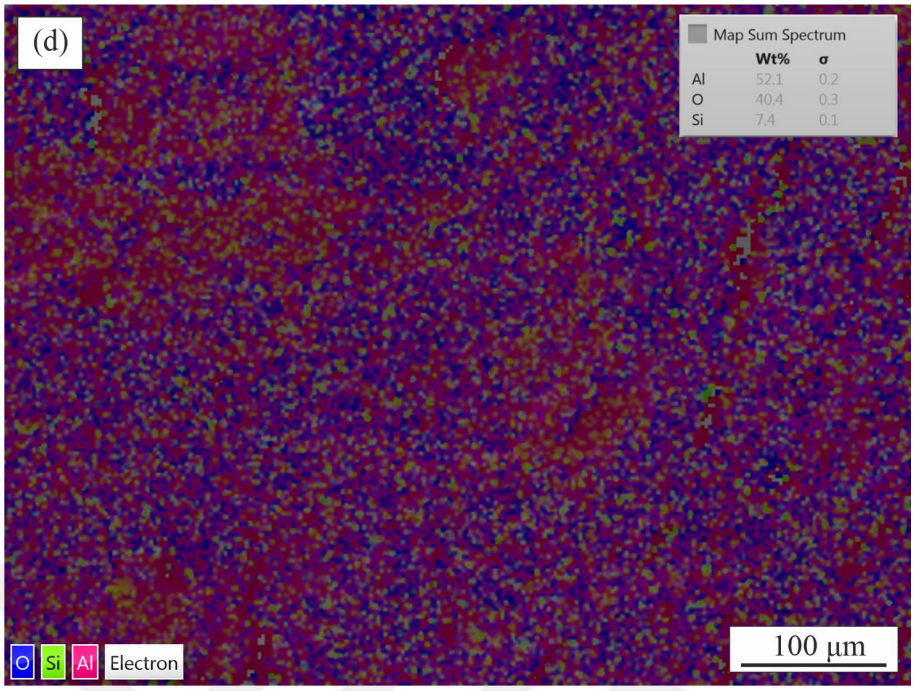
Üretilen alaşımların aşınma yüzeyi karakteristiklerini göstermek amacıyla EN AC 44100, EN AC 44100-10Zn, EN AC 44100-10Zn-0,02Sr, EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımlarına ait aşınma deney numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası yüzey görüntüleri ile EDS element analizlerinin yer

aldığı yüzey haritalama görüntüleri Şekil 40-44'te verilmiştir. Bu görüntülerde numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının ağırlıklı olarak yer aldığı ve EN AC 44100 alaşımına yapılan çinko ilavesinin sıvama tabakalarını artırdığı/kalınlaştırdığı, EN AC 44100-10Zn alaşımına yapılan stronsiyum katkılarının ise aşınma yüzeylerinde belirgin bir değişime yol açmadığı gözlenmiştir. Aşınma yüzeylerinde deneylerden önce ve sonra yapılan EDS analizi sonuçları Tablo 9'da verilmiştir. Bu sonuçlar aşınma yüzeylerinde oksit oranlarının deneylerden sonra arttığını göstermektedir. EN AC 44100, EN AC 44100-10Zn, EN AC 44100-10Zn-0,02Sr, EN AC 44100-10Zn-0,12Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımlarına ait aşınma parçacıklarının görüntüleri Şekil 45-49'de bu parçacıklarının EDS analizi sonuçları Tablo 9'da yer almaktadır. Yaklaşık olarak 250 μm boyutlarına kadar ulaşabilen bu parçaların boyutlarında çinko ve stronsiyum ilavesi ile belirgin bir değişikliğe rastlanılmamıştır. Söz konusu parçacıklar üzerinde yapılan EDS analizleri bu parçacıklardaki kimyasal bileşimlerinin aşınma yüzeylerine benzer olduğunu ancak oksijen oranlarının aşınma yüzeylerininkinden daha yüksek olduğunu göstermiştir, Tablo 9.

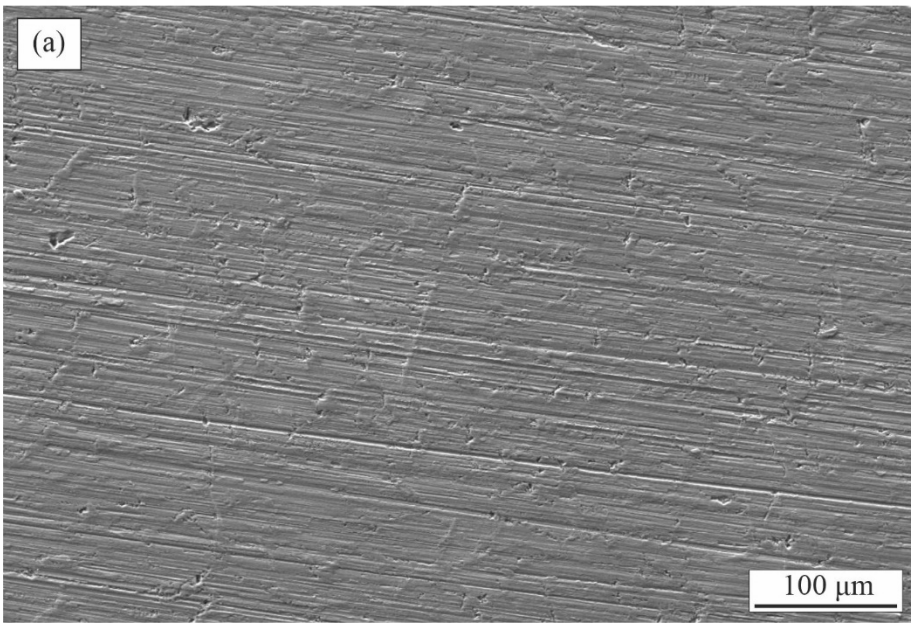


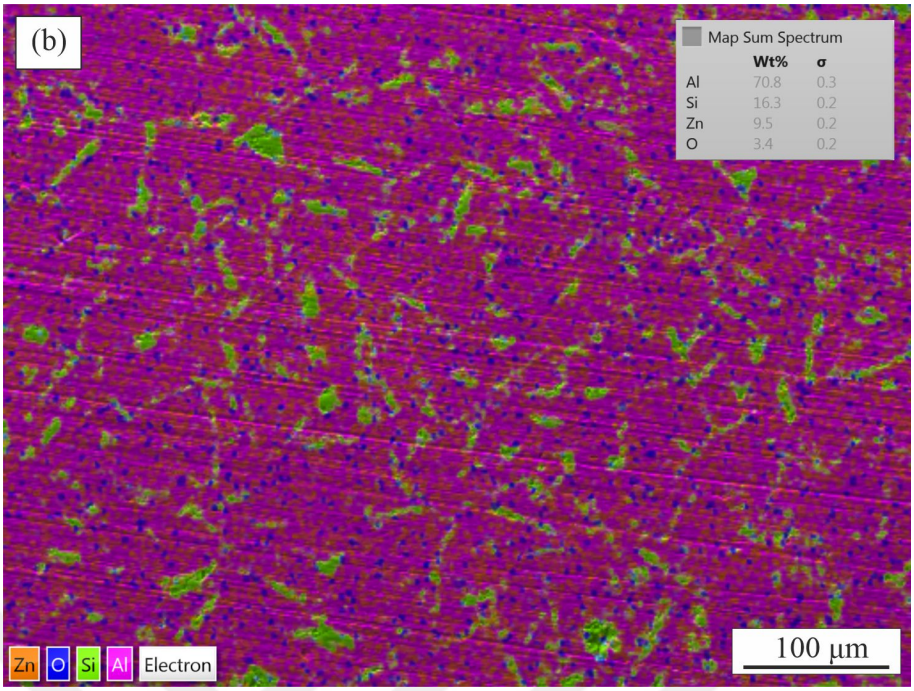

(b)
Map Sum Spectrum
Wt% σ
Al 75.1 0.3
Si 19.8 0.2
O 5.1 0.2
O Si Al Electron
100 µm

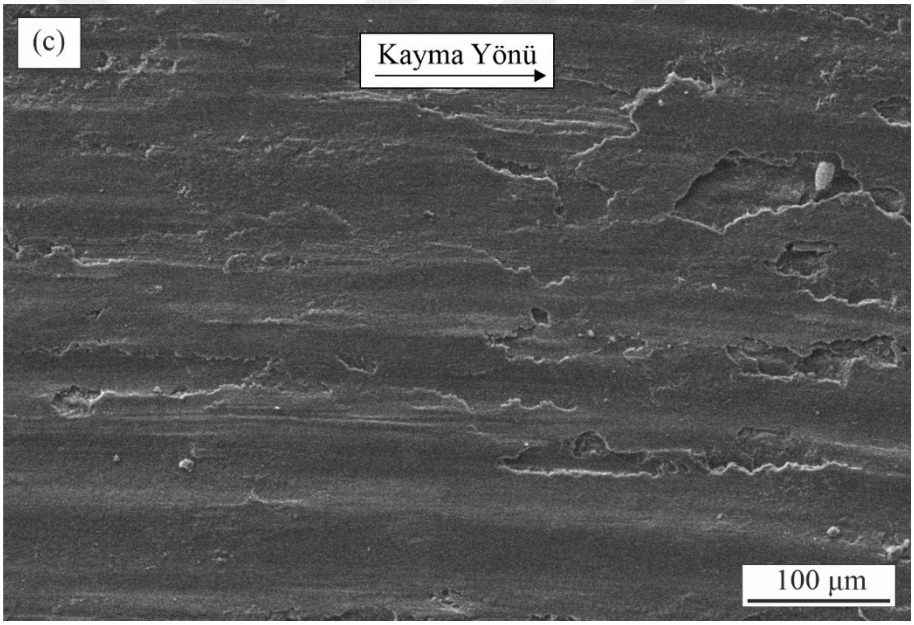

(c)
Kayma Yönü
100 µm

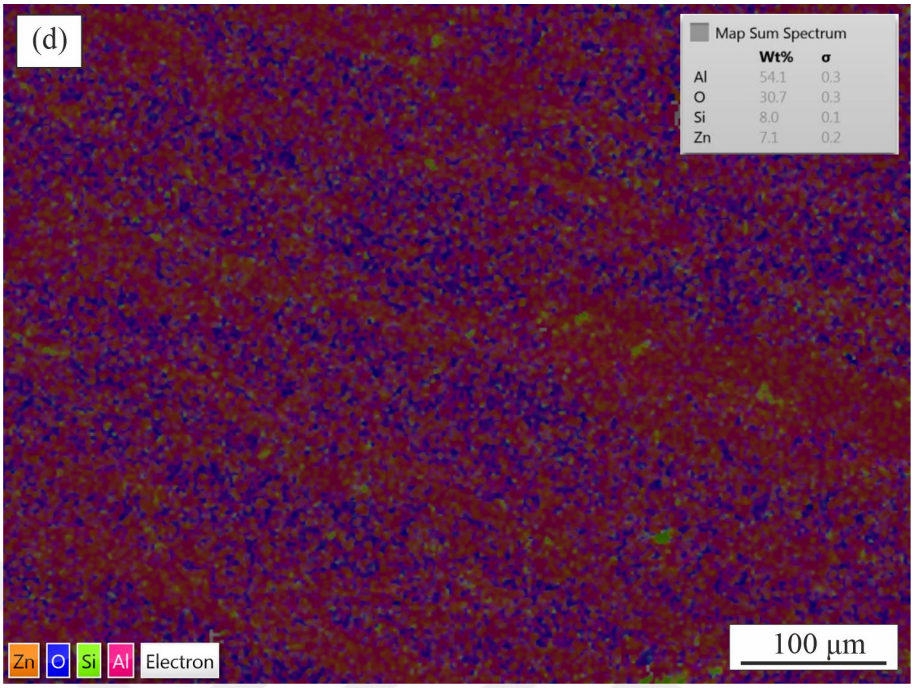


Şekil 39. EN AC 44100 alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d)

