



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



İkincil A356 alüminyum alaşımlarına düşük miktarlarda eklenen lantan, titanyum ve zirkonyum elementlerinin mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi

Effect of lanthanum, titanium and zirconium elements added in low amounts to secondary a356 aluminum alloys on microstructure, mechanical and corrosion properties

Yazar(lar) (Author(s)): Simge GENÇALP İRİZALP ¹, Hande KARAOĞLU², Burçak Kardelen KÖROĞLU³

ORCID¹: 0000-0002-0339-5699

ORCID²: 0009-0008-0272-6012

ORCID³: 0000-0003-0200-8252

To cite to this article: Gençalp Irizalp S., Karaoğlu H. and Köroğlu B.K., “İkincil A356 Alüminyum Alaşımlarına Düşük Miktarlarda Eklenen Lantan, Titanyum Ve Zirkonyum Elementlerinin Mikroyapı, Mekanik Ve Korozyon Özelliklerine Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 28(6): 1645-1659, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Gençalp Irizalp S., Karaoğlu H. ve Köroğlu B.K., “İkincil A356 Alüminyum Alaşımlarına Düşük Miktarlarda Eklenen Lantan, Titanyum Ve Zirkonyum Elementlerinin Mikroyapı, Mekanik Ve Korozyon Özelliklerine Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 28(6): 1645-1659, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1620331

İkincil A356 Alüminyum Alaşımlarına Düşük Miktarlarda Eklenen Lantan, Titanyum ve Zirkonyum Elementlerinin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisi

Effect of Lanthanum, Titanium and Zirconium Elements Added in Low Amounts to Secondary A356 Aluminum Alloys on Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ İkincil Alüminyum- Secondary aluminum
- ❖ Nadir toprak elementleri- Rare earth elements
- ❖ Korozyon- Corrosion
- ❖ Tane incilmesi- Grain refining
- ❖ Modifikasyon- Modification

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Makale kapsamında ikincil A356 alüminyum alaşımına ilave edilen La, Ti ve Zr elementlerinin etkisi incelenmiştir. Tablo 1 'de numunelerde mikrosertlik ve çekme testi sonuçları verilmiştir.

Tablo.1 A356 alaşımına ilave edilen elementlerle elde edilen çekme deneyi ve mikrosertlik sonuçları

Numuneler	Birincil A356	SAA-A356	%0.05La+0.2Ti	%0.05La+0.1Zr	%0.1La+0.2Ti	%0.1La+0.2Zr	%0.1La	%0.3La
Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	162,576	161,34	170,665	168,336	173,56	171,818	164,42	168,47
% uzama	5,74	5,375	6,395	5,794	5,587	4,698	5,946	5,23
Mikrosertlik (HV)		57,25	58,35	61,15	58,94	60,60	60,51	61,14

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımının geri dönüştürülmesiyle doğal kaynak tüketiminin azaltılması, enerji tasarrufu sağlanması ve karbon ayak izinin düşürülmesi hedeflenmiştir. / In this study, it is aimed to reduce the consumption of natural resources, save energy, and reduce the carbon footprint by recycling the widely used aluminium alloy.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

La, Ti ve Zr elementlerinin A356 alaşımına eklenmesinin mikroyapı, sertlik, çekme dayanımı ve korozyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. / The effects of La, Ti, and Zr elements added to A356 alloy on microstructure, hardness, tensile properties, and corrosion resistance were investigated.

Özgünlük (Originality)

Nadir toprak elementlerinin alaşımlara eklenmesiyle ilgili literatür yetersizdir. Lantanın korozyon direncine etkisi üzerine çok az çalışma yapılmıştır. / The literature on rare earth element addition to alloys is insufficient. Few studies focus on lanthanum's effect on corrosion resistance.

Bulgular (Findings)

La ilavesi ile ötektik faz düşük miktarlarda inceltilmiş ve La'nın ikincil A356 alaşımlarının korozyon özelliklerine negatif etkisi olduğu bulunmuştur. / The addition of La thinned the eutectic phase at low levels, and it was found to negatively affect the corrosion properties of secondary A356 alloys.

Sonuç (Conclusion)

La ilavesi, heterojen kristalleşme çekirdekleri oluşturarak mikroyapıda değişime neden olmuş, mikrosertlik testlerinde ise A356 alaşımının sertliğini artırmıştır. / The addition of La caused heterogeneous crystallization nuclei formation, leading to microstructural changes, and increased the hardness of A356 alloy in microhardness tests.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

İkincil A356 Alüminyum Alaşımlarına Düşük Miktarlarda Eklenen Lantan, Titanyum ve Zirkonyum Elementlerinin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Simge GENÇALP İRİZALP^{1*}, Hande KARAOĞLU², Burçak Kardelen KÖROĞLU³

^{1,2}Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

³CMS Jant ve Makine Sanayii A.Ş., Arge Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 15.01.2025 ; Kabul/Accepted : 26.03.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 05.04.2025)

ÖZ

Son yıllarda nadir toprak elementlerinin döküm sonrası mikroyapılar ve alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine olan etkisi büyük ilgi çekmiştir. Ancak bugüne kadar nadir bulunan toprak elementi olan lantanın (La) mikroalaşım seviyesinde ilavesiyle geri dönüştürülmüş-ikincil A356 alaşımının katılaşması üzerindeki etkisi ve korozyon özelliklerine etkisi hakkında bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada %0,1' in altındaki La ilavesi Ti ve Zr ile birlikte yapılmış, böylece pahalı olan nadir toprak elementinin eser seviyelerde ilavesinin etkileri de raporlanmıştır. Çalışma kapsamında mikroalaşım elementi La, Ti ve Zr' un neden olduğu α -Al tane inceltmesi, ötektik faz modifikasyonu, korozyon performansı ve mekanik özelliklerdeki meydana gelen değişiklikler araştırılmıştır. La ilavesinin düşük seviyelerde bile, ötektik faz için etkili heterojen çekirdeklenme koşullarını bozabileceği ve ötektiği inceltebileceği gösterilmiştir. Ağırlıkça %0,05 La ilavesinin yanında %0,2 Ti eklenmesi ile ideal α -Al tane inceltmesi, ötektik faz modifikasyonu ve alaşımların mekanik özellik iyileşmesinin sağlanması için yeterli olduğu bulunmuştur. Bunun yanında, çalışmadaki La ile mikroalaşımlandırılan tüm ikincil A356 alaşımlarında korozyon özellikleri gerilemiştir. Korozyon daldırma testleri sonucunda, mikroyapılar kaba hücresel yapıdan ince hücresel yapıya dönüşmüş olsalar bile farklı çözünürlükler ve difüzyon özellikleri, alüminyum matriste heterojen bölgeler yaratarak korozyon dayanımını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lantan, tane inceltmesi, ikincil A356, mekanik özellikler, korozyon

Effect of Lanthanum, Titanium and Zirconium Elements Added in Low Amounts to Secondary A356 Aluminum Alloys on Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties

ABSTRACT

In recent years, there has been a lot of interest in the effects of rare earth elements on microstructures and the mechanical properties of aluminum alloys after casting. However, until now, no study has looked at the impact of adding lanthanum(La), a rare earth element, at the micro-alloy level on the solidification of recycled secondary A356 alloy and its corrosion properties. In this study, the addition of La below 0.1 % was made together with Ti and Zr, so that the effects of the addition of trace levels of the expensive rare earth element were also reported. Within the scope of the study, α -Al grain refinement, eutectic phase modification, corrosion performance and changes in mechanical properties caused by microalloying elements La, Ti and Zr were investigated. It has been shown that the addition of La, even at low levels, can disrupt the effective heterogeneous nucleation conditions for the eutectic phase and refine the eutectic. It was found that the addition of 0.05 wt% La and 0.2 wt.% Ti is sufficient to achieve ideal α -Al grain refinement, eutectic phase modification and mechanical property improvement of the alloys. In addition, the corrosion properties of all secondary A356 alloys microalloyed with La in the study were reduced. As a result of corrosion immersion tests, it was concluded that even if the microstructures changed from coarse to fine cellular, different solubilities and diffusion properties created heterogeneous regions in the aluminium matrix, reducing the corrosion resistance.

Keywords: Lanthanum, grain refining, secondary A356, mechanical properties, corrosion

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları günümüzde hafifliği, korozyon dayanımı, iletkenliği, kolay işlenebilirliği ve geri dönüştürülebilir olması gibi üstün özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Döküm sektöründe çok fazla

kullanılan ve bu çalışma kapsamında incelenen Al-Si alaşımı mükemmel mekanik özelliklere, mukavemet-ağırlık oranına ve çoğu ortamda mükemmel korozyon direncine sahiptir; bu olumlu özellikler, bu metal malzemeyi uçak, otomobil ve uzay sektörlerinde

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: bkoroglu@cms.com.tr

kullanım alanlarını arttırmaktadır, bu da Al-Si alaşımlarına talebi her geçen gün arttırmaktadır[1-3]. Alüminyum malzemelerin üretimi gerçekleştirilirken sarf edilen enerji çok fazladır ve bu sebeple günümüzde ikincil alüminyum kullanımı oldukça önemlidir. İkincil alüminyum üretimi, birincil alüminyum üretimine göre %95 daha az enerji gerektirmektedir. Alüminyum geri dönüşümünün avantajları ile birlikte dezavantajları da mevcuttur. İkincil alüminyumun ana dezavantajı geri dönüşüm ve döküm yoluyla malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilen ve çeşitli sorunlara neden olabilen intermetaliklerin ve inklüzyonların oluşumudur[4]. Bu olumsuzlukları giderebilmek için farklı yöntemler mevcuttur. Özellikle geri dönüştürülmüş alüminyumun küçük eklentilerle alaşımlandırılması ve doğrudan mekanik özellik ve mikroyapısal iyileşmeler sağlanarak kullanılabilmesi bu metotlardan bir tanesidir.