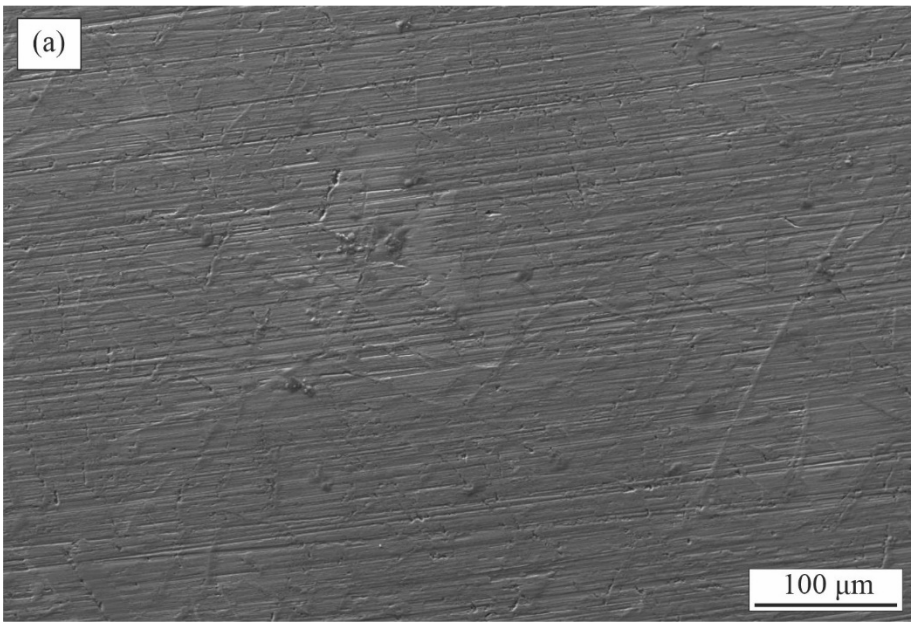


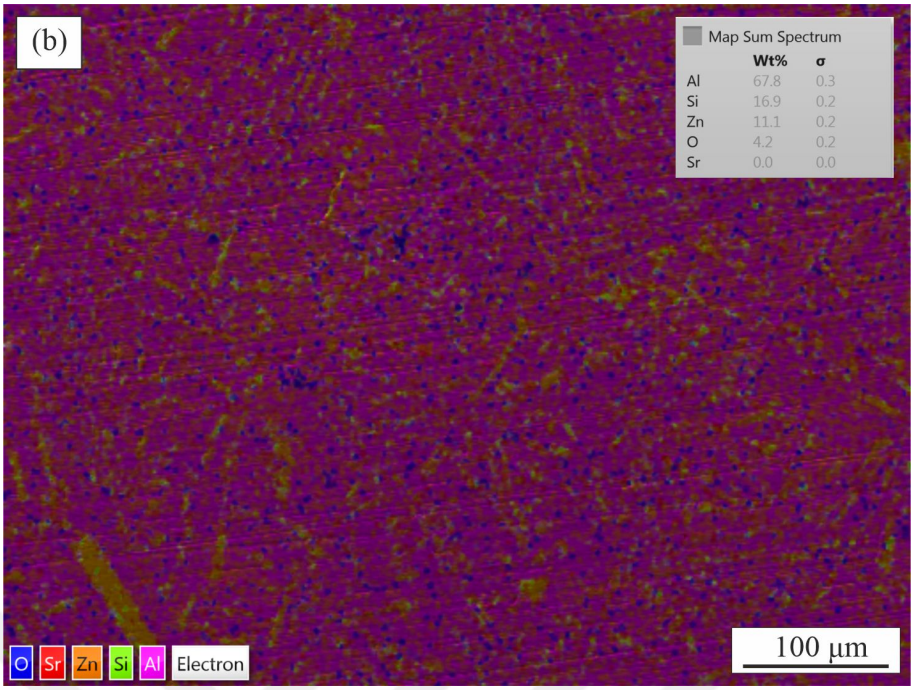

(b)
Map Sum Spectrum
Wt% σ
Al 70.8 0.3
Si 16.3 0.2
Zn 9.5 0.2
O 3.4 0.2
Zn O Si Al Electron
100 µm

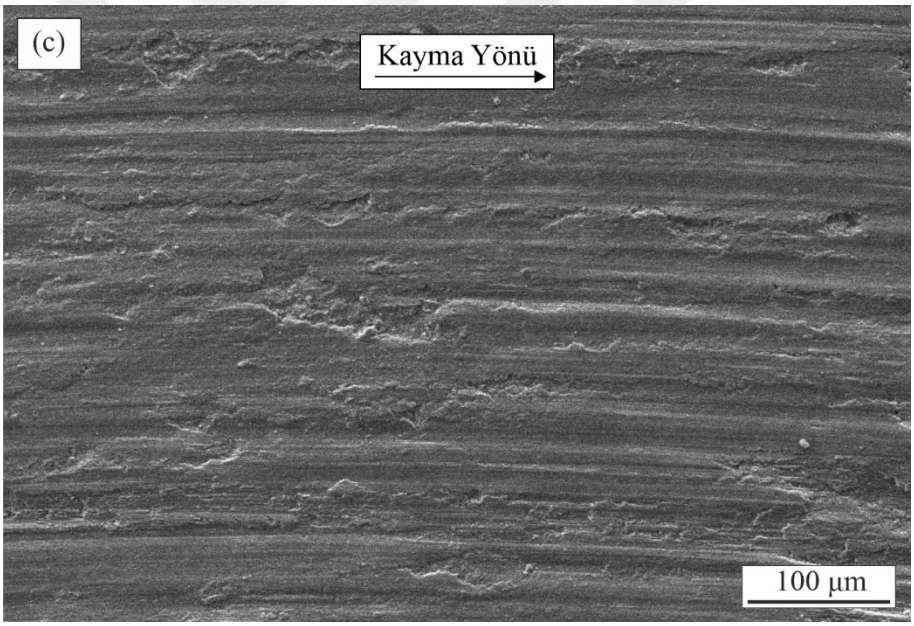

(c)
Kayma Yönü
100 µm

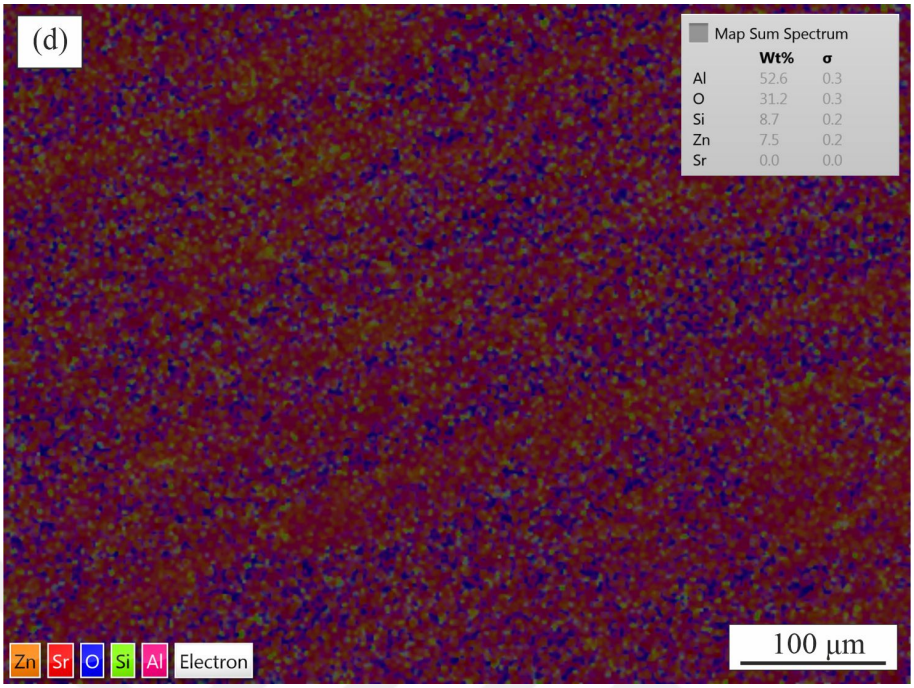


Şekil 40. EN AC 44100-10Zn alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d)

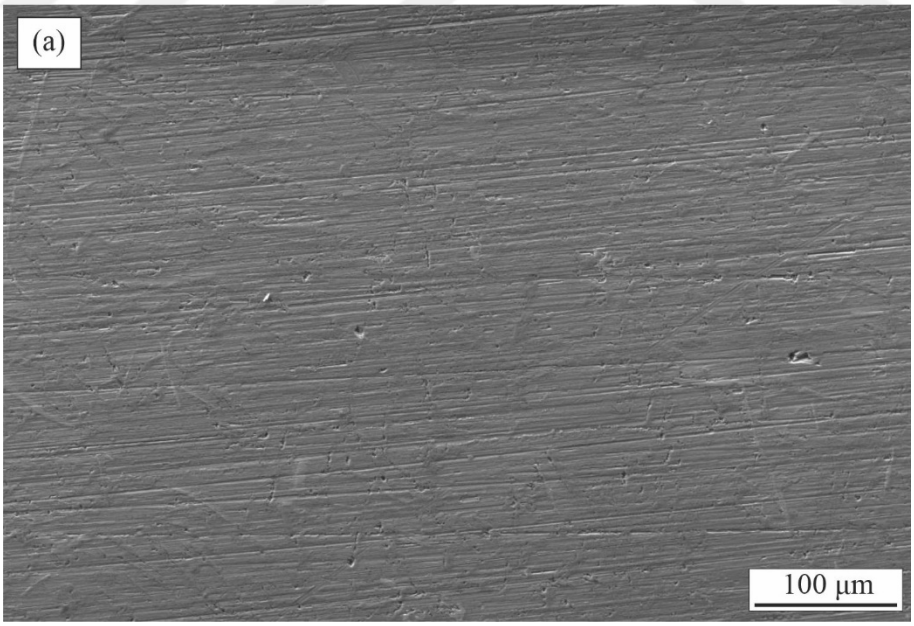


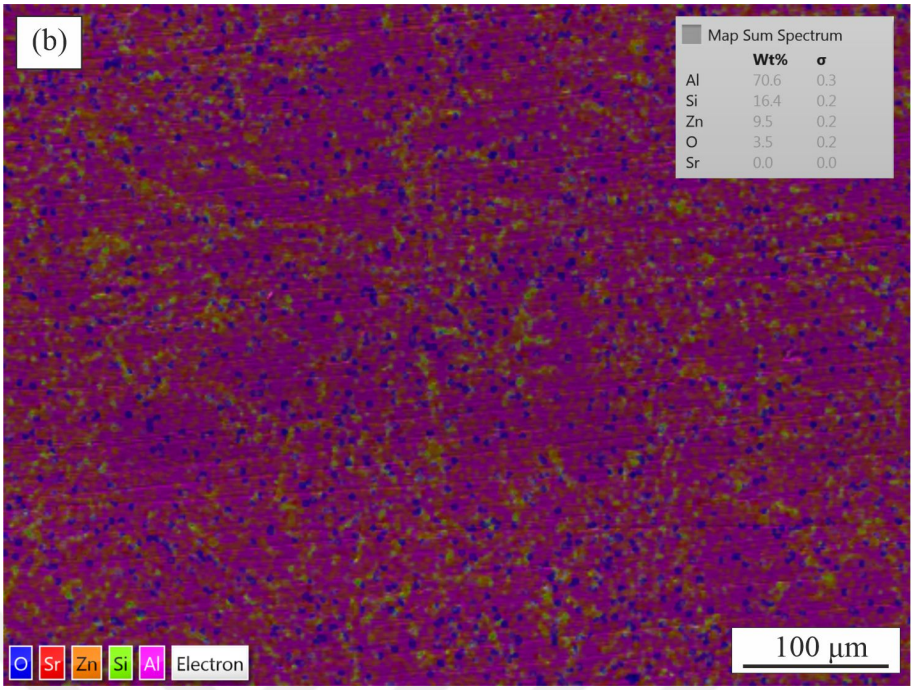

(b)
Map Sum Spectrum
Wt% σ
Al 67.8 0.3
Si 16.9 0.2
Zn 11.1 0.2
O 4.2 0.2
Sr 0.0 0.0
O Sr Zn Si Al Electron
100 µm

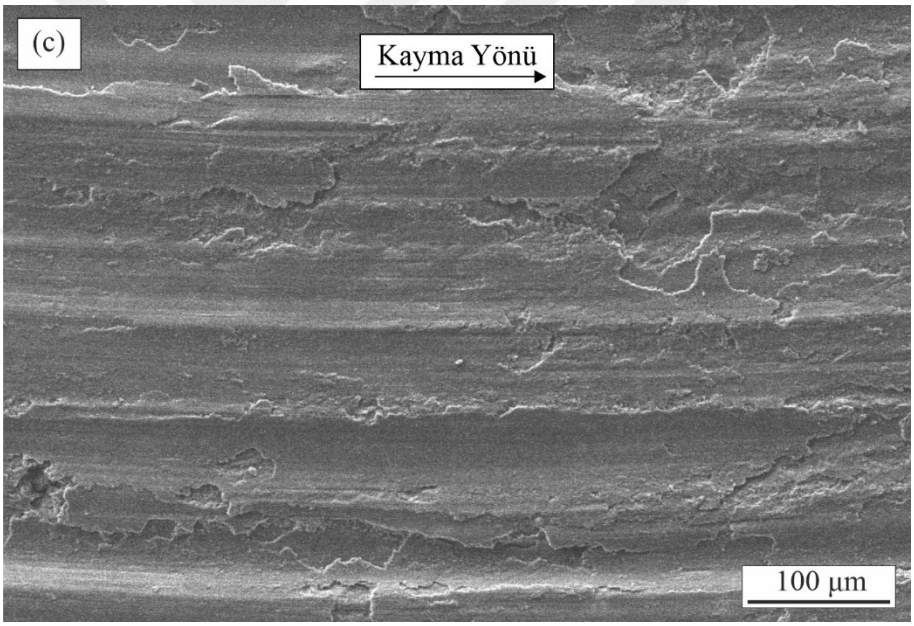

(c)
Kayma Yönü
100 µm

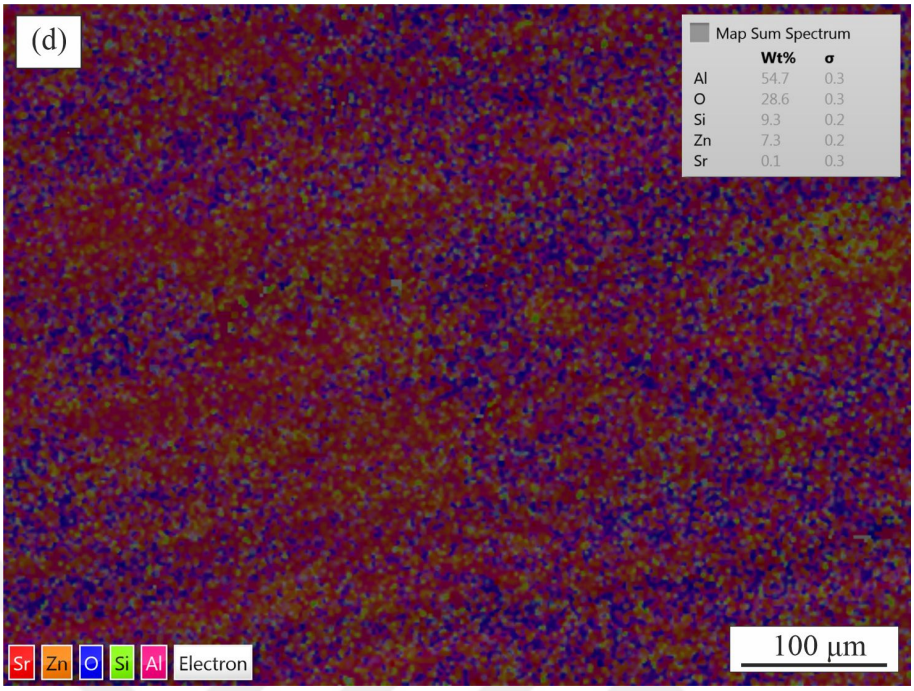


Şekil 41. EN AC 44100-10Zn-0,02Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d)

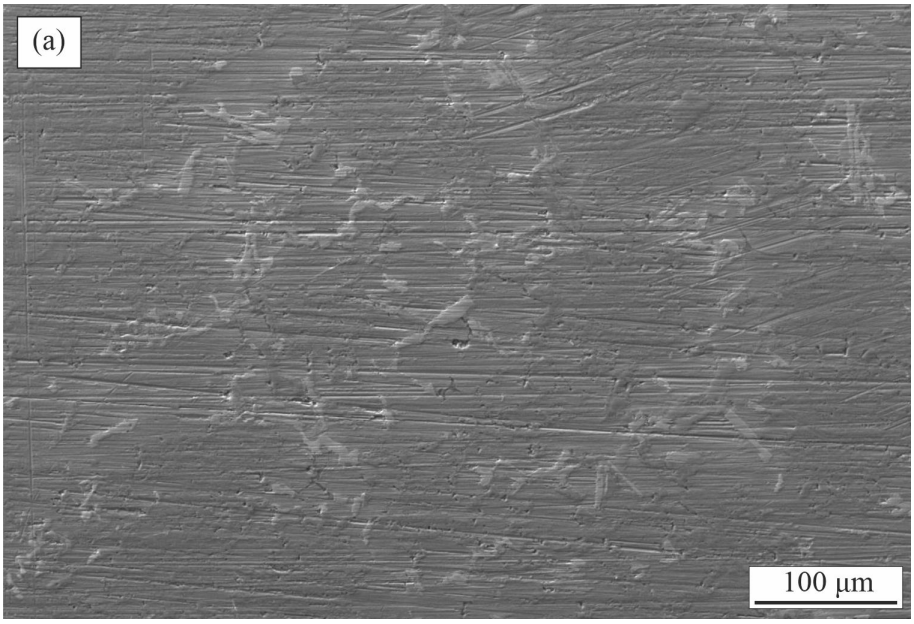


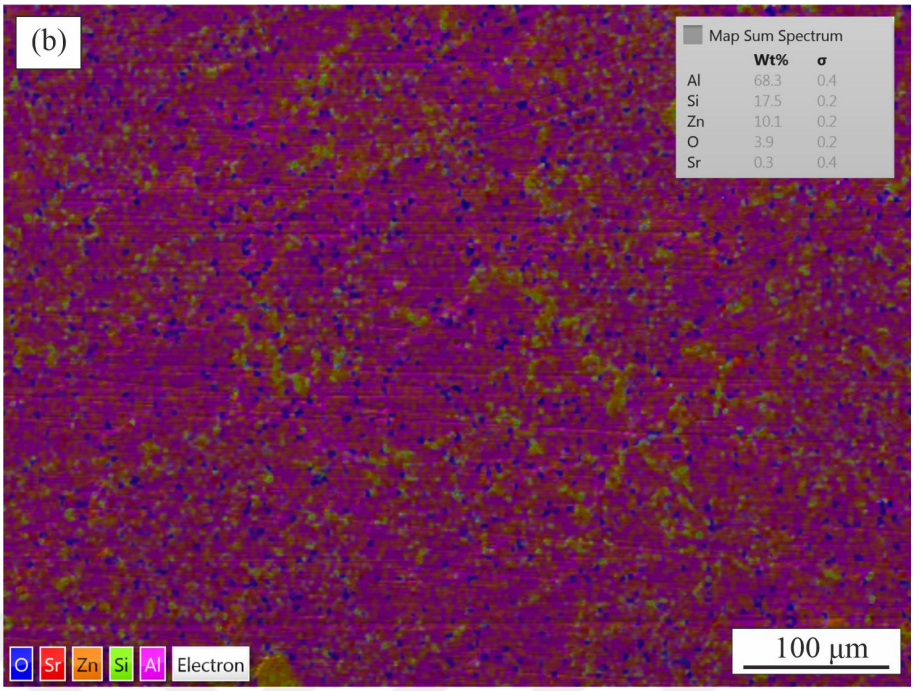

(b)
Map Sum Spectrum
Wt% σ
Al 70.6 0.3
Si 16.4 0.2
Zn 9.5 0.2
O 3.5 0.2
Sr 0.0 0.0
O Sr Zn Si Al Electron
100 µm

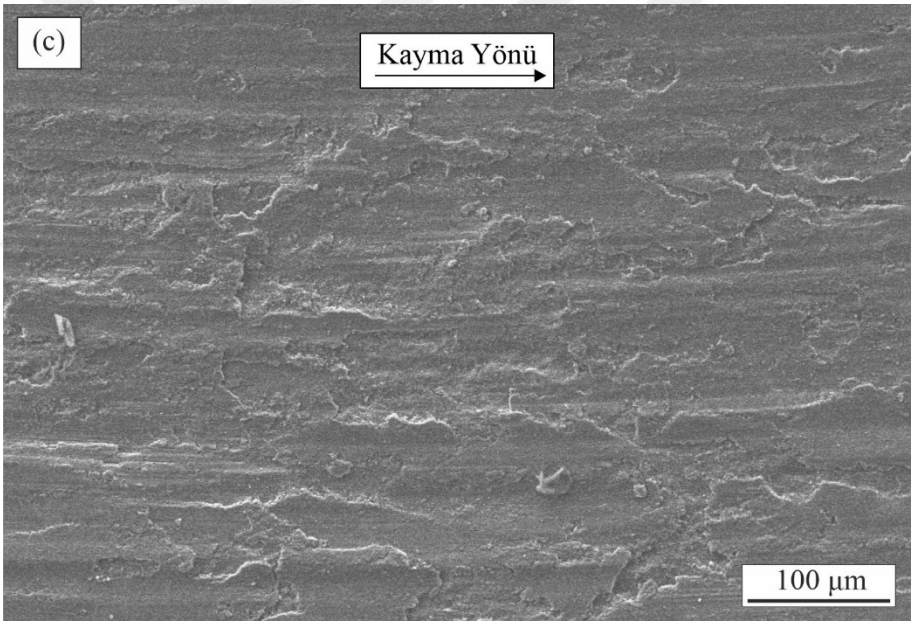

(c)
Kayma Yönü
100 µm

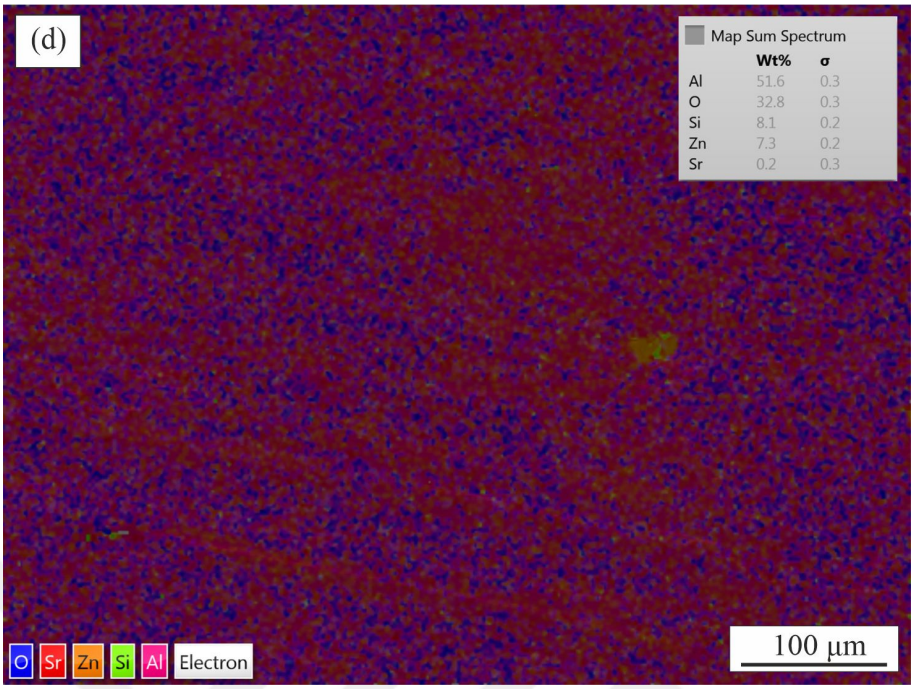


Şekil 42. EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d)

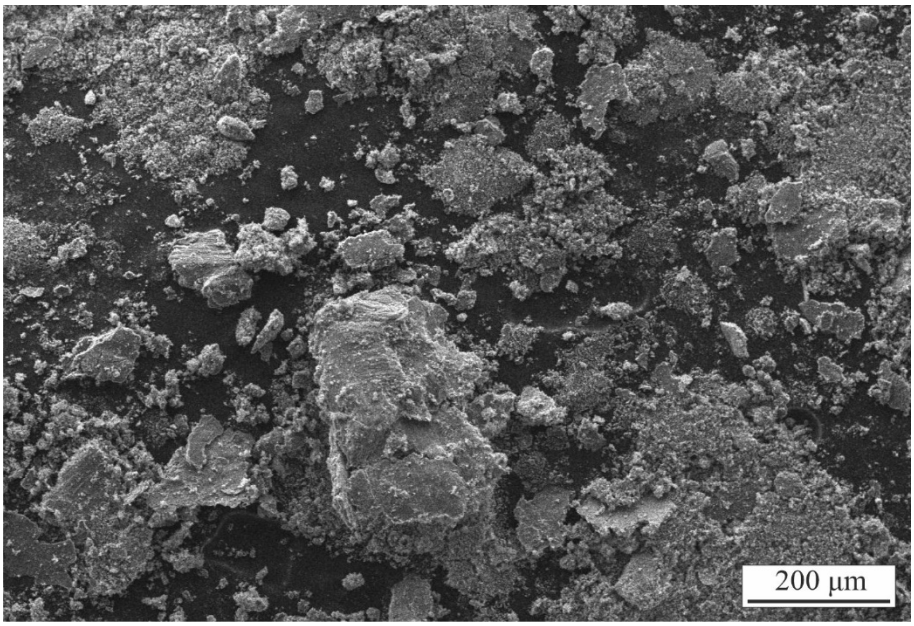



(b)
Map Sum Spectrum
Wt% σ
Al 68.3 0.4
Si 17.5 0.2
Zn 10.1 0.2
O 3.9 0.2
Sr 0.3 0.4
O Sr Zn Si Al Electron
100 µm