Son zamanlarda, alüminyum alaşımlarının nadir toprak elementleri ilavesiyle mikroyapı modifikasyonu yaparak malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan çalışmalar sınırlı sayıda çalışma olmakla birlikte bu alana yönelik ilginin giderek arttığı gözlemlenmektedir. Son yıllarda, özellikle geri dönüştürülmüş alüminyum alaşımlarında nadir toprak elementleri ilaveleri ile mikroyapısal ve mekanik iyileştirmeler sağlanmasına yönelik çalışmalar artış göstermiştir [5-11]. Dolayısıyla, nadir bulunan toprak elementlerinin alüminyum döküm uygulamalarında merak uyandıran ve tercih edilmeye başlayan bir alaşım elementi haline geldiği açıktır [12]. Bunların arasında, Heo vd. [5], Yu vd. [6] La elementinin Al-Si alaşımına tane inceltici etkisini rapor etmiş ve korozyon dayanımına etkisini incelemişlerdir ancak La eklentisinin oranları birbirine benzer ve görece yüksek miktarlarda eklenmiştir. Benzer şekilde, Mahmoud vd. [10], La ve Ce ilavelerinin etkilerini ayrı ayrı araştırmışlar α -Al tane sınırlarını stabilize ederek malzeme mukavemetini artırdığını göstermişlerdir. Ancak, bu elementlerin başka elementlerle kombine etkilerine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır dahası mikroalaşımlamanın kombine etkisinin korozyon davranışı üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır. Farklı çalışmalar, La'nın mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini farklı oranlarda incelemiş, ancak özellikle korozyon davranışı açısından optimum bir miktar belirlenmemiştir. Zheng vd. [13] tarafından yapılan çalışmada Al-6Si alaşımına %0.06 La ilavesi ile ideal bir α -Al tane inceltmesi, ötektik Si modifikasyonu ve alaşımların sünekliliğinin iyileştirilmesi için yeterli olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, Tsai vd. [14] tarafından yapılan çalışmada, A356 alaşımına %0,2-1 oranlarında La ilavesiyle mikroyapı modifikasyonu sağlanabildiği ancak bu etkinin La içeriğine bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Bu çalışma, belirli bir eşik değerini aşan La miktarının tane büyümesine ve intermetalik faz oluşumuna neden olabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, La ve Zr kombinasyonunun çekme dayanımı üzerindeki etkileri üzerine sınırlı sayıda rapor bulunmaktadır [15,16]

La ilavesinin bazı eşik değerleri aştığında olumsuz özellikler yarattığı da raporlanmıştır [5, 12]. Dolayısıyla eklendiği oranların Yu vd. [6] AlSi5Cu1Mg alaşımına farklı oranlarda ekledikleri La' nın ilave miktarı arttıkça mikroyapılarda kaba yapıdan ince taneli bir yapıya dönüşüm gözlemlenmiş ve ağı. %3,5 NaCl çözeltisinde daldırma yöntemiyle gerçekleştirilen korozyon testlerinde %0,6 La ilavesinde en yüksek korozyon direnci elde etmişlerdir. Tsai vd. [14] tarafından A356 alaşımına farklı oranlarda La ilavesi gerçekleştirmiş ve %1 La ilavesi ile %0,01 Sr ilavesi karşılaştırıldığında benzer mikroyapı ve mekanik özellikler ortaya çıkardıkları bulunmuştur. Dolayısıyla geleneksel olarak kullanılan Sr' a bir alternatif olarak sunulmuştur. Ancak bilindiği gibi La pahalı ve nadir bulunan bir elementtir. Bu nedenle, Al-Si alaşımına düşük seviyelerde La ilavesinin potansiyeli araştırılması gereken bir konudur. Ancak, literatürde oranlarla ilgili çelişkili sonuçlar bulunmakta ve bu konuda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır [5-6, 12-13]. Literatürde A356 Al-Si alaşımına La ilavesini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup, bunlardan biri [14] yalnızca belirli yönleri ele almış, ancak korozyon ve mekanik özellikleri birlikte değerlendirmemiştir. Ayrıca, mikroalaşım seviyesindeki La içeriğini alternatif modifikatörlerle karşılaştırmalı olarak ele almamıştır. Oysa daha ucuz ve daha kolay erişilebilir Ti ve Zr ilavesiyle birlikte La'nın araştırılması, hem mekanik hem de korozif süreçler açısından kapsamlı bir değerlendirme sağlayarak çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Öte yandan bu etkiler geri dönüştürülmüş ikincil Al-Si alaşımı üzerinde henüz raporlanmamıştır. Geri dönüştürülmüş alüminyumun iç yapısındaki heterojenlik ve safsızlıkların, bu tür element ilaveleriyle nasıl değişime uğradığına dair kapsamlı bir değerlendirme yapılmamıştır. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş, dolayısıyla Fe içeriği beklenenden yüksek, A356 alaşımında La, Ti ve Zr ilavelerinin mikro yapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, döküm sektöründe yaygın olarak kullanılan A356 alüminyum alaşımının geri dönüştürülmesi sağlanarak, ikincil alaşıma La, Ti ve Zr ilavelerinin etkileri incelenmiştir. Literatürde, La ilavesinin tane inceltme ve intermetalik faz oluşumunu etkileyebileceği [17-21], Ti ve Zr'nin ise tane sınırlarını etkileyerek malzemenin mekanik performansını değiştirebileceği [22-23] belirtilmiştir. Ancak, mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu bu katkıların birincil alüminyum alaşımlarındaki etkilerine odaklanmış olup, geri dönüştürülmüş (ikincil) alaşımlar üzerindeki modifikasyon etkileri yeterince incelenmemiştir. Geri dönüştürülmüş alüminyumun doğası gereği içerdiği yüksek Fe oranı, AlFeSi bazlı intermetalik fazların oluşumunu artırarak mekanik özellikler ve kırılganlık açısından olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, çalışmada Fe kaynaklı intermetalik faz oluşumunun azaltılması ve geri dönüştürülmüş alüminyumun mekanik ve korozyon performansını optimize etmek

amacıyla farklı kombinasyonlarda La, Ti ve Zr ilaveleri değerlendirilmiştir. Böylece enerji tasarrufu sağlanması ve karbon ayak izinin azaltılması hedeflenmiştir. Nadir toprak elementlerinin eklenmesiyle malzemelerin mikroyapısı ve korozyon direncinde iyileşme sağlandığına dair bazı çalışmalar mevcuttur. Ancak, özellikle La'nın korozyon performansına olan etkilerini değerlendiren çok az sayıda çalışma bulunmaktadır ve literatürde La ilavesinin korozyonu kötüleştirdiğine dair bir bulguya rastlanmamıştır. Bu eksikliği gidermek ve konuya yeni bir bakış açısı kazandırmak, çalışmanın motivasyonunu oluşturmıştır. Çalışma kapsamında, A356 alaşımına düşük seviyelerde La, Ti ve Zr ilaveleri yapılmış; bu elementlerin mikroyapı, sertlik, çekme dayanımı, %uzama ve korozyon dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma, La ilavesinin korozyon üzerindeki etkilerini detaylı olarak değerlendiren ve Ti ile Zr'nin tane rafinasyonu üzerindeki etkilerini mikroalaşımlama bağlamında inceleyen öncü çalışmalardan biridir. Literatürde, Zr ve Ti elementlerinin α -Al tanelerini rafine ederek tane büyümesini kontrol altına aldığı ve mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir [24]. Ancak, bu katkıların geri dönüştürülmüş alaşımlardaki spesifik etkileri sınırlı sayıda araştırılmıştır. Bu çalışmada, Zr ve Ti'nin sinerjik etkileri değerlendirilmiş ve nadir toprak elementleri (RE) yerine daha düşük maliyetli, kolay erişilebilir elementlerin kullanımının alaşım performansına etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada incelenen ana malzeme ticari ikincil alüminyum alaşımı (SAA) A356 alaşımıdır. Farklı

kullanılarak eritilmesi, eriyik sıcaklığının 750°C' ye çıkarılması ve gaz giderme işlemi ile başlamıştır. Bu sıcaklık, çalışmanın yürütüldüğü sanayi kuruluşunda standart Al-Si döküm numune üretim sıcaklığı olup, ergiyik viskozitesini optimum seviyede tutarak homojen bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu sıcaklık, ergiyik içinde oksitlenme ve inklüzyon oluşumunu en aza indirerek kontrollü bir döküm süreci sunmaktadır. Ti ve Zr ilavelerinin homojen dağılımını sağlamak amacıyla bu sıcaklık tercih edilmiştir. Daha sonra AILa10 master alaşımı kullanılarak %0,05, %0,1 ve %0,3 oranlarında La; AlTi10 master alaşımı kullanılarak %0,2 oranlarında Ti; AlZr10 master alaşımı kullanılarak %0,1 ve %0,2 oranlarında Zr ilave edilmiştir. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş A356 alaşımına La, Ti ve Zr ilavelerinin mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürde La ilavesinin tane inceltme ve ötektik faz modifikasyonu sağlayabileceği, ancak belirli bir seviyeyi aştığında tane kabalaşması ve intermetalik faz oluşumuna yol açabileceği bildirilmiştir [14]. Ti ve Zr ise α -Al tanelerini rafine etmek için yaygın olarak kullanılan elementler olup, ikincil alüminyum alaşımlarında tane sınırlarını stabilize ederek mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir [25,26]. Ancak, bu elementlerin geri dönüştürülmüş alüminyum silisyum döküm alaşımında birlikte kullanımına yönelik kapsamlı bir çalışmanın bulunmaması, literatürde önemli bir boşluk olarak göze çarpmaktadır. İkincil alüminyumun doğrudan endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini artıracakları öngörülmektedir. Ayrıca, bu tür mikroalaşımlandırma yöntemleri, daha uzun ömürlü ve dayanıklı alüminyum bileşenler üretmek malzeme israfını azaltma ve enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, çalışmada altı farklı bileşim belirlenmiştir: 0,05La+0,2Ti;

Çizelge 1. Birincil A356, İkincil (SAA) A356 ve A356-xLa-xTi-xZr Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (% ağı.)
(Chemical Composition of Primary A356, Secondary (SAA) A356 and A356-xLa-xTi-xZr Aluminium Alloy(wt.%))

Malzemeler	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	La	Ti	Zr
Birincil A356	7.0973	0.2786	0.0968	0.0058	0.0018	0.0032	-	0.1022	0.0024
SAA-A356	7.109	0.222	0.22	0.0234	0.0307	0.045	-	0.0876	0.0014
0.05La+0.2Ti	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.05	0.2	0.001
0.05La+0.1Zr	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.05	0.08	0.1
0.1La+0.2Ti	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.1	0.2	0.001
0.1La+0.2Zr	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.1	0.08	0.2
0.1La	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.1	0.08	0.001
0.3La	7.108	0.221	0.22	0.023	0.03	0.044	0.3	0.08	0.001

miktarlarda mikro alaşım elementleri La, Ti ve Zr içeren bir dizi SAA-A356 alaşımı hazırlanmıştır. Deney sırasında, SAA-A356 alaşımına, mekanik karıştırma ile AILa10, AlZr10 ve AlTi10 master alaşımları eklenerek nadir toprak alüminyum alaşımları hazırlanmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 1' de verilmiştir. Bu tabloda deneylerde kullanılmasa da birincil A356' nın kimyasal bileşim bilgileri de eklenmiştir, böylece bileşimi SAA versiyonla kıyaslanabilmiştir. DeneySEL prosedür, 4000 g ikincil alaşımın bir grafit-kil potada elektrikli direnç fırını

0,05La+0,1Zr; 0,1La+0,2Ti; 0,1La+0,2Zr; 0,1La (sadece La içeren kontrol grubu); 0,3La (yüksek La içeriği ile intermetalik faz oluşumunun incelenmesi amacıyla seçilmiştir). Kontrol grubu olarak katkısız A356 alaşımı da kullanılmış ve La, Ti ve Zr ilavelerinin etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu oranların seçiminde, literatürde La'nın aşırı artışı durumunda intermetalik faz oluşumuna neden olduğu [27] ve bu durumun korozyon direncini olumsuz etkileyebileceği dikkate alınmıştır. Ayrıca, Ti ve Zr'nin tane rafinasyonu üzerindeki etkilerinin daha düşük seviyelerde de

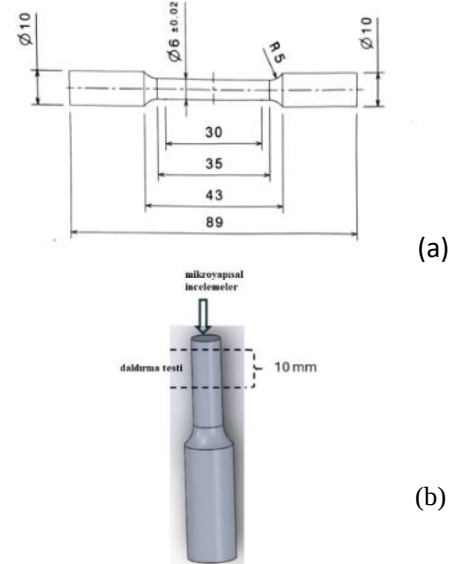
gözlenebildiği bildirilmiştir [15,27]. Eriyik, yaklaşık 10 dakika boyunca 750°C' de tutulmuş ve homojen bir bileşim elde etmek için mekanik karıştırılmıştır. Ardından sıcaklık 700°C' ye düşürülmüş ve eriyik, 350°C' ye önceden ısıtılmış H13 çelik kalıba dökülerek, 15 mm x 15 mm kesitli ve 110 mm uzunluğunda beş çubuk oluşturulmuştur. Katılaşma sırasında ortalama soğuma hızı 1,5 °C/s olarak ölçülmüştür. Test örneklerinin şekil ve boyutları ise Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1 (a)' da gösterildiği gibi, ASTM E8M standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Çekme testleri, Zwick Roell 100kN test cihazında, oda sıcaklığında ve sabit 2 mm/dk uzama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, her parametre için üç numune kullanarak yapılmış olup, sonuçlar bu ölçümlerden elde edilen ortalama değerler olarak sunulmuştur. Metalografik hazırlık için, hassas kesme cihazında kesilen numuneler zımparalanıp parlatıldıktan sonra Keller reaktifi ile dağlanarak hazırlanmıştır. Mikroyapısal incelemeler, Nikon marka Eclipse 150N model optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik ölçümleri, 50gf yük uygulamasıyla Duroscon 20 G5 Vickers sertlik ölçüm cihazı ile her parametre için on tekrar üzerinden gerçekleştirilmiş ve ortalama sertlik değerleri değerlendirilmiştir. Daldırma testi için numuneler, Şekil 1(b)' de gösterilen alanlardan 6 mm x 10 mm boyutlarında kesilmiş ve 400 grit SiC zımpara kağıdı kullanılarak mekanik olarak parlatılmıştır. Numuneler, su banyolu sonikatör cihazında 10 dakika boyunca %95 etanol içinde temizlenmiş ve ardından kurutulmuştur. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş A356 alaşımının korozyon davranışı daldırma tipi korozyon testi ile değerlendirilmiştir. Testler, ASTM G31-72 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standart, genel kullanım için sabit bir laboratuvar korozyon testi prosedürü sunmamakta, ancak korozyon testlerinde karşılaşılabilecek değişkenleri kontrol altına almak için bir rehber niteliği taşımaktadır. Test sürecinde, her numune belirlenen süre boyunca %3,5 NaCl su çözeltisinde sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Korozyon için daldırma testleri, 25°C' de 1 dm³ su, 20 g NaCl ve 0,1 dm³ %25 HCl içeren yoğun klor iyonları bulunan bir çözeltide 4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Daldırma işlemi sonrasında korozyon ürünleri, numunelerin 5 dakika boyunca saf suda temizlenmesiyle uzaklaştırılmıştır. ASTM G31-72'ye göre, farklı metaller ve alaşımlar, korozyon mekanizmaları açısından farklı tepkiler verebileceğinden, korozyon test sonuçlarının doğrudan hızlandırılmış veya tam anlamıyla standartlaştırılmış bir prosedürle belirlenmesi mümkün değildir. Ancak bu test yöntemi, numuneler arasında karşılaştırmalı bir değerlendirmeye sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Daldırma testi tamamlandıktan sonra, numunelerin korozyon oranı kütle kaybı yöntemiyle hesaplanmıştır, eşitlik (1)' göre, W_0 test öncesi numune ağırlığı (gram) ve W ağırlık kaybı (gram)' dır. Numuneler test öncesi hassas bir terazide tartılmış ve belirlenen süre sonunda yüzeydeki korozyon ürünleri

temizlendikten sonra tekrar tartılmıştır. Kütle kaybı değerleri kullanılarak, Eşitlik (2) yardımıyla, korozyon hızı (mm/yıl cinsinden) hesaplanmıştır, W ağırlık kaybı (gram), ρ malzemenin yoğunluğu (g/cm³) (A356 için yaklaşık 2,67g/cm³), A numunenin toplam yüzey alanı (cm²), t test süresi (saat)' dir [28]. Korozyon testleri, her parametre için iki numune üzerinden gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalamaları rapor edilmiştir.

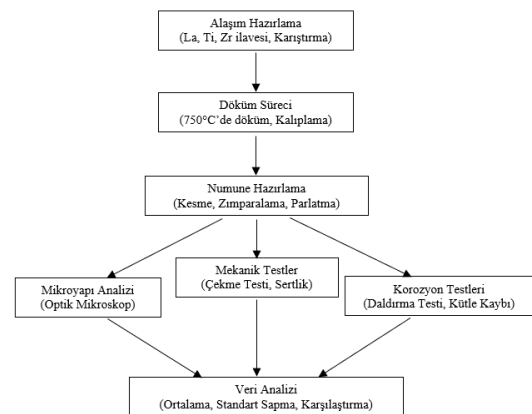
$$W(\text{gram}) = \frac{\% \text{Ağırlık Kaybı}}{100} \times W_0 \quad (1)$$

$$\text{Korozyon hızı} \left(\frac{\text{mm}}{\text{yıl}} \right) = \frac{87,6 \times W}{\rho \times A \times t} \quad (2)$$

Bu yaklaşım, testlerin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla benimsenmiştir. Tüm mekanik testler standart prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmiş, korozyon testleri ise belirlenen çevresel koşullar altında uygulanarak analiz edilmiştir.



Şekil 1. Testler için hazırlanan numunelerin boyutları (a) çekme testi; (b) metalografik inceleme ve korozyon testi (Figure 1. Dimensions of specimens prepared for tests (a) tensile test; (b) metallographic examination and corrosion test)



Şekil 2. Deneysel yöntem şeması (Figure 2. Experimental method diagram)



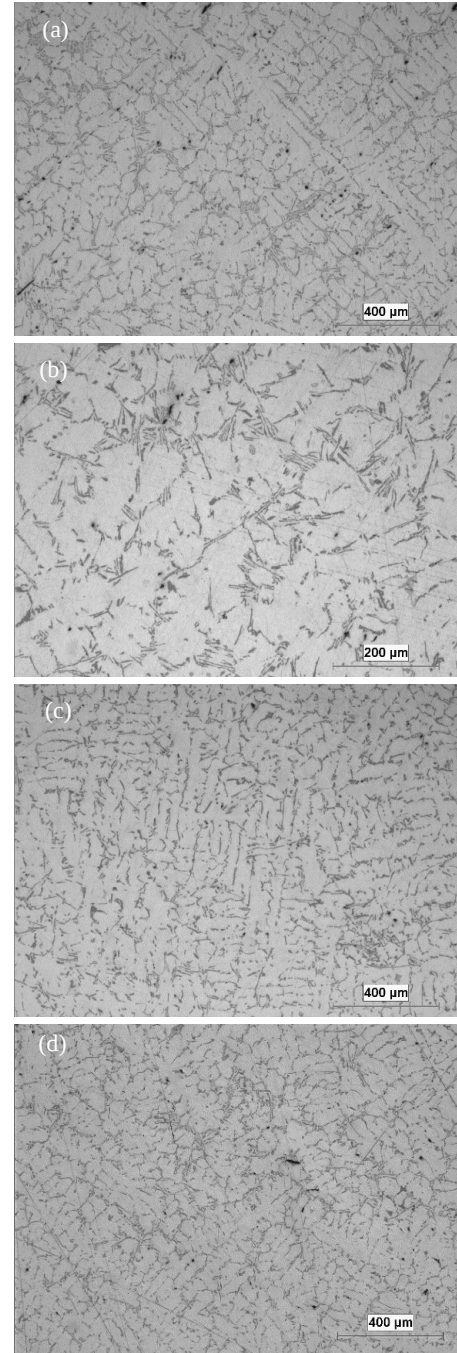
Şekil 3. (a) Kalıp içinde, (b) Kalıp dışında, (b) Talaşlı işlenmiş örnek döküm numuneleri (Figure 3.(a) In the mold, (b) Outside the mold, (c) Machined sample casting specimens)

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

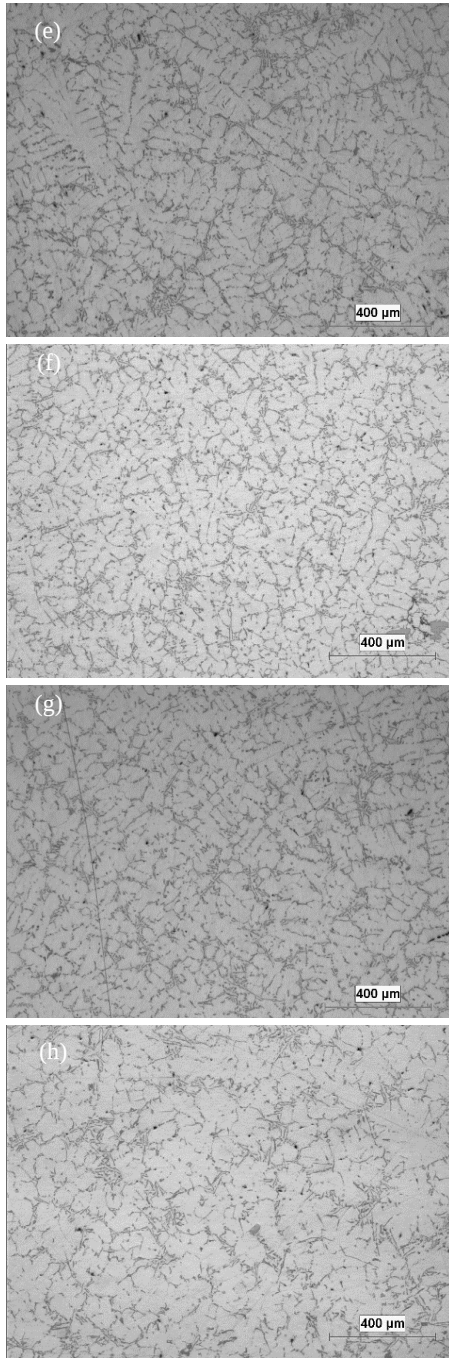
3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Alüminyum alaşımlarına ait mikroyapı görüntüleri Şekil 4' de verilmiştir. SAA-A356 alaşımında α -Al rastgele kaba dendritik bir şekilde dağılmışken, ötektik Si iri ve iğnemsî şekilde dağılmıştır (Şekil 4(a) ve (b)). La eklenmesi yoluyla α -Al' un rafine olma etkisi %0.1 La içeriğine kadar iyileşmiştir, %0,3 La ise rafine etme etkisini azaltmasının ötesinde tane kabalaşması meydana getirdiği, hem Şekil 4(g) ve (h)' de hem de Şekil 5' de verilen büyük büyütme net olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca tane morfolojisini iyileştiren %0.1La oranına ek olarak Zr ve Ti eklenen numuneler incelendiğinde mikroyapısal gözlemlerde tane boyutlarında bir farklılık meydana gelmediği tespit edilmiştir (Şekil 4(d) ve (f)). Bunun yanında, La oranının %0,05' e azalması ile Ti ve Zr ilave edilse bile tane yapısının benzer olduğu gözlemlenmiştir. Al-La faz diyagramında, oda sıcaklığında La' nın alüminyum içindeki çözünürlüğü

oldukça düşüktür, genellikle %0,01-0,05 ağırlık oranı arasında değişir. Orta sıcaklıklarda La' nın alüminyum içindeki çözünürlüğü bir miktar artabilir, ancak hala çok sınırlıdır ve yaklaşık %0,1 civarındadır. Yüksek sıcaklıklarda (500°C ve üzeri) La' nın çözünürlüğü daha fazla artabilir ve %0,3 ağırlık oranına kadar ulaşabilir. Bu çözünürlük değeri de alaşımın genel özellikleri üzerinde sınırlı bir etki yaratır ve çoğunlukla intermetalik fazların oluşumuna neden olur.