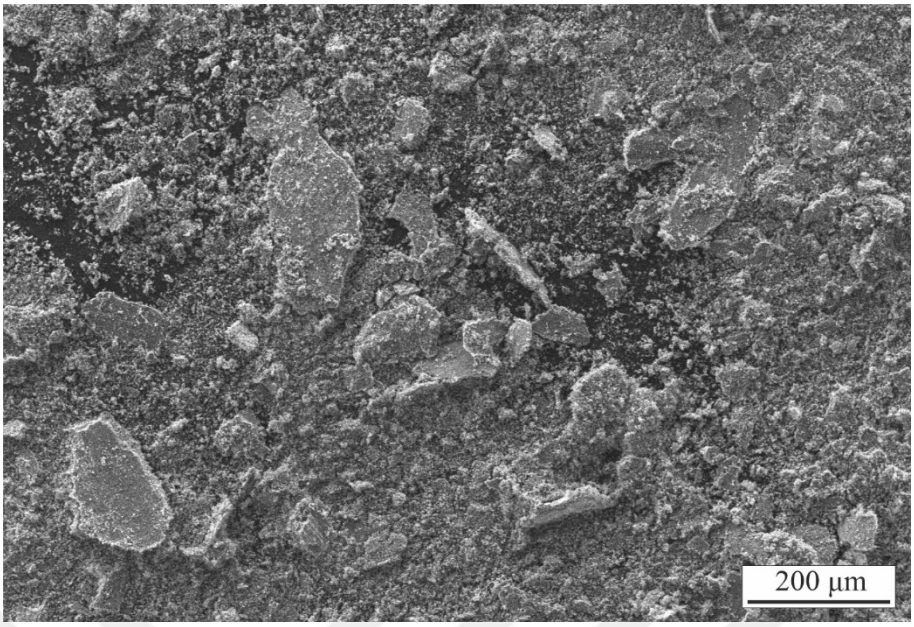

(c)
Kayma Yönü
100 µm



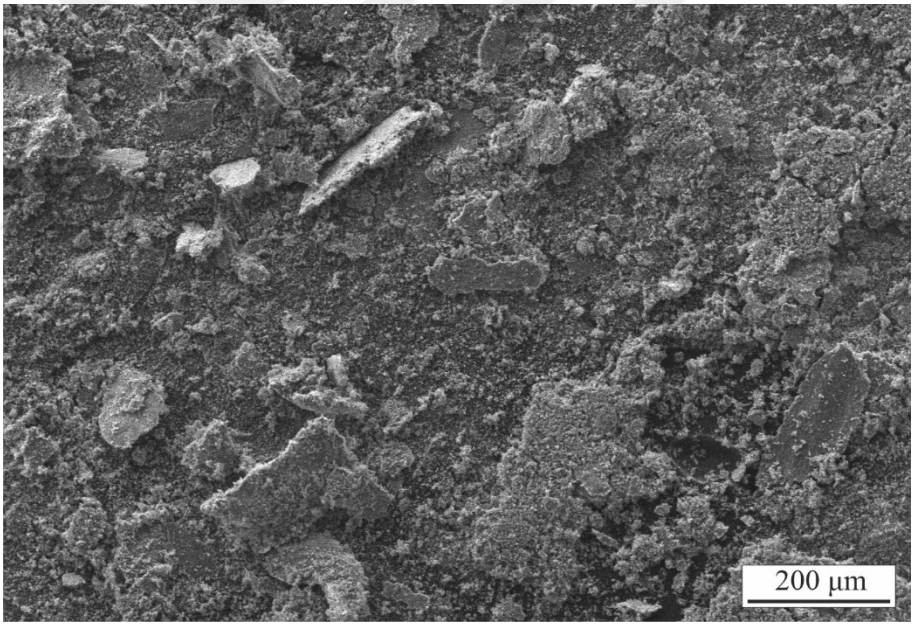
Şekil 43. EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımının aşınma yüzeylerinin aşınma öncesi SEM görüntüsü (a), EDS haritalama (b), aşınma sonrası SEM görüntüsü (c), aşınma sonrası EDS haritalama görüntüsü (d)



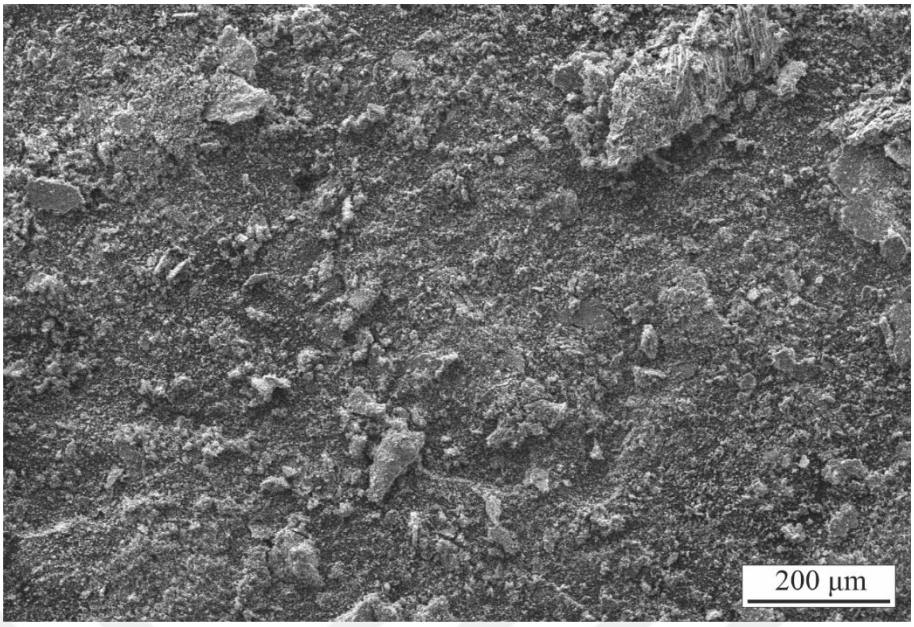
Şekil 44. EN AC 44100 alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



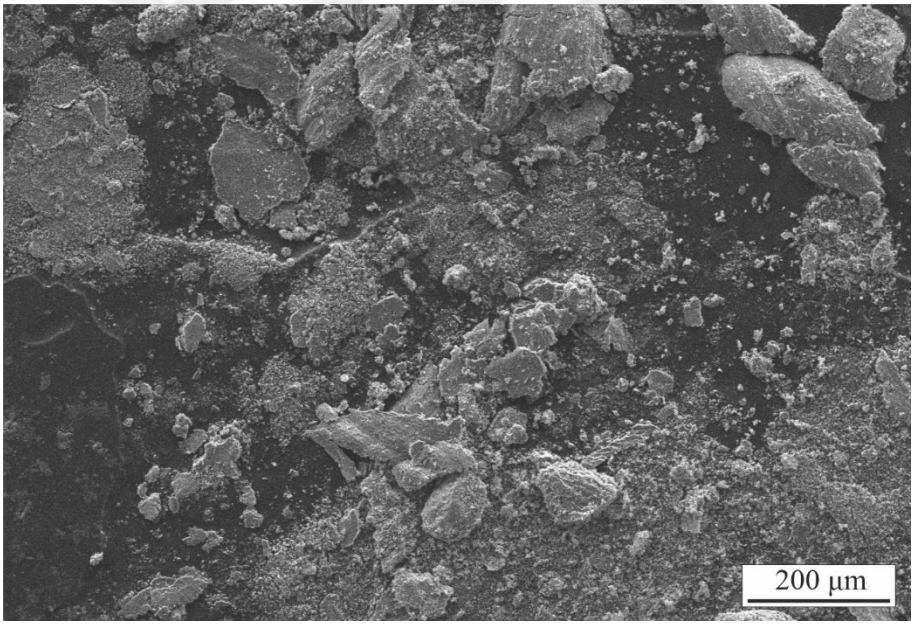
Şekil 45. EN AC 44100-10Zn alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 46. EN AC 44100-10Zn-0,02Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 47. EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 48. EN AC 44100-10Zn-0,14Sr alaşımının aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

Tablo 9. Aşınma yüzeylerinin ve aşınma parçacıklarının deney öncesi ve deney sonrası EDS analiz sonuçları

Alaşım	Analiz Bölgesi	Kimyasal Bileşim (%)				
		Al	Si	O	Zn	Sr
EN AC 44100	Aşınma Yüzeyi *	75,1	19,8	5,1	-	-
	Aşınma Yüzeyi **	52,1	7,4	40,4	-	-
	Aşınma Parçacığı	50,3	6,7	43,0	-	-
EN AC 44100-10Zn	Aşınma Yüzeyi *	70,8	16,3	3,4	9,5	-
	Aşınma Yüzeyi **	54,1	8,0	30,7	7,1	-
	Aşınma Parçacığı	49,1	6,3	38,1	6,4	-
EN AC 44100-10Zn-0.02Sr	Aşınma Yüzeyi *	67,8	16,9	4,2	11,1	
	Aşınma Yüzeyi **	52,6	8,7	31,2	7,5	0
	Aşınma Parçacığı	47,6	6,6	39,2	6,5	0,1
EN AC 44100-10Zn-0,12Sr	Aşınma Yüzeyi *	70,6	16,4	3,5	9,5	0
	Aşınma Yüzeyi **	54,7	9,3	28,6	7,3	0,1
	Aşınma Parçacığı	49,1	6,8	37,1	6,8	0,1
EN AC 44100-10Zn-0,14Sr	Aşınma Yüzeyi *	68,3	17,5	3,9	10,1	0,3
	Aşınma Yüzeyi **	51,6	8,1	32,8	7,3	0,2
	Aşınma Parçacığı	46,4	6,4	40,2	6,6	0,16

*: Deney öncesi

**: Deney sonrası

4. TARTIŞMA

Bu tez kapsamında baz alınan EN AC 44100 alaşımı α, ötektik Al-Si, birincil silisyum ve β (Al-Fe-Si) fazlarından oluşmaktadır, (Şekil 13). Birincil silisyum parçaları farklı geometrilerde kaba ve keskin köşeli olup, alaşımın içyapısında gelişigüzel dağılım sergilemektedir. Ötektik silisyum parçacıkları ise ince uzun ve iğne şekilli bir morfolojiye sahip olup ötektik bölgede alüminyum matris üzerinde dağınık halde bulunmaktadır (Şekil 13). Bu fazların ve iç yapının oluşumu elementlerin ergime sıcaklıkları ve ikili Al-Si denge diyagramı göz önüne alınarak açıklanabilir. Şöyle ki, saf alüminyum ve silisyumun ergime sıcaklıkları sırasıyla 614 ve 1414 ºC'dir. Çalışmamızda ergimiş sıvı metalin dökümü oda koşullarında yani denge dışı koşullarda döküm gerçekleştirildiği için öncelikli olarak birincil α ve Si fazlarının katılaşması gerçekleşir. Kalan sıvı metalin kimyasal bileşimi ve sıcaklığı ötektik noktanın bileşimine eriştiğinde (577 ºC sıcaklık ve %12,6 Si oranı) ötektik katılaşma gerçekleşir ve yapı nihai görünümünü alır. İçyapıda hacimsel miktarı diğer fazlara göre çok az olan β fazının ise yaklaşık olarak 850 °C'de gerçekleşen Sıvı + δ-Al_4FeSi_2→β-Al_5FeSi+Si peritektik reaksiyonu ile oluştuğu bilinmektedir (Barrirero vd., 2016; Ebhota & Jen, 2018; Elsebaie vd., 2013; Z. Li & Yan, 2015; Taylor, 2012). Buradaki demir (Fe) alaşımın yapısındaki safsızlık elementidir.

EN AC 44100 baz alaşımına %10Zn ilavesiyle elde edilen EN AC 44100-%10Zn alaşımı baz alaşımdaki α-Al, ötektik Al-Si ve birincil Si fazlarına ek olarak Al-Fe-Si-Zn fazını içermektedir. Al-Fe-Si-Zn fazının β-Al_5FeSi fazında çinkonun çözünmesiyle veya β fazının çinko ile reaksiyona girmesiyle oluştuğu düşünülmektedir. EN AC 44100 alaşımına yapılan %10Zn ilavesi bu alaşımdaki α-Al ile ötektik Al-Si faz bölgelerinin küçülerek neredeyse homojen bir dağılım sergilemesine yol açmıştır, Şekil 14. Bu durum alaşıma yapılan çinko ilavesinin çekirdeklenmeyi artırması, katılaşma aralığını daraltması ve/veya soğuma hızını artırmasından kaynaklanmış olabilir. Çinko ilavesi sonucunda EN AC 44100 alaşımındaki α-Al faz bölgelerinin hacimsel oranında azalma olmaktadır, Şekil 14. Bu durum çinko ilavesiyle ötektik noktanın daha düşük silisyum oranına kaymasından kaynaklanmış olabilir. Literatürde çinko katkılarının Al-Si alaşımlarındaki ötektik noktayı kaydırdığına dair çalışmalar mevcuttur (Farahany vd., 2013; Liao vd., 2014;

Patel & Prajapati, 2012; Wu vd., 2014). EN AC 44100 alaşımındaki iğnemsi uzun şekilli ötektik silisyum parçacıkları %10 çinko ilavesi sonucunda incelmiş ve/veya parçalanmış görüntü sergilemiştir. Birincil silisyum parçacıklarının ise kaba ve keskin köşeli bir yapıdan nispeten daha yuvarlak bir şekle büründüğü ve boyutlarının küçüldüğü gözlenmiştir, Şekil 14. Bu durum çinko ilavesinin katılaşma/soğuma hızını artırmasından dolayısıyla çekirdekleşmeyi ve tane büyümesini yavaşlatmasından kaynaklanmış olabilir (Alemdag vd., 2021; Alemdağ & Beder, 2014; El Sebaie vd., 2008; Hekimoglu vd., 2020; Kasprzak vd., 2009; Shehata vd., 2021; Xavier vd., t.y.).

EN AC 44100-10Zn-(0,02-0,14)Sr alaşımlarında EN AC 44100-%10Zn alaşımındaki fazlardan farklı olarak Al-Zn-Fe-Si fazı oluşmuştur, Şekil 14 ve 15. Bu faz artan stronsiyum oranı ile düz ince uzun bir form almıştır, Şekil 19. Stronsiyum katkısı %0,1 oranını geçtiğinde bu fazın morfolojisi değişmiş, bazı faz parçacıkları dallanmış, bazıları ise parçalanarak taneli bir şekil almıştır, Şekil 19. Söz konusu Al-Zn-Fe-Si fazı EN AC 44100-%10Zn alaşımında gözlenen Al-Fe-Si-Zn fazından daha fazla çinko içermektedir. Al-Zn-Fe-Si fazının stronsiyum etkisiyle alaşımın katılaşma koşullarının değişmesi sonucunda oluşan kararsız veya yarı kararlı intermetalik bir faz olduğu düşünülmektedir. Stronsiyum oranı arttıkça bu fazın morfolojinin değişmesi alaşımın soğuma koşullarının farklılaşması (soğuma hızının artması) nedeniyle difüzyonun azalmasından ve dolayısıyla tane büyümesinin engellenmesinden kaynaklanmış olabilir.

Stronsiyum katkısı içeren EN AC 44100-10Zn esaslı alaşımlardaki ötektik silisyum parçacıklarının EN AC 44100-10Zn alaşımında gözlenen iğnemsi yapısını kaybettikleri ve ince, küçük ve küresel forma dönüştükleri gözlenmiştir, Şekil 15. Ötektik silisyum fazında gözlenen bu dönüşüm literatürde stronsiyum ilavesinin ötektik dönüşüm boyunca açığa çıkan ısıyı artırmasına ve ötektik dönüşüm sıcaklığını düşürmesine, ötektik noktayı daha yüksek silisyum oranına kaydırmasına ve bunun sonucunda da çekirdek büyümesinin daha düşük sıcaklıkta başlamasına dayandırılarak açıklanmıştır (Dahle vd., 2005; Farahany vd., 2014; Knuutinen vd., t.y.; Liao vd., 2002; Nogita vd., t.y.; C. Xu vd., 2015). Çekirdekleşme sıcaklığının düşmesi ötektik silisyum çekirdeklerinin etrafındaki katılaşmanın ve büyümenin engellenmesine, buna bağlı olarak da söz konusu silisyum parçacıkları daha küçük ve nispeten küresel yapıda kalmasına yol açar.

Artan stronsiyum oranı ile α fazı belirgin bir dentritik formda büyümüştür. Bunun stronsiyum ilavesi nedeniyle ötektik noktanın kaymasından bir başka deyişle ötektik noktadan uzaklaşılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira literatürde stronsiyum ilavesinin Al-Si alaşımlarında ötektik noktayı kaydırdığına dair birçok çalışma bulunmaktadır (Dahle vd., 2005; Nogita vd., t.y.; Vasudevan vd., 2023). Ancak %0,1Sr oranından sonra α fazının dentritik yapısı bozulmaya başlamıştır, Şekil 19. Alaşımın dentritik yapısının bozulması stronsiyum ilavesi nedeniyle soğuma hızının artmasından, bir başka deyişle çekirdeklerin büyüme aşamasında gerekli difüzyon için zaman olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Stronsiyum katkısı %0,04 olduğunda EN AC 44100-10Zn alaşımının içyapısında Sr-Al-Si-Zn fazı oluşmuştur, Şekil 16. Bu fazın %0,02Sr oranında oluşmayıp, %0,04 oranında oluşmaya başlaması diğer fazlar içerisinde çözünemeyen fazlalık stronsiyumun Al, Si ve Zn ile tepkimeye girmesi sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Artan stronsiyum oranı ile bu fazın büyümesinin bileşik oluşturmak için gerekli stronsiyum oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Stronsiyum oranı %0,1'i aştığında ise söz konusu fazın boyutları küçülmüştür (Şekil 19 ve 20). Bu durum %0,1 Sr oranından sonra soğuma hızının daha fazla artmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan stronsiyum oranı %0,08 ve 0,1 olduğunda bir başka deyişle EN AC 44100-10Zn-0,08Sr ve EN AC 44100-10Zn-0,1Sr alaşımlarında Al-Sr-Si fazının oluştuğu görülmüştür, Şekil (18-19)

İçyapı incelemelerinde gözlenen Al-Zn-Fe-Si fazı EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımında en büyük boyutlara ulaşmıştır, Şekil 20. Bu durum kararsız veya yarı kararlı olduğu düşünülen söz konusu fazın % 0,12 stronsiyum oranında soğuma hızının daha yüksek olması nedeniyle daha az dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir.

EN AC 44100-10Zn-(0,02Sr-0,1)Sr alaşımlarında α fazı ile ötektik Al-Si faz bölgelerinin kendi içlerinde büyüdüğü ve homojen dağılımlarının EN AC 44100-10Zn alaşımına göre azaldığı gözlenmiştir, Şekil 15-19. Bu durumun stronsiyum ilavelerinin ötektik noktayı daha yüksek silisyum oranına kaydırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yukarıda da söylendiği üzere stronsiyum ilavelerinin ikili Al-Si alaşım sisteminde gözlenen ötektik noktayı daha yüksek silisyum oranına kaydırdığı literatürde (Al-Helal vd., 2012; Ludwig vd., 2014; C. L. Xu vd., 2006) ortaya konulmaktadır. Ötektik noktanın daha yüksek silisyum oranına kayması kaldıraç

kuralına (D. Li vd., 2016; Vandersluis vd., 2018; Y. Yang vd., 2015) göre α fazının oranının hacimsel oranının artması ve/veya büyümesine yol açmaktadır. Stronsiyum oranı %0,1 değerini aştığında α dendritleri parçalanmış, bir başka deyişle tane boyutları küçülmüş ve ötektik Al-Si faz bölgeleri ile tekrar homojen dağılım sergilemeye başladığı gözlenmiştir, Şekil 20-21. Alüminyumca zengin α dendritlerinin parçalanması söz konusu stronsiyum oranlarında soğuma hızının artması nedeniyle çekirdeklenmenin artması ve tane büyümesinin sınırlanmasından kaynaklanmış olabilir. Çekirdeklenme oranının artması ve tane büyümesinin sınırlanması homojen bir içyapının oluşmasına yol açmış olabilir.

X-ışını difraksiyonu çalışmaları α-Al fazının 38°, 45°, 65°, 78° ve 83°, silisyum fazının 28°, 47°, 56°, 69°, 76° ve 88°, Al-Fe-Si (β) ve Al-Fe-Si-Zn fazlarının 45° ve 47°, Al-Zn-Fe-Si fazının 65°,78° ve 83°, Sr-Al-Si fazının 45°, 69° ve 33° ve Al-Sr-Si fazının 34° ve 44°'lik 2θ açılarında pik yaptığını göstermiştir, Şekil 13-21 Al-Fe-Si (β) ve Al-Fe-Si-Zn fazlarının aynı Bragg açılarında pik yapması bu fazlara ait kafes parametrelerinin aynı olmasından kaynaklanmış olabilir. Stronsiyum içeren fazların %0,04 oranından sonra oluşmaya başladığı gözlendi, Şekil 16. Bu durum daha düşük oranlardaki stronsiyumun içyapıdaki diğer fazlar içerisinde çözünmesinden kaynaklanmış olabilir.

EN AC 44100 alaşımına ilave edilen %10 oranındaki çinkonun söz konusu alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımı ciddi ölçüde artırdığı, kopma uzamasını ise azalttığı görüldü, Şekil 13. Söz konusu ticari alaşıma yapılan %10 çinko katkısının alaşımın sertlik, dayanım ve süneklik değerlerinde yol açtığı değişim yapısal değişikliklere ve soğuma koşullarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çinko ilavesi ile alaşımın içyapısında bulunan alüminyumca zengin fazlar içerisinde çinkonun çözündüğü görülmektedir. Bu durumun katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının oluşumuna yol açtığı düşünülmektedir. Bilindi üzere; katı çözeltilerde çözünen elementlerin atomları çözen elementlerin atomlarından farklı kayma modülüne ve boyutlara sahip olduklarından, çevreleyen matrisin kafesine ek gerilme alanları uygularlar. Bu gerilme alanları, ana kafes boyunca dislokasyonların hareketini kısıtlama etkisine sahiptir. Bu nedenle, içyapıda söz konusu gerilme alanlarının üstesinden gelebilmek bir başka deyişle dislokasyonları harekete geçirebilmek için ek gerilmeler uygulanmalıdır. Dislokasyonların harekete geçmesini

sağlamak için gerekli bu ek gerilmeler malzemenin mukavemet değerlerinde katı çözelti oluşumu sonrasında ortaya çıkan sertleşme olarak bilinir (Mechanical properties of engineered materials; Author:W. O. Soboyejo; Print Book, English, ©2003; Edition:View all formats and editions; Publisher:Marcel Dekker, New York, ©2003). Çinko ilavesinin EN AC 44100 alaşımının mukavemetinde neden olduğu artışın bir başka nedeninin ise içyapının daha ince taneli ve homojen dağılım sergilemesinin olduğu düşünülmektedir. Bilindiği üzere çok kristalli malzemelerde tane boyutu ile mukavemet arasındaki ilişki Hall-Petch bağıntısı ile ifade edilmektedir (Temel SAVAŞKAN, Malzeme Bilimi ve Muayenesi, Papatya Yayınevi). Bu bağıntı $\sigma_a=\sigma_0+kd^{-1/2}$ şeklinde olup, burada σ_a malzemenin akma mukavemeti, σ_0 tek bir tanenin akma mukavemeti, k malzeme sabiti ve d ortalama tane boyutudur. Bu bağıntıya göre tane boyutu azaldıkça malzeme mukavemetinin artması beklenir. Dolayısıyla çinko ilavesi sonucunda içyapıdaki tane incelmesinin mukavemet artışına katkı sağladığı beklenen bir durumdur. Ayrıca tane incelmesi sonucunda iç yapıda tane sayısının dolayısıyla tane sınırı sayısının artması da mukavemet artışına katkı sağlamış olabilir. Çünkü tane sınırları atomların dizilişleri açısından düzensiz bölgeler oldukları için dislokasyonların ilerleyişinin önünde engel oluşturmaktadır. Bu engeller dislokasyonların hareketini zorlaştırdığı için mukavemet artışına yol açmaktadır (Alemdağ & Beder, 2014; Haciosmanoglu vd., 2023; Hekimoglu vd., 2020; Labisz vd., 2016). Dolayısıyla çinko ilavesiyle tane sınırı sayılarının artmasının bir başka deyişle dislokasyonların önündeki engellerin artmasının EN AC 44100 alaşımında mukavemet artışına yol açtığı düşünülmektedir. Çinko ilavesi ile EN AC 44100 alaşımının mukavemetine meydana gelen artışa dispersiyon sertleşmesi mekanizması (Beroual vd., 2019; Dai vd., 2012; Farahany vd., 2014) ile hem α-Al fazının küçülüp daha sıkı dizilmesinin hem de ötektik silisyum parçacıklarının ince uzun iğne şekilli yapıdan küçük küresel forma dönüşerek daha sıkı dizilmesinin de katkı sağladığı düşünülmektedir. Belirtilen fazlara ait tanelerin içyapıda veya matris içerisinde dağılmasının dislokasyon hareketlerini engellemesi bu mekanizma ile mukavemet artışının esasını oluşturmaktadır. Uygulanan gerilme sayesinde partiküller/taneler arasına kadar ilerleyen dislokasyonlar partiküllerin arasında sıkışmaktadır ve gerilme yığılması meydana gelmektedir(Liao vd., 2014; Patel & Prajapati, 2012; Samuel vd., 2014). Dolayısıyla dislokasyonların ilerlemesi için uygulanan kuvvetin/gerilmenin

artırılması gerekir. Dislokasyonların söz konusu engelleri aşabilmesi için malzemeye τ_a=(2Gb/L) değerinde bir gerilme uygulanması gerekir (Y. Chen vd., 2014; Feaugas & Haddou, 2007; Radhika vd., t.y.). Bu bağıntıda G kayma modülü, b Burgers vektörü ve L partiküller arası mesafe olup, partiküllerin birbirine yaklaşmasının bir başka deyişle daha sıkı dizilmesinin L değerini küçülteceği için mukavemette artışa yol açacağı açıktır. Dolayısıyla çinko ilavesi sonucunda içyapıdaki özellikle α-Al ve ötektik silisyum parçacıklarının daha sıkı dizilmelerinin dispersiyon sertleşmesi mekanizmasını da harekete geçirerek mukavemet artışına katkı sağladığı rahatlıkla düşünülebilir.