Şekil 4. Farklı La oranlarına sahip SAA-A356 alaşımının mikroyapı görüntüleri (a) A356- düşük büyütme (b) A356- yüksek büyütme (c) 0,05 La+ 0,15 Ti (d) 0,1 La+0,2 Ti (Figure 4. Microstructure images of SAA-A356 alloy with different La ratios (a) A356- low magnification (b) A356- high magnification (c) 0,05 La+ 0,2 Ti (d) 0,1 La+0,2 Ti

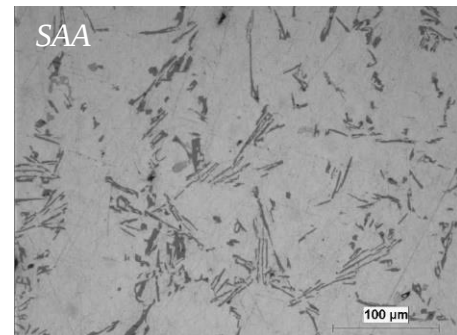


Şekil 4. (Devam). Farklı La oranlarına sahip SAA-A356 alaşımasının mikroyapı (e) 0,05 La+ 0,1 Zr (f) 0,1 La+ 0,2 Zr (g) 0,1 La (h) 0,3 La. (Figure 4. Microstructure images of SAA-A356 alloy with different La ratios (e) 0,05 La+ 0,1 Zr (f) 0,1 La+ 0,2 Zr (g) 0,1 La (h) 0,3 La.

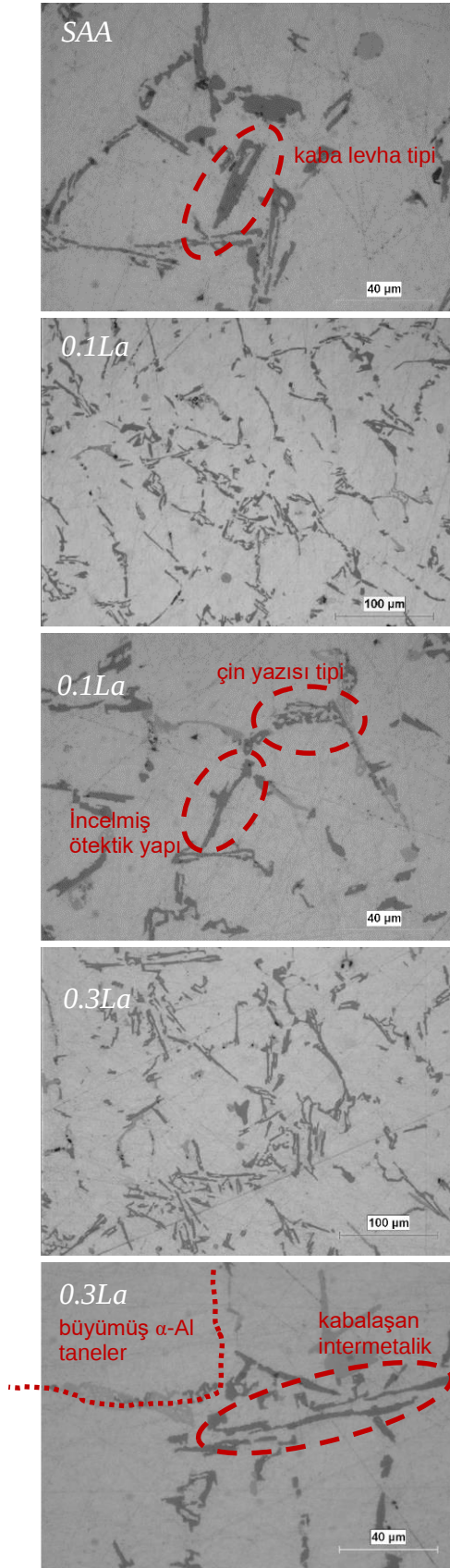
Nadir toprak elementleri eklenerek mikroyapıdaki değişiklikler üzerine yapılan çoğu çalışma, mikroyapısal değişikliği aşırı soğuma etkisine bağlar [29-31]. La gibi nadir toprak elementleri, katılaşma sırasında katı-sıvı arayüzünde fazla La birikmesi nedeniyle kolayca La açısından zengin intermetalik bileşikler oluşturabilir. La içeriği arttıkça, katı-sıvı arayüzünde kompozisyonel aşırı soğuma meydana gelir ve bu da α -Al fazının düzensiz büyümesiyle sonuçlanır [12]. Jiang vd. tarafından yapılan çalışmada lantanın eriyik α -Al arayüzünün önünde

yapısal aşırı soğuma ve heterojen çekirdeklenme çekirdeklerini arttırdığı ve böylelikle α -Al'un çekirdeklenmesini desteklediğini göstermektedir [32]. Zhao vd. çalışmasında, %0,15 La ilavesiyle (75 MPa sıkıştırma basıncı) Al7Si4CuMg alaşımında en ince α -Al taneleri elde edilmiş ve mekanik özellikler optimize edilmiştir. Ancak La miktarı %0,20'ye çıkarıldığında, α -Al tane incelmesi ve ötektik Si'nin modifikasyonu, ötektik reaksiyonun ($L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \text{Si} + \text{La}$ açısından zengin fazlar) gerçekleşmesiyle sınırlandırılmıştır. Bu ötektik reaksiyon, aşırı soğumayı azaltmış ve iğne benzeri La zengin fazların oluşumuna yol açmıştır [12]. Bizim çalışmamızda da benzer şekilde, La ilavesinin belirli bir sınırın üzerine çıkması, tane inceltme verimliliğini azaltarak ötektik reaksiyonların oluşumunu tetiklediği gözlemlenmiştir (Şekil 5).

Aşırı soğumayı etkileyen bir faktör de heterojen nükleasyondaki ıslatma açısıdır [5]. Heterojen nükleasyon sürecinde, α -Al ile substrat arasındaki ıslatma açısı, nükleasyon alt soğumasını değiştirir. Raporlar, La eklenmesinin ıslatma açısını etkili bir şekilde düşürdüğünü öne sürmektedir [13], [32]. Islatma açısı azaldıkça, arayüz enerjisi azalır ve bu da α -Al tanecik rafine edilmesini etkileyebilir. Aşırı soğutma etkisi, lantan atomları ile sıvı alüminyum matrisi arasındaki etkileşim nedeniyle artar ve bu da primer alüminyum ve ötektik silikon fazlarının çekirdeklenmesini geciktirir. Bu nedenle, La ilavesi tane rafine edilmesini önemli ölçüde etkiler. Bu çalışmada, α -Al'nin büyümesi %0,3 ağırlıkça lantana kadar etkin şekilde engellenmiştir ve orta düzeyde aşırı soğutmanın etkisi nedeniyle ince bir yapı oluşur. Heo ve arkadaşlarının çalışmasında [5], ağırlıkça %10Si içeren Al-Si alaşımına ilave ettikleri lantan miktarı %0,6' nın üzerine ağırlıkça artırıldığında aşırı soğutma etkisinin azaldığını ve mikroyapının tekrar kabalaştığını bulmuşlardır. Bizim çalışmamızda Şekil 5' te görüldüğü üzere La' nın %0,3 oranında eklenmesi aşırı soğuma etkisinin azalmasına ve mikroyapının birincil dendrit kollarında ve ötektik yapıda kabalaşmaya neden olmuştur.



Şekil 5. La ilavesi ile mikroyapının değişimi (Figure 5. Changes in microstructure with La addition)

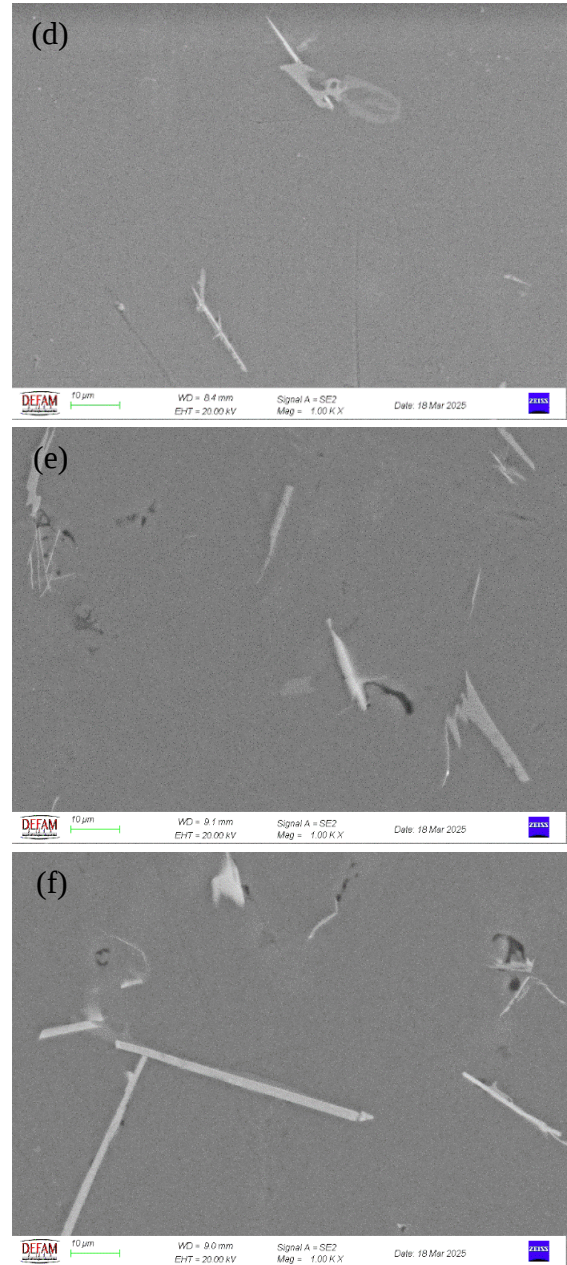
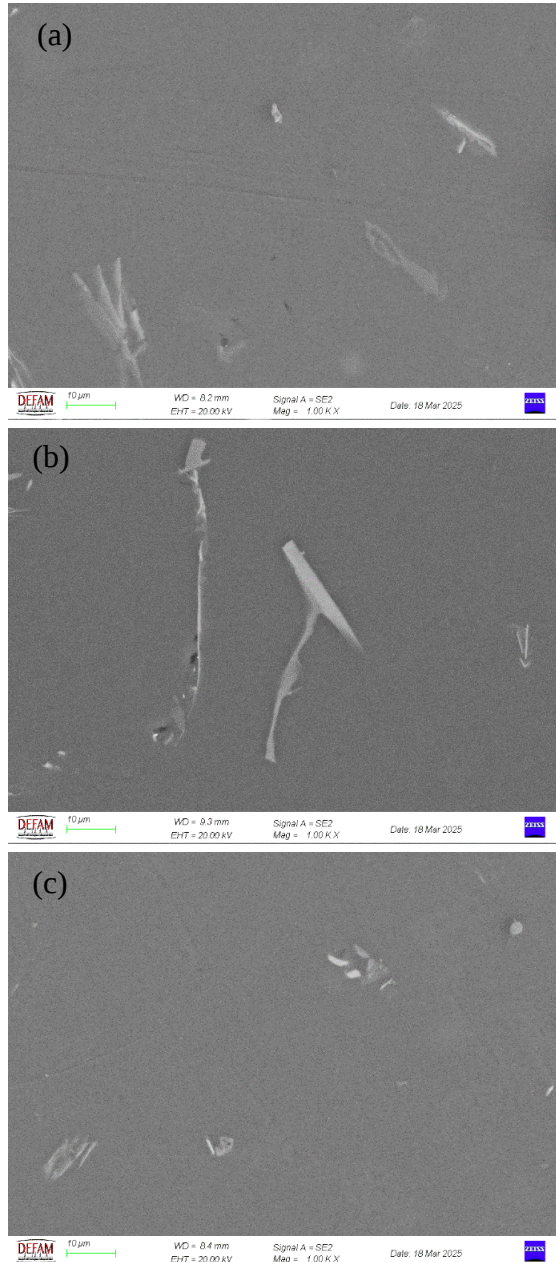


Şekil 5. (Devam). La ilavesi ile mikroyapının değişimi (Figure 5. Changes in microstructure with La addition)

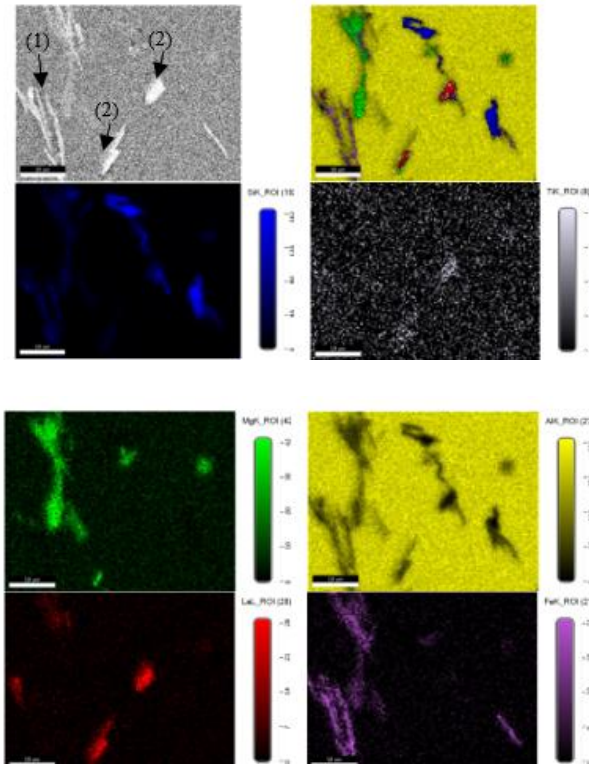
Alaşımdaki Si açısından zengin kümelerin, küçük miktarda La ilavesinin Al matrisindeki Si fazının çözünürlüğünü azaltabileceğini ve Fe içeren intermetalik fazların çevresine yayılmasını sağlayarak küçülme etkisi yaratabileceğini göstermektedir [32]. Mikroyapı incelemeleri, küçük La ilavesinin α -Al matrisinin çekirdeklenme davranışını değiştirebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak La oranının %0,3' e yükselmesi durumunda, La artık Al matrisinde çözünmek yerine faz sınırlarında birikir. Bu, matris içerisindeki La bulunabilirliğini azaltarak tane inceltme verimliliğini olumsuz etkiler. Lantan, alüminyum matrisinde sınırlı bir çözünürlüğe sahiptir ve bu sınır aşıldığında, fazla lantan çökerek daha yüksek sıcaklıklarda katı fazlar oluşturur. Ayrıca fazla La, alüminyum veya silikon gibi elementlerle reaksiyona girerek $Al_{11}La_3$ gibi kararlı metallere bileşikler meydana getirir [33]. Bu metallere fazlar, sıvı fazdaki lantanın bulunabilirliğini azaltarak çekirdeklenme sürecini sınırlar ve tane inceltme ile aşırı soğutma etkilerini zayıflatır. Şekil 5' de görüldüğü gibi, bu fazların oluşma potansiyeli olan görece yüksek La eklentilerinde, genellikle büyük ve kaba yapılar oluşturarak tane inceltme verimliliğini düşürür ve daha az aşırı soğutmaya neden olur.

Şekil 6'da, farklı katkı oranlarına sahip alaşımların SEM analizleri sonucunda intermetalik fazların morfolojisi ve boyutsal değişimleri incelenmiştir. Optik mikroskopa kıyasla daha yüksek büyütmede gerçekleştirilen SEM gözlemlerinde, ötektik silikon partiküllerinden morfoloji ve boyut açısından farklılık gösteren nadir bulunan element katkısı ile çeşitli intermetalik fazlar tespit edilmiştir [34]. La ilavesinin intermetalik fazların yapısal özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, %0.1 La içeren alaşımda intermetalik fazların ortalama kalınlığının 1 μm , uzunluklarının ise 5-10 μm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ancak, La oranının %0.3'e yükseltilmesiyle birlikte, intermetalik fazlarda belirgin bir kaba taneli yapı oluşmuş, fazların kalınlığı 4 μm 'ye, uzunluğu ise 40 μm 'ye kadar artmıştır. %0.05 La + %0.2 Ti kombinasyonu ile intermetalik fazların hem incelendiği hem de boyca kısaldığı tespit edilmiştir. Bu bileşimde, intermetalik fazların ortalama kalınlığı 1 μm seviyesinde korunurken, uzunlukları 2 μm 'ye kadar gerilemiştir. Benzer şekilde, aynı oranda La ilavesiyle birlikte %0.1 Zr eklendiğinde intermetalik fazların boyca uzadığı, %0.2 Zr ilavesiyle ise fazların 50 μm 'ye kadar kabalaşarak plaka morfolojisine dönüştüğü belirlenmiştir. Öte yandan, %0.1 La + %0.2 Ti içeren alaşımda hem oldukça ince ($\sim 0.1 \mu m$) hem de orta boyutta ($\sim 2 \mu m$) intermetalik fazların bir arada dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, katkı elementlerinin intermetalik fazların morfolojisi üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Intermetalik fazlardaki elementel dağılımı belirlemek amacıyla EDX haritalama analizi gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Şekil 7-12' de sunulmaktadır. Bu analiz, özellikle intermetalik fazlar içerisinde La'nın varlığını ve dağılımını görselleştirerek katkı elementlerinin

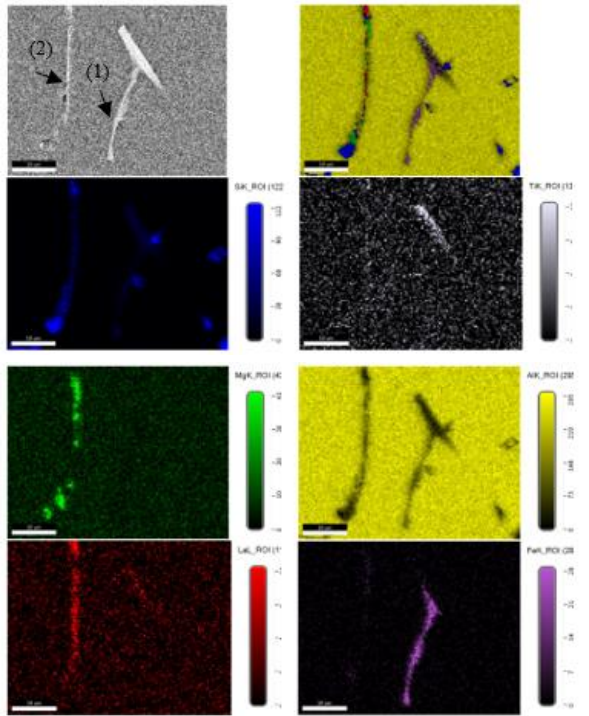
mikroyapı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Tüm La ilavelerinde La'nın tespit edildiği intermetalik fazlar belirlenmiştir. Tanımlanan intermetalik fazlar, AlFeSi ve LaAlSi olup, bunlar sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de ok ile gösterilmiştir. EDX haritalama sonuçları, La'nın alaşımın matris fazında kısmen bir dağılım sergilediğini, ancak intermetalik fazlarda belirgin olarak tespit edildiğini göstermektedir. Bu durum, Lantan'ın sınırlı çözünürlüğü nedeniyle intermetalik faz oluşumunu teşvik ettiğini ve belirli fazlarda biriktiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, düşük katkı seviyelerinde dahi La'nın intermetalik fazların yapısına dahil olduğunu ve katkı miktarına bağlı olarak, Ti ve Zr elementleri ile birlikte faz morfolojisinin değişebileceğini göstermektedir. La ilavesi, katılaşma sırasında kristal yapı üzerinde etkili olarak intermetalik fazların morfolojisini değiştirerek iğnemi veya pulsu yapılara dönüşmesine neden olmaktadır [35].



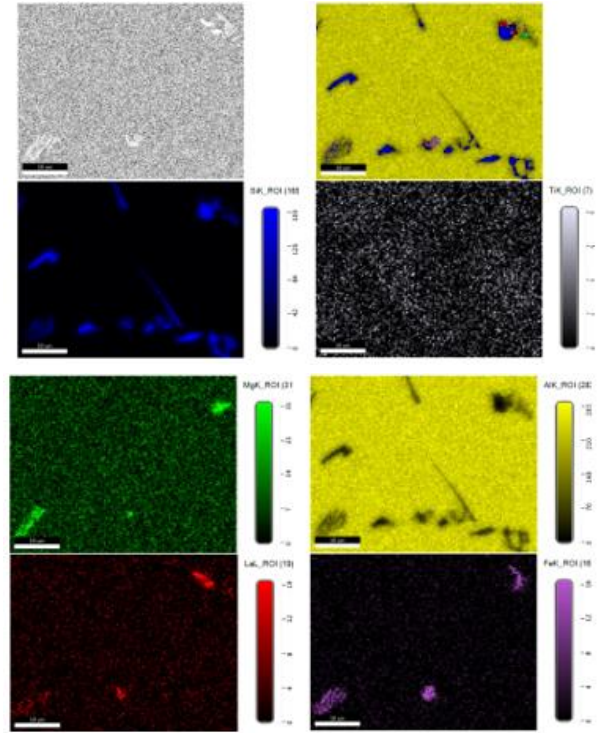
Şekil 6. Modifiye edilmiş A356 alaşımının farklı element ilaveleriyle elde edilen SEM mikroyapı görüntüleri: (a) %0.1 ağırlıkça La ilaveli, (b) %0.3 ağırlıkça La ilaveli, (c) %0.05 La + %0.2 Ti ilaveli, (d) %0.05 La + %0.1 Zr ilaveli, (e) %0.1 La + %0.2 Ti ilaveli, (f) %0.1 La + %0.2 Zr ilaveli (Figure 6. SEM microstructure images of the modified A356 alloy with different element additions: (a) 0.1 wt% La addition, (b) 0.3 wt% La addition, (c) 0.05 wt% La + 0.2 wt% Ti addition, (d) 0.05 wt% La + 0.1 wt% Zr addition, (e) 0.1 wt% La + 0.2 wt% Ti addition, (f) 0.1 wt% La + 0.2 wt% Zr addition)



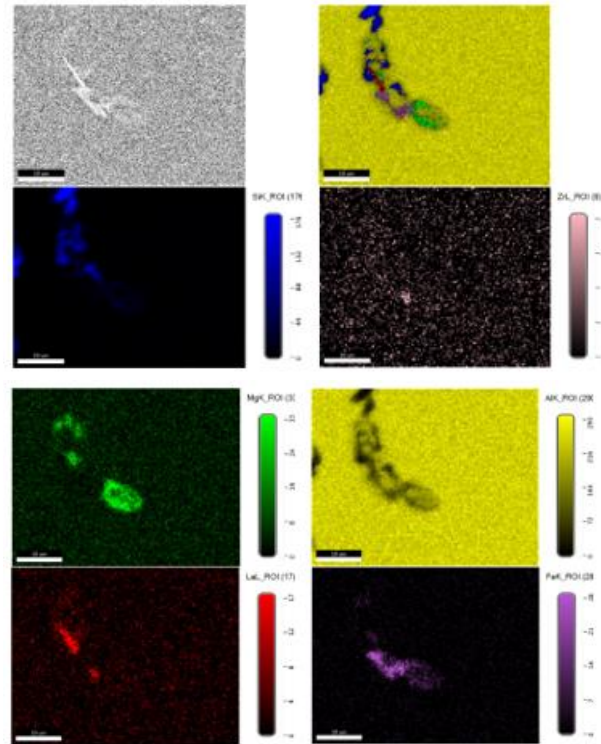
Şekil 7. %0.1 La ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü: 1 numaralı ok AlFeSi fazını, 2 numaralı ok ise AlSiLa fazı(Figure 7. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.1% La addition: Arrow 1 points to the AlFeSi phase, and arrow 2 points to the AlSiLa phase.)