EN AC 44100-10Zn-Sr alaşımlarında sertlik, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerleri stronsiyum ilavesiyle %0,1 stronsiyum oranına kadar azaldı, % 0,12 oranında önemli bir artış, % 0,14 oranında ise % 0,12 stronsiyum oranına göre azda olsa bir düşüş sergiledi, Şekil 21. EN AC 44100-10Zn alaşımına stronsiyum ilavesiyle gözlenen azalma % 0,1 stronsiyum oranına kadar içyapıdaki fazların homojen dağılımlarının bozulmasından ve alaşımın içyapısında oluşan intermetalik fazların neden olduğu çentik ve gevreklik etkisinden kaynaklanmış olabilir. EN AC 44100-10Zn-0,12Sr alaşımında gözlenen maksimum mukavemetin sebebi ise bu oranda yapının tekrar homojen dağılım sergilemesi, ince uzun iğne şekilli Al-Si-Sr fazının kısalarak/küçülerek ince taneli bir morfoloji sergilemesinden ve Al-Zn-Fe-Si fazındaki morfoloji değişiminden kaynaklanmış olabilir. Al-Zn-Fe-Si fazının boyutlarında bu oranda meydana gelen artış yapıda distorsiyona neden olarak mukavemetin artmasına katkı yapmış olabilir. Stronsiyum oranı %0,12'yi aştığında sertlik ve mukavemet değerlerinde az da olsa meydana gelen düşüş yapıdaki homojen dağılımın az da olsa bozulması, demir içeren intermetalik fazların büyümeleri ve içyapıdaki oranlarının artması ve Al-Fe-Si-Zn-Sr fazının iskelet formuna dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir. İncelenen alaşımların kopma uzamalarının özellikle %0,1 stronsiyum oranından artması sertlik ve mukavemet değerlerinin artması nedeniyle alaşımların gevrekleşmesinden kaynaklanmış olabilir.

İncelenen alaşımların çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri kırılma yüzeylerinin ağırlıklı olarak klivaj düzlemlerinden ve yarıklardan oluştuğunu, stronsiyum oranı arttıkça klivaj düzlemlerinin boyutlarının küçülüp sayılarının arttığını ve kopma sırtlarının da yüzeylerde yer almaya başladığını

göstermiştir, Şekil 23-27. Klivaj düzlemlerinin ağırlıklı olması incelenen alaşımların sünekliklerinin düşük bir başka deyişle gevrek karakteristikli malzeme olduklarının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Alaşımlarda gevrek kırılmaların genellikle klivaj düzlemlerinden başladığı literatürden de bilinmektedir (Alemdağ & Beder, 2014; Barbosa vd., 2014; Ebhota & Jen, 2018; Feaugas & Haddou, 2007; Mao, Yan, vd., 2015). Klivaj kırılma malzemenin içinde yer alan kristal yapıda yer alan atomların düzenli sıralanması nedeniyle ortaya çıkar. Klivaj kırılma malzeme içinde bir mikro çatlak oluşmasıyla başlar. Kuvvet uygulandığında çatlak boyunca gerilme devam eder ve daha sonra kırılma gerçekleşir. Genellikle kırılan yüzeyler düz ve düzensiz yapıdadır ayrıca kristal yapıdaki atomların dizilimine bağlı olarak düzlemler boyunca meydana gelir.

İncelenen alaşımların tümünün sürtünme katsayısı değerleri deneylerin başlangıcında hızlı bir artış göstermiş, kayma mesafesi arttıkça söz konusu değerler azalarak belli aralıklarda kararlı değişen seviyelere gelmiştir, Şekil (40-44). Alüminyum esaslı alaşımlarda sürtünme-aşınma deneylerinin başlangıç aşamalarında gözlenen yüksek sürtünme katsayılarının rodaj aşaması etkisinden kaynaklandığı bilinmektedir (Elmadagli vd., 2007; Lim vd., 1997; Walker vd., 2012). Ayrıca metal bilyenin temas alanının ilk başta az olması nedeniyle yüzeyde basınç değerinin yüksek olması metalde ise aşırı deformasyonun meydana gelmesine sebebiyet vermektedir. Aşırı deformasyon altında kaymanın zor olmasından dolayı sürtünme katsayısının ilk başlarda yüksek çıkmasının nedenleri arasında görülmektedir (Bican vd., 2014; Savaşkan & Bican, 2010; Walker vd., 2012). EN AC 44100 alaşımına yapılan %10 çinko ilavesi sürtünme katsayısının düşmesine neden olmuştur. Bu durumun çinkonun kaymayı kolaylaştırıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şöyle ki, çinko sahip olduğu c/a oranı yüksek sıkı düzenli hekzagonal (SDH) kafes yapısı nedeniyle kolay deforme olarak ve ayrıca özellikle kuru sürtünme altında yüzeyler arasında katı yağlayıcı gibi davranış sergileyen çinko oksit tabakası oluşmasına yol açarak kaymayı kolaylaştırmaktadır (Savaşkan & Bican, 2010; F. Wang vd., 2004). EN AC 44100-%10Zn alaşımına %0,1 oranına kadar yapılan stronsiyum ilaveleri alaşımların sürtünme katsayısının az da olsa yükselmesine yol açmıştır, Tablo 8 Bu durum aşınmanın artmasıyla eş çalışan parçalar arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasından kaynaklanmış olabilir. Stronsiyum oranı %0,1'i aştığında sürtünme katsayısının

azalması ise aşınma miktarının dolayısıyla bilye ile numune arasındaki aşınma parçacıklarının azalması nedeniyle sürtünme kuvvetlerinin azalmasından kaynaklanmış olabilir.

EN AC 44100 alaşımında aşınma nedeniyle oluşan hacim kaybı çinko ilavesi ile azalmış, bir başka deyişle çinko ilavesi sonucunda EN AC 44100 alaşımının aşınma direnci artmıştır. Diğer taraftan EN AC 44100-%10Zn alaşımına yapılan %0,12 ve 0,14 stronsiyum ilaveleri söz konusu alaşımın aşınma direncini önemli oranda artırmaktadır. Bu durumun belirtilen oranlardaki çinko ve stronsiyum ilavelerinin alaşımın sertlik ve mukavemetinde yol açtığı artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira literatürde (Closset & Gruzleski, 1982; Dai vd., 2012; Farahany vd., 2014, 2015; Niu vd., 2017), alüminyum esaslı alaşımlarının aşınma dirençlerinin sertlik ve mukavemetleri ile orantılı olduğu yönünde çeşitli çalışmalar mevcuttur.

İncelenen alaşımların aşınma yüzeylerinin ağırlıklı olarak sıvama tabakalarından oluştuğu görülmüştür, Şekil (23-27). Bu tabakaların özellikle sünek alüminyum fazlarının basıncın etkisiyle plastik şekil değişimine uğrayarak yüzeye yapışması sonucu oluştuğu söylenebilir. Çinko oranı arttıkça sıvama tabakalarının kalınlaşması alaşımın mukavemeti değerlerinin artmasından kaynaklanmış olabilir. EDS analizleri incelenen alaşımların aşınma yüzeylerinde oksijen oranının yüksek olduğunu göstermiştir, Tablo 9. Aşınma yüzeylerdeki oksijen oranının deney öncesine göre artmasının deney anında basınç ve sürtünme ısısının etkisiyle oksit oluşumunun kolaylaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İncelenen alaşımların aşınma parçacıkları farklı boyut ve şekiller sergilemiştir, Şekil (45-49). Bunun aşınma esnasında yüzeyden ayrılan parçacıkların bilye ve yüzey arasında sıkışarak gelişi güzel şekilde kırılmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aşınma parçacıklarının kimyasal bileşimlerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan EDS analizlerinde aşınma parçacıklarındaki oksijen oranının aşınma yüzeylerininkinden az da olsa yüksek olduğunu göstermiştir, Tablo 9. Aşınma parçacıklarının oksijen oranındaki bu fazlalık yüzeyden ayrılan parçacıkların deformasyon ve sürtünme ısısının etkisiyle oksitlenmeye devam etmesinden kaynaklanmış olabilir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada indüksiyonlu ocakta ergitme ve kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilen EN AC 44100-10Zn-(0-0,14) Sr alaşımlarının yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri dökülmüş durumda incelenmiştir. Farklı ısıl işlemler uygulanarak söz konusu özelliklere ısıl işlemlerin de etkisi incelenebilir. Ayrıca yapısal incelemeler ve faz dönüşümleri transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak detaylandırılabilir. Çalışmamızda tribolojik deneyler kuru sürtünme durumunda gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler yağlı çalışma koşullarında da gerçekleştirilmek suretiyle söz konusu alaşımların sürtünme ve aşınma özellikleri incelenebilir. Ayrıca sonraki çalışmalarda çinko ve stronsiyum katkılarının EN AC 44100 alaşımının yorulma dayanımına da etkileri incelenebilir.

KAYNAKÇA

Abedi, A., Shahmiri, M., Amir Esgandari, B., & Nami, B. (2013). Microstructural Evolution during Partial Remelting of Al–Si Alloys Containing Different Amounts of Magnesium. *Journal of Materials Science & Technology*, *29*(10), 971-978. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.04.021

Alemdag, Y., Karabiyik, S., Mikhaylovskaya, A. V, Kishchik, M. S., & Purcek, G. (2021). Effect of multi-directional hot forging process on the microstructure and mechanical properties of Al–Si based alloy containing high amount of Zn and Cu. *Materials Science and Engineering: A*, *803*, 140709. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140709

Alemdağ, Y., & Beder, M. (2014). Microstructural, mechanical and tribological properties of Al–7Si–(0–5)Zn alloys. *Materials & Design*, *63*, 159-167. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.006

Alemdağ, Y., Karabiyik, S., & Pürçek, G. (2020). Çok yönlü sıcak dövme işleminin Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.523117

Al-Helal, K., Stone, I. C., & Fan, Z. (2012). Simultaneous primary Si refinement and eutectic modification in hypereutectic Al-Si alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, *65*(6), 663-667. https://doi.org/10.1007/s12666-012-0171-4

Barbosa, J., Puga, H., Oliveira, J., Ribeiro, S., & Prokic, M. (2014). Physical modification of intermetallic phases in AleSieCu alloys. *Materials Chemistry and Physics*, *148*(3), 1163-1170. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.09.041

Barrirero, J., Engstler, M., Ghafoor, N., de Jonge, N., Odén, M., & Mücklich, F. (2014). Comparison of segregations formed in unmodified and Sr-modified Al–Si alloys studied by atom probe tomography and transmission electron microscopy. *Journal of Alloys and Compounds*, *611*, 410-421. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.05.121

Barrirero, J., Li, J., Engstler, M., Ghafoor, N., Schumacher, P., Odén, M., & Mücklich, F. (2016). Cluster formation at the Si/liquid interface in Sr and Na modified Al–Si alloys. *Scripta Materialia*, *117*, 16-19. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.02.018

Bayça, S. U., Bican, O., Yamanel, B., Hekimoğlu, A. P., & Çalış, M. (2020). The Effect of Solid Boriding Time on the Structure, Hardness and Corrosion Properties of AISI 5140 Steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, *56*(3), 591-597. https://doi.org/10.1134/S2070205120030065

Bayraktar, & Hekimoğlu, A. P. (2023). Performance evaluation of different carbide inserts in turning of newly developed Al-12Si-0.1Sr alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *54*(1), 120-128. https://doi.org/10.1002/mawe.202200148

Beder, M., & Alemdag, Y. (2021). Influence of Mg addition and T6 heat treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of Al–12Si–3Cu based alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *31*(8), 2208-2219. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65649-2

Beroual, S., Boumerzoug, Z., Paillard, P., & Borjon-Piron, Y. (2019). Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, *784*, 1026-1035. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.365

Bican, O., of, T. S.-P. of the I., & 2014, undefined. (2014). A comparative study of lubricated friction and wear behaviour of Al–25Zn–3Cu–3Si bearing alloy. *journals.sagepub.com*, *228*(8), 896-903. https://doi.org/10.1177/1350650114537473

Bolzoni, L., Nowak, M., & Hari Babu, N. (2015). Grain refinement of Al-Si alloys by Nb-B inoculation. Part II: Application to commercial alloys. *Materials and Design*, *66*(PA), 376-383. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.067

Cáceres, C. H., Djurdjevic, M. B., Stockwell, T. J., & Sokolowski, J. H. (1999). *THE EFFECT OF Cu CONTENT ON THE LEVEL OF MICROPOROSITY IN Al-Si-Cu-Mg CASTING ALLOYS*.

Cai, Q., Mendis, C. L., Chang, I. T. H., & Fan, Z. (2020). Effect of short T6 heat treatment on the microstructure and the mechanical properties of newly developed die-cast Al–Si–Mg–Mn alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *788*. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139610

Casari, D., Ludwig, T. H., Merlin, M., Arnberg, L., & Garagnani, G. L. (2014). The effect of Ni and V trace elements on the mechanical properties of A356 aluminium foundry alloy in as-cast and T6 heat treated conditions. *Materials Science and Engineering A*, *610*, 414-426. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.059

Chen, X. G., & Fortier, M. (2010). TiAlSi intermetallic formation and its impact on the casting processing in Al-Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, *210*(13), 1780-1786. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.009

Chen, Y., Pan, Y., Lu, T., Tao, S., & Wu, J. (2014). Effects of combinative addition of lanthanum and boron on grain refinement of Al–Si casting alloys. *Materials & Design*, *64*, 423-426. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.068

Chen, Z., Hao, X., Wang, Y., & Zhao, K. (2014). In-situ Observation of Tensile Fracture in A357 Casting Alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, *30*(2), 139-145. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.04.014

Closset, B., & Gruzleski, J. E. (1982). Structure and properties of hypoeutectic Al-Si-Mg alloys modified with pure strontium. *Metallurgical Transactions A*, *13*(6), 945-951. https://doi.org/10.1007/BF02643389

Czerwinski, F., Shaha, S. K., Kasprzak, W., Friedman, J., & Chen, D. L. (2016). Aging characteristics of the Al-Si-Cu-Mg cast alloy modified with transition metals Zr, v and Ti. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *117*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/117/1/012031

Çaliş, M., & Hekimoğlu, A. P. (2023). Effect of Strontium Additions on the Microstructural and Mechanical Properties of Al−17Si–4Cu–0.6Mg–3Zn (B390 + 2 wt%Zn) Alloy. *International Journal of Metalcasting*, *17*(1), 143-157. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00755-3

Çevirir, Y., Necip, S., & Yildirim, M. (2018). Isıl İşlem Süresinin Ötektik-Altı Al-Si Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *18*(3), 1036-1042. https://dergipark.org.tr/en/pub/akufemubid/issue/44157/544668

Dahle, A. K., Nogita, K., McDonald, S. D., Dinnis, C., & Lu, L. (2005). Eutectic modification and microstructure development in Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *413-414*, 243-248. https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.055

Dai, W., Xue, S., Lou, J., & Wang, S. (2012). Development of Al-Si-Zn-Sr filler metals for brazing 6061 aluminum alloy. *Materials and Design*, *42*, 395-402. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.031

Dai, W., Xue, S., Sun, B., Lou, J., & Wang, S. (2013). Study on microstructure of 6061 aluminum alloy brazed with Al-Si-Zn filler metals bearing Sr and Ti. *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*, *42*(12), 2442-2446. https://doi.org/10.1016/s1875-5372(14)60035-7

Derin, S., Birol, Y., & Aybarc, U. (2017). Effect of strontium addition on microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy. *International Journal of Metalcasting*, *11*(4), 688-695. https://doi.org/10.1007/s40962-016-0117-4

Dong, X., Youssef, H., Zhang, Y., Yang, H., Wang, S., & Ji, S. (2020). Advanced heat treated die-cast aluminium composites fabricated by TiB2 nanoparticle implantation. *Materials & Design*, *186*, 108372. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108372

Du, X., Zhao, F., Peng, C., Zhu, D., Li, K., Wan, M., Tan, Y., & Yang, R. (2023). Effect of Sr on the microstructure and properties of Al-6.5Si-20Cu-1.5Ni filler

metal for brazing 6063 aluminum alloy. *Welding in the World*. https://doi.org/10.1007/s40194-023-01535-1

Durgutlu, A., Kahraman, N., & Gülenç, B. (2008). Al - Si Alaşımının TİG Kaynağında Darbeli Akımın Mikroyapı, Sertlik, Eğme ve Çekme Dayanımına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, *11*(4), 339-344. https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33033/367247

Ebhota, W. S., & Jen, T.-C. (2018). Intermetallics formation and their effect on mechanical properties of Al-Si-X alloys. *Intermetallic Compounds-Formation and Applications*, 21-41. files/133/58937.html

El Sebaie, O., Samuel, A. M., Samuel, F. H., & Doty, H. W. (2008). The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *486*(1-2), 241-252. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.011

Elmadagli, M., Perry, T., & Alpas, A. T. (2007). A parametric study of the relationship between microstructure and wear resistance of Al-Si alloys. *Wear*, *262*(1-2), 79-92. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.043

Elsebaie, O., Samuel, F. H., & Al kahtani, S. (2013). Intermetallic phases observed in nonmodified and Sr modified Al-SI cast alloys containing mischmetal. *International Journal of Cast Metals Research*, *26*(1), 1-15. https://doi.org/10.1179/1743133612Y.0000000008

Fabrizi, A., & Timelli, G. (2016). The influence of cooling rate and Fe/Cr content on the evolution of Fe-rich compounds in a secondary Al-Si-Cu diecasting alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *117*, 012017. https://doi.org/10.1088/1757-899X/117/1/012017

Farahany, S., Idris, M. H., & Ourdjini, A. (2014). Evaluations of antimony and strontium interaction in an Al-Si-Cu-Zn die cast alloy. *Thermochimica Acta*, *584*, 72-78. https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.04.001

Farahany, S., Idris, M. H., & Ourdjini, A. (2015). Effect of bismuth and strontium interaction on the microstructure development, mechanical properties and fractography of a secondary Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy. *Materials Science and Engineering A*, *621*, 28-38. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.053

Farahany, S., Ourdjini, A., Idrsi, M. H., & Shabestari, S. G. (2013). Evaluation of the effect of Bi, Sb, Sr and cooling condition on eutectic phases in an Al-Si-Cu alloy (ADC12) by in situ thermal analysis. *Thermochimica Acta*, *559*, 59-68. https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.02.024

Fat-Halla, N., Secordel, P., & Suery, M. (1988). Microstructure and mechanical properties of modified and non-modified stir-cast Al-Si hypoeutectic alloys. *Journal of Materials Science*, *23*(7), 2419-2423. https://doi.org/10.1007/BF01111898

Feaugas, X., & Haddou, H. (2007). Effects of grain size on dislocation organization and internal stresses developed under tensile loading in fcc metals. *Philosophical Magazine*, *87*(7), 989-1018. https://doi.org/10.1080/14786430601019441

Ganiev, I. N., Semenova, O. N., & Vakhobov, A. V. (t.y.). *MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYS OF THE AI--Si--Zn--Mg--Ti SYSTEM UNMODIFIED AND MODIFIED WITH STRONTIUM*. 5. files/72/Ganiev vd. - MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYS OF THE AI--Si--Zn-.pdf

Gowri, S., & Samuel, F. H. (t.y.). *Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of AI-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy*.

Guo, B., Chang, L., Dai, J., Ding, Y., Li, R., Ding, J., Li, C., Tang, Y., Xia, X., Chen, X., Song, K., & Liu, Y. (2022). Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Al–9Si–0.4Mg–0.1Cu Alloy. *Advanced Engineering Materials*, *24*(12). https://doi.org/10.1002/adem.202200569

Guo, R., He, J., Li, F., Shi, Q., & Zeng, D. (2023). Effects of Zn Content on the Microstructure and Properties of Al-12.5Si-xZn-2Cu-Mg Alloy. *International Journal of Metalcasting*. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00942-2

Hacıosmanoğlu, M. (2019). *RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ*. 104. files/177/Haciosmanoğlu ve Danişmani - RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ EN.pdf

Hacıosmanoğlu, M., Tellioğlu, M., & Hekimoğlu, A. P. (2023). Effect of Strontium on the Microstructure, Mechanical, and Tribological Properties of the Zn–40Al–2Cu Alloy. *International Journal of Metalcasting*. https://doi.org/10.1007/s40962-023-00985-z

Haciosmanoglu, M., Basyigit, A. B., Hekimoglu, A. P., & Bican, O. (2023). EFFECT of CASE DEPTHS on CORROSION PROPERTIES of HARD ANODIC OXIDIZED A356 ALUMINUM ALLOY. *Surface Review and Letters*, *30*(4). https://doi.org/10.1142/S0218625X23500245

Haghayeghi, R., & Timelli, G. (2021). An investigation on primary Si refinement by Sr and Sb additions in a hypereutectic Al-Si alloy. *Materials Letters*, *283*. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128779

Han, Y., Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2014). Optimizing the tensile properties of Al-Si-Cu-Mg 319-type alloys: Role of solution heat treatment. *Materials and Design*, *58*, 426-438. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.060

Hanna, M. D., & Hellawell, A. (t.y.). *MODIFICATION OF Al-Si MICROSTRUCTURE-THE Al-Si-Sr PHASE DIAGRAM FROM 0-20 WT. % Si AND 0-5.0 WT. % Sr*.

Hao, J., Luo, H., Bian, J., Shi, Y., Yu, B., & Li, Runxia. (2022). The effect of squeeze

casting process on the microstructure, mechanical properties and wear properties of hypereutectic Al–Si–Cu–Mg alloy. *International Journal of Metalcasting*, *16*(1), 153-165. https://doi.org/10.1007/s40962-021-00575-x

Hekimoglu, A. P., Haciosmanoglu, M., & Baki, M. (2020). Effect of zinc contents 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), 1799-1814. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.602161

Hekimoğlu, A., of, T. S.-T. J., & 2016, undefined. (t.y.). Üçlü Zn-15Al-(1-5) Cu Alaşımlarının Yağlanmış Sürtünme ve Aşınma Özellikleri. *scienceliterature.com*. Geliş tarihi 05 Mart 2023, gönderen http://scienceliterature.com/index.php/TJOEE/article/view/22

Hekimoğlu, A. P., & Bayraktar, Ş. (2022). Experimental research on machinability characteristics of Al-9Si alloy: Effect of Sr and Mg additives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *236*(13), 1807-1816. https://doi.org/10.1177/09544054221092916

Hekimoğlu, A. P., Çalış, M., & Ayata, G. (2019). Effect of Strontium and Magnesium Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Al–12Si Alloys. *Metals and Materials International*, *25*(6), 1488-1499. https://doi.org/10.1007/s12540-019-00429-6

Hekimoğlu, A. P., Haciosmanoğlu, M., & Baki, M. (2020). Farklı oranlardaki çinko katkılarının AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.602161

Huang, Z., Yan, H., & Wang, Z. (2018). Microstructure and mechanical properties of strontium-modified ADC12 alloy processed by heat treatment. *Journal of Central South University*, *25*(6), 1263-1273. files/156/Huang vd. - 2018 - Microstructure and mechanical properties of stront.pdf

Ibrahim, M. F., Samuel, A. M., & Samuel, F. H. (2014). A preliminary study on optimizing the heat treatment of high strength Al-Cu-Mg-Zn alloys. *Materials and Design*, *57*, 342-350. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.078

Jeon, J. H., Shin, J. H., & Bae, D. H. (2019). Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *748*, 367-370. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.119

Jiang, Q. C., Xu, C. L., Lu, M., & Wang, H. Y. (2005). Effect of new Al-P-Ti-TiC-Y modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys. *Materials Letters*, *59*(6), 624-628. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.10.042

Jung, J.-G., Lee, S.-H., Lee, J.-M., Cho, Y.-H., Kim, S.-H., & Yoon, W.-H. (2016). Improved mechanical properties of near-eutectic Al-Si piston alloy through ultrasonic melt treatment. *Materials Science and Engineering: A*, *669*, 187-195. https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.087

Kasprzak, W., Sahoo, M., Sokolowski, J., Yamagata, H., & Kurita, H. (2009). The Effect of the Melt Temperature and the Cooling Rate on the Microstructure of the Al-20% Si Alloy Used for Monolithic Engine Blocks. *International Journal of Metalcasting*, *3*(3), 55-71. https://doi.org/10.1007/BF03355453

Knuutinen, A., Nogita, K., Mcdonald, S. D., & Dahle, A. K. (t.y.). *Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb*. www.elsevier.com/locate/lightmetals

L Murray, by J., Kahan, D. J., & L Murray, B. J. (1971). Superconducting Transition Temperatures of Amorphous Binary Alloy Systems Based on Bi, Pb, Ga and Be. Içinde *Bull. Alloy Phase Diagrams* (C. 45, Sayı 8).

Labisz, K., Krupiński, M., Pawlyta, M., Matus, K., Kremzer, M., & Dopierała, K. (2016). High Resolution TEM Investigations and TDA Analysis of Zinc Alloy with Strontium Addition. *Acta Physica Polonica A*, *130*(4), 823-826. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.823

Li, D., Cui, C., Wang, X., Wang, Q., Chen, C., & Liu, S. (2016). Microstructure evolution and enhanced mechanical properties of eutectic Al–Si die cast alloy by combined alloying Mg and La. *Materials & Design*, *90*, 820-828. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.078

Li, Z., & Yan, H. (2015). Modification of primary α-Al, eutectic silicon and β-Al5FeSi phases in as-cast AlSi10Cu3 alloys with (La+Yb) addition. *Journal of Rare Earths*, *33*(9), 995-1003. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60517-2

Liao, H., Huang, W., Wang, Q., & Jia, F. (2014). Effects of Strontium, Magnesium Addition, Temperature Gradient, and Growth Velocity on Al–Si Eutectic Growth in a Unidirectionally-solidified Al–13 wt% Si Alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, *30*(2), 146-153. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.05.003

Liao, H., Sun, Y., & Sun, G. (2002). Correlation between mechanical properties and amount of dendritic a-Al phase in as-cast near-eutectic Al-11.6% Si alloys modified with strontium. Içinde *Materials Science and Engineering* (C. 335). www.elsevier.com/locate/msea

Lim, S. C., Gupta, M., Leng, Y. F., & Lavernia, E. J. (1997). Wear of a spray-deposited hypereutectic aluminium-silicon alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, *63*(1-3), 865-870. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02740-9

Ludwig, T. H., Schonhovd Dæhlen, E., Schaffer, P. L., & Arnberg, L. (2014). The effect of Ca and P interaction on the Al–Si eutectic in a hypoeutectic Al–Si

alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *586*, 180-190. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.127

Mao, F., Chen, F., Yan, G., Wang, T., & Cao, Z. (2015). Effect of strontium addition on silicon phase and mechanical properties of Zn–27Al–3Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, *622*, 871-879. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.013

Mao, F., Yan, G., Xuan, Z., Cao, Z., & Wang, T. (2015). Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, *650*, 896-906. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.266

Mathew, J., & Srirangam, P. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Mn–Sr Modified Iron Containing Al–Si Alloys. Içinde *Light Metals 2022* (ss. 135-141). Springer. files/137/978-3-030-92529-1_18.html

Moustafa, M. A., Samuel, F. H., & Doty, H. W. (t.y.). *Effect of solution heat treatment and additives on the microstructure of Al-Si (A413.1) automotive alloys*.