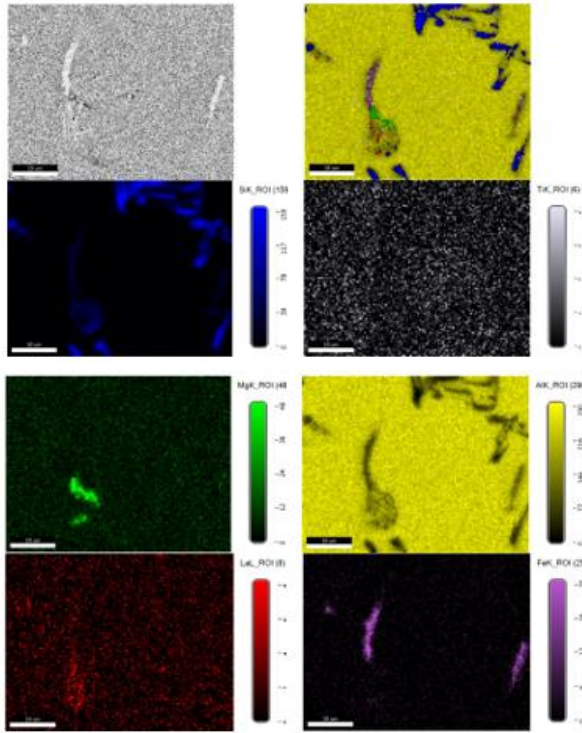
Şekil 8. %0.3 La ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü: 1 numaralı ok AlFeSi fazını, 2 numaralı ok ise AlSiLa fazı(Figure 8. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.3% La addition: Arrow 1 points to the AlFeSi phase, and arrow 2 points to the AlSiLa phase)



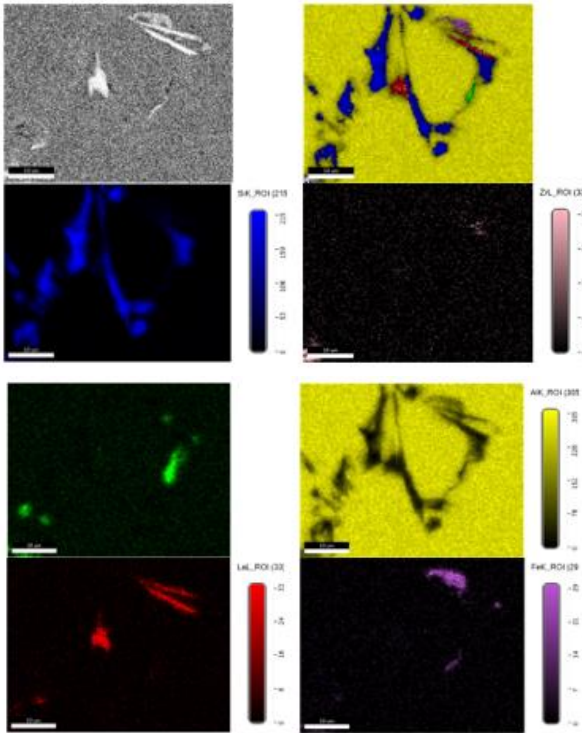
Şekil 9. %0.05 La + %0.2 Ti ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü(Figure 9. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.05% La + 0.2% Ti addition.)



Şekil 10. %0.05 La + %0.2 Zr ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü(Figure 10. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.05% La + 0.2% Zr addition)



Şekil 11. %0.1 La + %0.2 Ti ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü (Figure 11. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.1% La + 0.2% Ti addition)

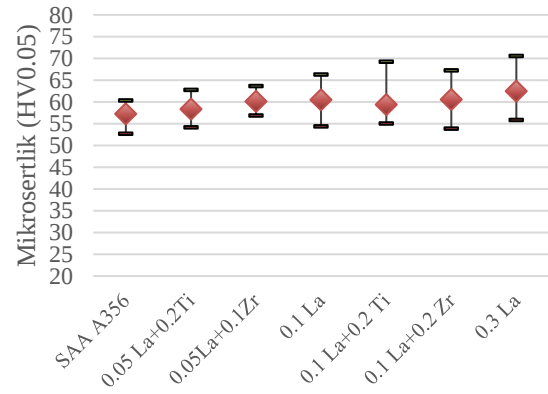


Şekil 12 . %0.1 La + %0.2 Zr ilaveli A356 alaşımlarının SEM haritalama görüntüsü (Figure 12. SEM mapping image of the A356 alloy with 0.1% La + 0.2% Zr addition.)

3.2. Mikrosertlik (Microhardness)

Şekil 13' de modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş SAA-A356 alaşımlarının Vickers indenter ile ölçülen mikrosertlik değerleri sunulmuştur. Sertlik değerlerinin

La ilavesinden sonra ortalama sertlik değerleri 57 HV' den 62 HV ' ye bir miktar arttığı, %0,1 La ilavesiyle yaklaşık %7' lik bir artış ve %0,3 La ilavesiyle yaklaşık %8,7' lik bir artış ile ulaşıldığı görülebilir. Ayrıca aynı La oranlarına Zr ve Ti eklendiğinde de sertlik bir miktar artmıştır ancak bu artış %5' i geçmemektedir. Bu tür iyileştirmeler esas olarak mikroyapısal değişiklikler, tane incelmeleri ve La açısından zengin çökeltilerin varlığıyla ilgilidir ve bunlar dislokasyonların hareketini kısıtlayarak sertliği az bir miktar iyileştirmiştir. Öte yandan, %0,3 ağırlık oranında La ilavesinden sonra mikroyapı kabalaşmasına rağmen sertliğin artması, La açısından zengin çökeltilerin etkisinden kaynaklanmaktadır. Dahası, en büyük standart sapmanın da %0,3 La içeren alaşımda elde edilmesi La açısından zengin çökeltilerle sıvı fazda Lantan bulunurluğu azalmış ve dolayısıyla bu fazlarla birlikte biraz irileşmiş rozet tip α -Al tane yapısının birlikte bulunmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 13. Alaşımların mikrosertlik değişimleri (Figure 13. Microhardness changes of the alloys)

3.3. Çekme Özellikleri (Tensile Properties)

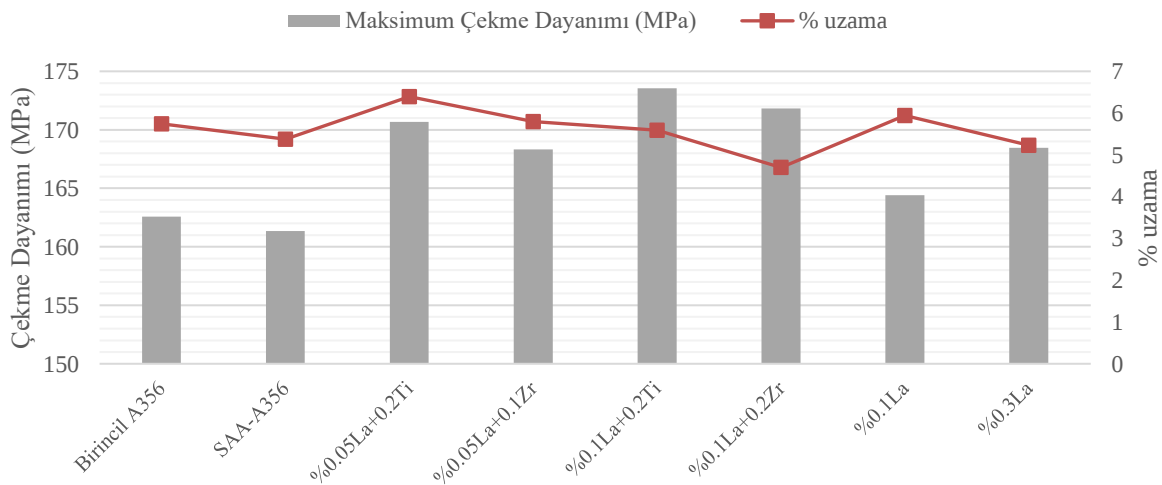
Çizelge 2'de numunelerin ortalama çekme dayanımı ve % uzama değerleri verilmiştir. Ayrıca Lantan, Titanyum ve Zirkonyum ilavesi yapılan bileşiklerin maksimum çekme dayanımı ve % uzama değerlerindeki değişim trendleri, Şekil 14' de aynı grafik üzerinde birlikte gösterilmiştir. Bu grafik, belirli oranlarda eklenen alaşım elementlerinin hem çekme dayanımını hem de % uzama özelliklerini nasıl etkilediğini görsel olarak daha net takip etmeyi sağlamaktadır. Özellikle bazı bileşiklerde dayanım artışı gözlemlenirken, süneklik kaybının meydana gelmemesi, malzemenin mekanik performansı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Grafiksel gösterim, tablodaki verilerin yorumlanmasını destekleyerek, dayanım ve süneklik arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. SAA-A356' nın çekme dayanımı 161,34 MPa ve uzaması % 5,37 olarak bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde alaşım elementlerinin etkisiyle çekme dayanımlarında bir artış trendi söz konusudur. La içeriği arttıkça, Al-Si ve Al-Si-Cu alaşımlarında La çökelti fazları oluşur ve bu fazların boyutu artar. Al-La faz diyagramına göre, La'nın çözünürlüğü %0,01 (ağırlıkça~%0,05) olarak bilindiği

için [36], %0,3 ağırlık oranında La eklendiğinde bile La çökelti fazı yeterince oluşabilir [5]. α -Al matrisinde bir çökeltme fazı oluştuğunda, çökelti etrafındaki kafes deformasyonu nedeniyle dislokasyonların hareketi zorlaşır ve çökeltme sertleşmesi etkisine neden olur. Bu nedenle, La eklenen tüm numunelerde mekanik özelliklerin çökeltme fazı ile iyileşeceği beklenmektedir. En yüksek artış %0,1La+0,2Ti alaşım numunede 173,818 MPa olarak bulunmuştur, bu da dayanımda yaklaşık %7,73' lik hafif bir artıştır. Birincil A356' nın çekme testi karşılaştırma amacıyla gerçekleştirilmiş ve dayanımı ortalama 162,576 MPa olarak bulunmuştur ve

çekme testi sonuçları SAA-A356' nın Lantan, Titanyum ve Zirkonyum elementleriyle eser miktarda alaşımlandırılmasının birincil A356 dayanımının üzerine çıktığını göstermiştir. Plastik deformasyon kabiliyetleri % uzama cinsinden değerlendirildiğinde, benzer trende sahip olsalar da, %0,05La+0,2Ti eklentisinin yaklaşık %6,4 uzama göstererek en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir. Dayanım değerine bakıldığında bu alaşımın, SAA-A356' ya göre daha yüksek bir maksimum çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla %0,05La+0,2Ti eklentisine sahip alaşım hem dayanım hem süneklik artışı sağlamıştır.

Çizelge 2. Numunelerin çekme testi sonrası çekme dayanımı ve uzama değerleri (Tensile strength and elongation values of the specimens after tensile test)

Numuneler	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	% uzama
Birincil A356	162,576	5,74
SAA-A356	161,34	5,375
%0,05La+0,2Ti	170,665	6,395
%0,05La+0,1Zr	168,336	5,794
%0,1La+0,2Ti	173,56	5,587
%0,1La+0,2Zr	171,818	4,698
%0,1La	164,42	5,946
%0,3La	168,47	5,23



Şekil 14. Alaşımların Çekme Dayanımı ve % Uzama Grafiği (Figure 14. Tensile Strength and Elongation Percentage Graph of the Alloys)

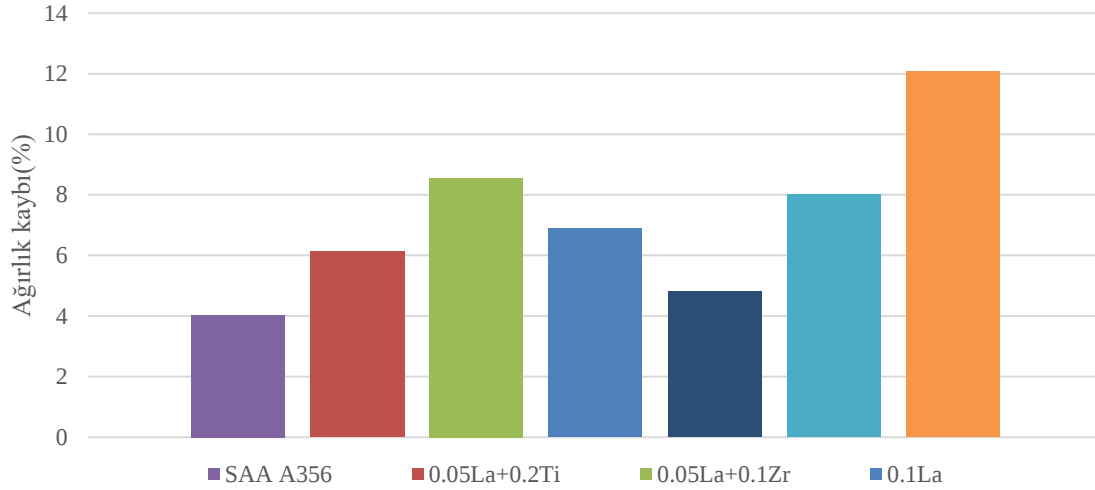
3.3. Korozyon Davranışı (Corrosion Behavior)

Hızlandırılmış korozyonun elektrokimyasal yöntemi, metal bozunmasının sınırlayıcı aşamasını ortaya koyar ve korozyon hızının tahmini için kullanılabilir. A356 alaşımı üzerinde yapılan bu değerlendirme, farklı oranlarda alaşım elementi katkıları ile geliştirilen yeni mikroalaşımların korozyon hızlarını değerlendirmek içindir. Korozyon ortamı olarak NaCl içeren sulu çözelti kullanılmış olup, numunelerin farklı mikroalaşım kompozisyonlarına bağlı olarak korozyon davranışları incelenmiştir. Bu aşamada, mikroalaşım elementlerinin

A356 alaşımının korozyon dayanımı üzerindeki etkilerini anlamak ve bu doğrultuda korozyon kaybını tahmin edebilmek için bilimsel bir temel oluşturulmuştur. Şekil 15' de SAA-A356 alaşımına farklı oranlarda La, La+Zr ve La+Ti eklenerek elde edilen numunelerin korozyon testi sonrası ağırlık kayıpları gösterilmektedir. Çizelge 3 ise, Denklem (2) kullanılarak, teorik olarak Denklem (1) ile hesaplanan W değeri temel alınarak SAA A356 ve mikroalaşımlı versiyonlarının korozyon hızı sonuçlarını vermektedir. Korozyon performansında düşüş meydana gelmesi, eklenen elementlerin korozif ortamda alaşımın

davranışını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu olumsuz etkinin tüm eklentilerde meydana gelmesinin yanında özellikle La+Zr' da ve görece yüksek miktarda La eklenmesinde meydana gelmesinin sebepleri irdelendiğinde; lantan ve zirkonyumun farklı çözünürlükleri ve difüzyon özellikleri, alüminyum matriste heterojen bölgeler yaratabilmesi ile açıklanır. Korozyon ortamında anot ve katot olarak davranabilecek farklı elektrokimyasal potansiyele sahip fazlar oluşur, bu da korozi ortamda bu bölgelerin hızla bozulmasına neden olabilir. Görece yüksek miktarda lantan eklenmesinin (%0,3La) korozyon özelliklerinde ciddi bir bozulmaya yol açmasının temel nedeni ise, mikroyapıdaki fazların aşırı doymuş olmasıdır. %0,3 La ilavesi lantanın alüminyum içerisindeki çözünürlüğünü aştığı için intermetalik fazlar oluşur [33]. Bu fazlar, alüminyum matriste homojen bir dağılım gösteremediğinde heterojenlik söz konusudur. Şekil 5 incelendiğinde %0,1 La ilavesi ile incelenen Fe ve Si içerikli intermetalikler levha tipinden çin yazısı tipine değişmiştir. La ilavesinin %0,3' e artmasıyla ise levha yapılı demirce zengin intermetalikler kabalaşmış ve daha büyük taneli bir mikroyapı oluşturmuştur. Bu kabalaşma, sertliği düşürmezken, özellikle bu büyük dendritik taneler ve ötektik bölgedeki heterojen dağılım, korozyon hücrelerinin oluşmasına daha elverişli bölgeler yaratmış ve korozyon direncini düşürmüştür. Sina vd. çalışmasında %3 ağırlıkça sodyum klorür çözeltisinde kurban anotta Al-5% Zn-0,02'nin elektrokimyasal davranışını araştırmış ve alaşım elementleri olarak Ti ve Zr eklenmesinin etkisine odaklanmıştır. Ti ve Zr değişen miktarlarda (%0,01 ila %0,2 ağırlıkça) eklenmiş ve bunların anotun performansı üzerindeki etkileri NACE verimliliği (katodik koruma için kullanılan alüminyum alaşımlı anotlar için laboratuvar koşullarındaki potansiyel ve akım kapasitesi özellikleri) ve polarizasyon testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ağırlıkça %0,03-0,05 Ti ve ağırlıkça %0,05 Zr eklenmesinin, daha homojen çözünmeyi teşvik ederek akım kapasitesi ve verimlilik gibi alüminyum anotun elektrokimyasal özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ancak, yüksek Ti ve Zr seviyeleri, bifilm (oksit filmler) üzerinde çökelmeye neden olarak bunların tortulaşmasına ve döküm alaşımının homojen çözünmesinin bozulmasına yol açarak anotun performansını düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır [37]. Daha fazla Ti ve Zr ilavesi korozi ortamda alüminyumun homojen çözünmesini engelleyerek korozyon performansında düşüş yol açmıştır. Bu bulgular, alaşım elementlerinin miktar ve kombinasyonlarının korozyon performansını belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle bu çalışmada, La, Ti ve Zr gibi elementlerin düşük oranlarda

eklenmesinin bile, mikroyapıda heterojen bölgeler ve büyük intermetalik fazlar oluşturarak korozyon hücrelerinin oluşumuna zemin hazırlayabildiği ya da birincil Al içinde çözünüp bu bölgelerin bozunmasını hızlandırarak alaşımın korozi ortamlardaki dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, optimum mekanik ve korozyon performansı elde etmek için alaşım elementlerinin dikkatle dengelenmesi gerekmektedir. Çizelge 3' te yer alan mm/yıl cinsinden hesaplanmış korozyon hızı verileri değerlendirildiğinde, SAA-A356 alaşımı referans noktası olarak alınır ise, SAA-A356 alaşımı, 0,76264 mm/yıl korozyon hızına sahiptir ve bu değer diğer mikroalaşım versiyonlarıyla kıyaslandığında en düşük seviyede kalmaktadır. Bu durum, alaşıma eklenen elementlerin malzeme üzerinde mikro-yapısal değişimlere yol açarak korozyon direncini farklı şekillerde etkilediğini göstermektedir. La ve Ti etkisi incelendiğinde, 0,05La + 0,15Ti kombinasyonu (1,15486 mm/yıl), temel alaşıma göre daha yüksek bir korozyon hızına sahiptir. 0,1La + 0,2Ti kombinasyonu (0,90706 mm/yıl), ilginç olarak 0,05La + 0,15Ti'ye göre daha düşük bir korozyon hızı sergilemektedir. Bu durum, Ti' nin belirli bir seviyeye kadar korozyon direncini iyileştirebileceğini, ancak optimum oran aşıldığında ters etki yaratabileceğini düşündürmektedir. La ve Zr etkisi göz önüne alındığında, 0,05La + 0,1Zr kombinasyonu (1,61245 mm/yıl) ve 0,1La + 0,2Zr kombinasyonu (1,50925 mm/yıl) ile korozyon hızları oldukça yüksektir. Zr'nin korozyon direncini olumsuz etkilediği veya malzemede heterojen bir mikro yapı oluşturarak lokal anot bölgelerinin oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Sadece La etkisi referans alındığında ise, 0,1La (%1,30079 mm/yıl) ve 0,3La (%2,27709 mm/yıl) ile korozyon hızlarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Özellikle %0,3 La içeren numune, en yüksek korozyon hızına sahiptir. Bu, La ilavesinin belirli bir seviyeye kadar tane inceltici etki gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlarda istenmeyen intermetalik fazların oluşmasına ve galvanik hücre etkisiyle korozyon hızının artmasına neden olabileceğini göstermektedir. Al-Si alaşımlarının korozyon özelliklerine etkisi üzerine yapılan çalışmalar, La ilavesinin mikro yapıyı iyileştirerek ince ve homojen bir tane yapısı oluşturduğunu ve böylece yoğun ve kararlı bir pasivasyon tabakasının hızla oluşumunu destekleyerek korozyon direncini artırdığını göstermektedir [38]. Özellikle belirli bir La içeriğinde korozyon akım yoğunluğunda önemli bir azalma sağlandığı ve intermetalik faz oluşumunun korozyon direncine katkıda bulunduğu raporlanmıştır [38].



Şekil 15. SAA-A356 alaşımı ve mikroalaşım versiyonlarında meydana gelen ağırlık kayıpları (Figure 15. Weight loss of SAA-A356 alloy and its microalloyed versions)

Çizelge 3. %3,5 NaCl Konsantrasyonuna Daldırılan SAA-A356 ve mikroalaşım versiyonlarının Korozyon Hızları (Table 3. Corrosion rates of SAA-A356 and its microalloyed versions immersed in 3.5% NaCl Solution)

Numuneler	SAA-A356	0.05La+0.2Ti	0.05La+0.1Zr	0.1La	0.1La+0.2Ti	0.1La+0.2Zr	0.3La
Korozyon hızı (mm/yıl)	0,76264	1,15486	1,61245	1,30079	0,90706	1,50925	2,27709

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Lantan (La), Zirkonyum (Zr) ve Titanyum (Ti), geri dönüştürülmüş Al-Si alaşımının modifikasyonu amacıyla ikincil (SAA) A356 alaşımının ergimiş bileşiğine farklı konsantrasyonlarda eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak şu çıkarımlar yapılabilir:

1.La ilavesi, %0,05 ağırlık oranı kadar düşük seviyelerde bile, ideal bir α -Al tane inceltmesi, ötektik Si modifikasyonu ve alaşımların mekanik özellik iyileşmesi sağlamak için yeterlidir.