Moustafa, M. A., Samuel, F. H., & Doty, H. W. (2003). Effect of solution heat treatment and additives on the hardness, tensile properties and fracture behaviour of Al-Si (A413. 1) automotive alloys. *Journal of materials science*, *38*(22), 4523-4534. files/166/Moustafa vd. - 2003 - Effect of solution heat treatment and additives on.pdf

Muhamed, M. N., Omar, M. Z., Abdullah, S., Sajuri, Z., & Zamri, W. F. H. W. (2020). Al-Si-Zn Behaviouron Interface of AR500 Steel and AA7075 Aluminium Alloy BrazedJoint. *Journal of Physics: Conference Series*, *1532*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1532/1/012006

Niu, Z., Huang, J., Chen, S., & Zhao, X. (2017). Influence of Sr additions on microstructure and properties of Al-Si-Ge-Zn filler metal for brazing 6061 aluminum alloy. *Journal of Materials Research*, *32*(4), 822-830. https://doi.org/10.1557/jmr.2016.467

Nogita, K., Mcdonald, S. D., & Dahle, A. K. (t.y.). *Eutectic Modification of Al-Si Alloys with Rare Earth Metals * 1*.

Özaydın, O., Armakan, E., & Kaya, A. (2018). *The Mechanical Properties of Sr Modification on Aluminium Casting Alloys Numerical and Experimental Modal Analysis of Wheels of Solaris 10 Solar Car and Parametric Design of Lightweight EV Wheel View project Onur Ozaydin The Mechanical Properties of Sr Modification on Aluminium Casting Alloys*. https://www.researchgate.net/publication/327069583

Palenzona, A., & Pani, M. (2004). The phase diagram of the Sr-Si system. *Journal of Alloys and Compounds*, *373*(1-2), 214-219. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.003

Pandee, P., Patakham, U., & Limmaneevichitr, C. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg alloys with erbium additions. *Journal of Alloys and Compounds*, *728*, 844-853. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.054

Paşa, A., Recep, H., Üniversitesi, T. E., Hacıosmanoğlu, M., Tayyip, R., & Üniversitesi, E. (2018). Soğutma Hızının Al-25Zn-3Cu Alaşımının Korozyon Direncine Etkisi. *Researchgate.net*. https://www.researchgate.net/profile/Ali-Hekimoglu/publication/327768444_Effect_of_Cooling_Rate_on_Corrosion_Resistance_of_Al-25Zn-3Cu_Alloy/links/5c17e3f3299bf139c76056f1/Effect-of-Cooling-Rate-on-Corrosion-Resistance-of-Al-25Zn-3Cu-Alloy.pdf

Paşa HEKİMOĞLU, A., & Emre TURAN, Y. (2019). Çinko kaplama Al-(5-50) Zn alaşımlarının farklı ve mekanik özelliklerinin etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen*. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.381050

Paşa Hekimoğlu, A., & Savaşkan, T. (t.y.). Zn-15Al-3Cu-(0, 5-3) Si alaşımlarının çalışma dönemlerindeki ağırlıklarını ve boyutlarını yağlı boya incelemesi. *set-science.com*. Geliş tarihi 05 Mart 2023, gönderen http://www.set-science.com/manage/uploads/ISAS2019-ENS_0042/SETSCI_ISAS2019-ENS_0042_0080.pdf

Patel, V. P., & Prajapati, H. R. (2012). Microstructural and mechanical properties of eutectic Al–Si alloy with grain refined and modified using gravity-die and sand casting. *International Journal of Engineering Research and Applications*, *2*(3), 147-150. files/154/Patel ve Prajapati - 2012 - Microstructural and mechanical properties of eutec.pdf

Provisional, A.-S., Murray, J. L., & Mcaiister, A. J. (t.y.). *The AI-Si (Aluminum-Silicon) System 26.98154 28.0855 Equilibrium Diagram*.

Prukkanon, W., Srisukhumbowornchai, N., & Limmaneevichitr, C. (2009). Modification of hypoeutectic Al-Si alloys with scandium. *Journal of Alloys and Compounds*, *477*(1-2), 454-460. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.10.016

Radhika, N., Sasikumar, & J., & Jojith, & R. (t.y.). *Effect of Grain Modifier on Mechanical and Tribological Properties of Al-Si Alloy and Composite*. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00476-4/Published

Raghukiran, N., & Kumar, R. (2015). Effect of scandium addition on the microstructure, mechanical and wear properties of the spray formed hypereutectic aluminum-silicon alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *641*, 138-147. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.027

Rao, J., Zhang, J., Liu, R., Zheng, J., & Yin, D. (2018). Modification of eutectic Si and the microstructure in an Al-7Si alloy with barium addition. *Materials Science and Engineering: A*, *728*, 72-79. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.010

Samuel, E., Golbahar, B., Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2014). Effect of grain refiner on the tensile and impact properties of Al–Si–Mg cast alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, *56*, 468-479. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.058

Savaskan, T., Hekimoglu, A. P., Azakli, Z., & Calis, M. (2022). Effect of Working Conditions on the Lubricated Wear Behavior of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in the As- Cast and T6 Heat-Treated States. *Journal of Tribology*, *144*(3). https://doi.org/10.1115/1.4051264

Savaşkan, T., & Bican, O. (2010). Dry sliding friction and wear properties of Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si alloys in the as-cast and heat-treated conditions. *Tribology Letters*, *40*(3), 327-336. https://doi.org/10.1007/s11249-010-9667-4

Savaşkan, T., & Hekimoğlu, A. P. (2014). Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys. *Materials Science and Engineering A*, *603*, 52-57. https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.02.047

Savaşkan, T., & Hekimoğlu, A. (2022). As-Cast ve T6 Isıl İşlem Görmüş Durumlarda Zn–40Al–2Cu–2Si Alaşımının Yağlanmış Aşınma Davranışına Çalışma Koşullarının Etkisi. *Journal of*. https://asmedigitalcollection.asme.org/tribology/article-abstract/144/3/031702/1109575

Savaşkan, T., & Tan, H. O. (2014). Fatigue behaviour of Al-25Zn-3Cu alloy. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, *30*(8), 938-943. https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000362

Scepanovic, J., Asanovic, V., Herenda, S., Vuksanovic, D., Radonjic, D., & Korac, F. (2019). Microstructural Characteristics, Mechanical Properties, Fracture Analysis and Corrosion Behavior of Hypereutectic Al–13.5Si Alloy. *International Journal of Metalcasting*, *13*(3), 700-714. https://doi.org/10.1007/s40962-019-00315-2

Shakiba, M., Parson, N., & Chen, X. G. (2014). Effect of homogenization treatment and silicon content on the microstructure and hot workability of dilute Al-Fe-Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, *619*, 180-189. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.072

Shankar, K. V., Balachandran, M., Pillai, B. S., Krishnanunni, S. R., Harikrishnan, N. S., Harinarayanan, A. R., & Kumar, V. S. (2021). Influence of T6 Heat Treatment Analysis on the Tribological Behaviour of Cast Al-12.2Si-0.3 Mg-0.2Sr Alloy Using Response Surface Methodology. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, *7*(3). https://doi.org/10.1007/s40735-021-00531-6

Sharma, R., Kumar, A., & Dwivedi, D. K. (2006). Influence of Solution Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Two Cast Al–Si Alloys. *Materials and Manufacturing Processes*, *21*(3), 309-314. https://doi.org/10.1080/10426910500464784

Shehata, M. M., El-Hadad, S., Moussa, M. E., & El-Shennawy, M. (2021). Optimizing the Pouring Temperature for Semisolid Casting of a Hypereutectic Al–Si Alloy Using the Cooling Slope Plate Method. *International Journal of Metalcasting*, *15*(2), 488-499. https://doi.org/10.1007/s40962-020-00465-8

Shi, W., Gao, B., Tu, G., Li, S., Hao, Y., & Yu, F. (2010). Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15Si alloy. *Journal of Rare Earths*, *28*(SUPPL. 1), 367-370. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60363-8

Suresh, N., Venkateswaran, S., & Seetharamu, S. (2010). Influence of cenospheres of fly ash on the mechanical properties and wear of permanent moulded eutectic Al-Si alloys. Içinde *Materials Science-Poland* (C. 28, Sayı 1).

Taylor, J. A. (2012). Iron-Containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys. *Procedia Materials Science*, *1*, 19-33. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.004

Tebib, M., Samuel, A. M., Ajersch, F., & Chen, X.-G. (2014). Effect of P and Sr additions on the microstructure of hypereutectic Al–15Si–14Mg–4Cu alloy. *Materials Characterization*, *89*, 112-123. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.01.005

Vandersluis, E., Sediako, D., Ravindran, C., Elsayed, A., & Byczynski, G. (2018). Analysis of eutectic silicon modification during solidification of Al-6Si using in-situ neutron diffraction. *Journal of Alloys and Compounds*, *736*, 172-180. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.118

Vasudevan, G., Anbukkarasi, R., Sanil, H., & Ravi, M. (2023). Combined effect of Sr-addition and pressure induced solidification on eutectic-Si morphology and mechanical properties of squeeze cast Al-Si binary alloy. *Materials Today Communications*, *34*. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105104

Vijeesh, V., & Prabhu, K. N. (2014). Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties. Içinde *Transactions of the Indian Institute of Metals* (C. 67, Sayı 1, ss. 1-18). https://doi.org/10.1007/s12666-013-0327-x

Vijeesh, V., Ravi, M., & Narayan Prabhu, K. (2013). The effect of the addition of strontium and cerium modifiers on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si (LM30) alloy. *Materials Performance and Characterization*, *2*(1), 296-307. https://doi.org/10.1520/MPC20120007

Walker, J. C., Kamps, T. J., & Wood, R. J. K. (2012). The influence of start-stop transient velocity on the friction and wear behaviour of a hyper-eutectic Al-Si automotive alloy. *Wear*, *306*(1-2), 209-218. https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.007

Wang, C., Jin, Z., & Du, Y. (2003). Thermodynamic modeling of the Al-Sr system.

Journal of Alloys and Compounds, *358*(1-2), 288-293. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00046-X

Wang, F., Liu, H., Ma, Y., & Jin, Y. (2004). Effect of Si content on the dry sliding wear properties of spray-deposited Al-Si alloy. *Materials and Design*, *25*(2), 163-166. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.08.005

Wang, G., Ma, R., Wan, M., & Zhao, F. (2022). The Effect of Sr composition on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Zn filler for the brazing of AA6061. *Materials Research Express*, *9*(2), 026529. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac5776

Wu, Y., Liao, H., Zhou, K., & Yang, J. (2014). Effect of texture evolution on mechanical properties of near eutectic Al–Si–Mg alloy with minor addition of Zr/V during hot extrusion. *Materials & Design*, *57*, 416-420. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.068

Xavier, M. G. C., Souza, T. M. G., Cheung, N., Garcia, A., & Spinelli, J. E. (t.y.). *Effects of cobalt and solidification cooling rate on intermetallic phases and tensile properties of a -Cu, -Zn, -Fe containing Al-Si alloy*. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05077-4/Published

Xu, C. L., Jiang, Q. C., Yang, Y. F., Wang, H. Y., & Wang, J. G. (2006). Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy. Içinde *Journal of Alloys and Compounds* (C. 422, Sayı 1-2). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.03.128

Xu, C., Xiao, W., Zheng, R., Hanada, S., Yamagata, H., & Ma, C. (2015). The synergic effects of Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloy. *Materials & Design*, *88*, 485-492. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.045

Yang, C., Cao, L., Gao, Y., Cheng, P., Zhang, P., Kuang, J., Zhang, J., Liu, G., & Sun, J. (2020). Nanostructural Sc-based hierarchy to improve the creep resistance of Al–Cu alloys. *Materials & Design*, *186*, 108309. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108309

Yang, H., Ji, S., & Fan, Z. (2015). Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–Si–Cu alloys. *Materials & Design*, *85*, 823-832. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.074

Yang, Y., Zhong, S. Y., Chen, Z., Wang, M., Ma, N., & Wang, H. (2015). Effect of Cr content and heat-treatment on the high temperature strength of eutectic Al-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, *647*, 63-69. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.167

Zhang, L. K., & Zhang, B. R. (2020). Effects of Zn on Microstructure Modification and Mechanical Properties Improvement of Al-Si-Cu-Mg Alloys.

Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, *51*(8), 4158-4167. https://doi.org/10.1007/s11661-020-05827-9

Zhu, J., Luo, Z., Wu, S., & Yan, H. (2018). The effect of Sr on the microstructure and wear properties of AlSi5Cu1Mg alloy. *Advances in Mechanical Engineering*, *10*(12). https://doi.org/10.1177/1687814018819536