2. SAA-A356 döküm alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri kimyasal bileşimine bağlıdır. Bu çalışmada özellikle nadir toprak elementi olan lantanın dahil olduğu alüminyum alaşımlarının modifikasyonu, heterojen kristalleşme çekirdeklerinin oluşumuna neden olarak mikroyapının değişmesine katkıda bulunmuştur. La ile yapılan modifikasyon, ötektik silisyumu belirgin bir şekilde dönüştürebilir; örneğin, %0,1 La içeriği ile ötektik Si kristalinin etkili bir şekilde modifiye edilmesi sağlanabilir. La atomlarının ötektik Si' un büyüme yüzeyine yerleşmesi yoluyla intermetalik fazların büyüme davranışlarını değiştirerek modifiye eder. Ancak %0,3 La ile tane kabalaşması meydana gelir. Yüksek La ilaveleri ile Al-Si alaşımında LaAlSi fazı oluşur. LaAlSi fazı, tetragonal bir yapıya sahiptir ve ötektik reaksiyon döneminde ergiyik içinde çöker. Lantanın artmasıyla kararlı intermetalik fazların oluşması teşvik edilerek, sıvı fazda lantanın bulunurluğu azalır ve bu da tane inceltme ve aşırı soğuma etkilerini azaltmaktadır.

3.SAA-A356 alüminyum alaşımının korozyon direnci, La elementinin eklenmesiyle tüm oranlarda azalmıştır.

Yani, alaşımın, korozyon ortamında madde kaybı, La içeriği arttıkça artmıştır. Deneyler, %0,1 La ilavesi ile korozyon ağırlık kaybının %6,89 arttığını, % 0,3La ilavesi ile maksimuma ulaşarak korozyon ağırlık kaybının %12,07 arttığını ortaya koymuştur. Bu durum, büyümüş dendritik taneler ve ötektik bölgedeki heterojen dağılımın korozyon hücrelerinin oluşumuna daha elverişli bölgeler yaratmasından kaynaklanmış ve korozyon direncinin düşmesine yol açmıştır.

4.Düşük miktarda Ti içeren mikroalaşımlar (0,1La + 0,2Ti) eklentili versiyonlar arasında en iyi korozyon dayanımını göstermektedir. Zr içeren alaşımlar genel olarak yüksek korozyon hızlarına sahiptir. La içeriği arttıkça korozyon hızında ciddi bir yükselme gözlemlenmiştir. Optimum korozyon direnci için Ti içeriğinin dikkatle optimize edilmesi, La miktarının ise belirli bir sınırdan tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, mikroalaşım elementlerinin kontrollü şekilde eklenmesinin korozyon performansı üzerindeki kritik rolünü vurgular ve A356 alaşımında korozyon direncini iyileştirmek için uygun mikroalaşım bileşenlerinin dikkatle belirlenmesi gerektiğini gösterir.

5.Lantan ile birlikte zirkonyum eklenmesinin sertlik üzerindeki etkisinin, titanyum eklenmesine göre daha güçlü olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sabit La oranına ek olarak artan Ti ve Zr miktarlarının, mikrosertlik değerinde bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır. Peritektik reaksiyonla çökelemeyecek oranlarda eklenen Zr ve Ti elementleri, bu çalışmada sadece tane rafine etkisi yarattığı sonucuna varılmıştır.

6.%0,1 La eklentisi ile mikrosertliğin %7, %0,3 La ilavesi ile ise %8,7 oranında arttığı bulunmuştur. %0,05

La + %0,1 Zr eklentisi ile sertlik %6.4 artarken, diğer oranlardaki artışlar %5'in altında kalmıştır. Küçülen α -Al dendrit yapısı, mikrosertlikteki artışa sebep olmuştur. Ayrıca, La oranının %0,05'ten %0,1'e çıkması, faz morfolojisinin levha yapısından çin yazısı tipine dönüşmesine ve yapıda rafine edilmiş ötektik faz oluşmasına yol açarak hem mikrosertlikte hem de çekme dayanımında bir artış meydana getirmiştir. Ancak, La ilavesinin %0,3'e yükselmesiyle levha yapılı demirce zengin intermetalikler kabalaşmış ve daha büyük taneli bir mikroyapı oluşturmuştur. Sonuç olarak, bu kabalaşma mekanik dayanımı düşürmezken, özellikle büyük dendritik taneler ve ötektik bölgedeki heterojen dağılım, korozyon hücrelerinin oluşmasına daha elverişli bölgeler yaratmış ve korozyon direncini azaltmıştır.

7. Dayanım ve süneklik birlikte değerlendirildiğinde en iyi mekanik özellikler %0,05La+0,2Ti eklentili alaşımda elde edilmiştir. Böylece pahalı bir element olan nadir toprak elementi lantanın düşük miktarlarda eklenmesi Ti ile birlikte yapıldığında SAA-A356 alaşımında mikroyapısal ve mekanik performans artışı sağlanmaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Simge GENÇALP İRİZALP: Çalışmanın temel fikrini ortaya koymuş, makalenin kurgusunu yapmış, yazımını tamamlamış, sonuçları yorumlamış, şekil ve grafiklerin çizimini gerçekleştirmiştir.

Hande KARAOĞLU: Deneyleri yürütmüş ve sonuçları elde etmiştir.

Burçak Kardelen KÖROĞLU: Alaşım oranlarını hazırlamış ve döküm işlemlerini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pérez, O.R., Garcia-Hinojosa, J.A., Rodríguez Gómez, F.J., Mejia-Sintillo, S., Salinas-Bravo, V.M., Lopes-Sesenez, R., Gonzalez-Rodriguez, J.G., Garcia-Pérez, C.A. "Corrosion Behavior of A356/SiC Alloy Matrix Composites in 3.5% NaCl Solution", *International Journal of Electrochemical Science*, 14(8), 7423–7436, (2019).
- [2] Koşatepe, A., Kabil, A. "The Effect of Mechanical Vibration on Casting Properties of Grain Refined A356 Alloy", *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2770–2782, (2020).
- [3] Zhang, H., Yu, S., Yang, Z., Zhang, C. "The Influence of Porosity and Precipitates on the Corrosion Behavior of A356 Aluminum Alloy", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 948, 1572–6657, (2023).
- [4] Švecová, I., Tillová, E., Kuchariková, L., Knap, V. "Possibilities of Predicting Undesirable Iron Intermetallic Phases in Secondary Al-Alloys", *Transportation Research Procedia*, 55, 797–804, (2021).
- [5] Heo, U., Han, D.W., Kim, S., Mo, C.B. "Microstructure, Mechanical, and Corrosion Properties of Al–10Si and Al–10Si–2Cu Alloys with Different La Contents", *Materials Today Communications*, 32, 2352–4928, (2022).
- [6] Yu, B.B., Yan, H., Zhu, J.B., Liu, J.L., Li, H.G., Nie, Q. "Effects of La on Microstructure and Corrosion Behavior of AlSi5Cu1Mg Alloy", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 32, 443–451, (2019).
- [7] Cardinale, A.M., Macciò, D., Luciano, G., Canepa, E., Traverso, P. "Thermal and Corrosion Behavior of As Cast AlSi Alloys with Rare Earth Elements", *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2180–2189, (2017).
- [8] Zou, Y., Yan, H., Yu, B., Hu, Z. "Effect of Rare Earth Yb on Microstructure and Corrosion Resistance of ADC12 Aluminum Alloy", *Intermetallics*, 110, 106487, (2019).
- [9] Zhang, L., Yan, H., Zou, Y., Yu, B., Hu, Z. "Effect of Adding Rare-Earth Cerium on the Microstructure and Acid Rain Corrosion Resistance of the ADC12 Alloy", *International Journal of Materials Research*, 112(3), 241–249, (2021).
- [10] Mahmoud, M.G., Zedan, Y., Samuel, A.M., Songmene, V., Doty, H.W., Samuel, F.H. "Applications of Rare Earth Metals in Al-Si Cast Alloys", *Advances in High-Entropy Alloys - Materials Research, Exotic Properties and Applications*, IntechOpen, Sep. 22, (2021).
- [11] Li, Q., Xia, T., Lan, Y., Li, P., Fan, L. "Effects of Rare Earth Er Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al–20% Si Alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 588, 97–102, (2013).
- [12] Zhao, B., Xing, S., Sun, H., Yan, G., Gao, W., Ou, L. "Effect of Rare-Earth La on Microstructure and Mechanical Properties of Al7Si4CuMg Alloys Prepared by Squeeze Casting", *Journal of Material Science*, 57, 12064–12083, (2022).
- [13] Zheng, Q., Zhang, L., Jiang, H., Zhao, J., He, J. "Effect Mechanisms of Micro-Alloying Element La on Microstructure and Mechanical Properties of Hypoeutectic Al-Si Alloys", *Journal of Materials Science & Technology*, 47, 142–151, (2020).
- [14] Tsai, Y.C., Chou, C.Y., Lee, S.L., Lin, C.K., Lin, J.C., Lim, S.W. "Effect of Trace La Addition on the Microstructures and Mechanical Properties of A356 (Al–7Si–0.35Mg) Aluminum Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 487(1–2), 157–162, (2009).
- [15] Cao, Y., Chen, X., Wang, Z., Chen, K., Pan, S., Zhu, Y., Wang, Y. "Synergistic Influence of La and Zr on Microstructure and Mechanical Performance of an Al-Si-Mg Alloy at Casting State", *Journal of Alloys and Compounds*, 902, 163829, (2022).
- [16] Yuan, W., Liang, Z., Zhang, C., Wei, L. "Effects of La Addition on the Mechanical Properties and Thermal-Resistant Properties of Al–Mg–Si–Zr Alloys Based on AA 6201", *Materials & Design*, 34, 788–792, (2012).
- [17] Zhao, B., Zhang, Y., Zhang, H., Liu, X., Chen, X., Jiang, F., Ma, X. "Influence of La Addition on Fe-Rich Intermetallic Phases Formation and Mechanical Properties of Al–7Si–4Cu–0.35Mg–0.2Fe Alloys Prepared by Squeeze Casting", *Intermetallics*, 153, 107783, (2023).

- [18] Jiang, H., Zhang, Y., Zhang, X., Li, Y., Liu, J., Wang, J. "The Influence of Rare Earth Element Lanthanum on the Microstructures and Properties of As-Cast 8176 (Al-0.5Fe) Aluminum Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 859, 157804, (2021).
- [19] Zhao, Y., Zhang, Z., Liu, J., Wu, Y. "Effect of Adding Lanthanum to Al-5%Ti-1%B Master Alloy on the Efficiency of Grain Refinement in Aluminum and Al-7%Si Alloy", *Metal Science and Heat Treatment*, 63(5), 243-250, (2021).
- [20] Zhang, X., Yang, Y., Jin, H., Sui, Y., Jiang, Y., Wang, Q. "Effect of Lanthanum Content on Microstructure and Mechanical Properties of Al-5Mg-2Si-0.6Mn Alloy in Squeeze Casting", *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6025-6033, (2021).
- [21] Bagaber, S.A., Abdullahi, T., Harun, Z., Daib, N., Othman, M.H.D. "The Effect of Lanthanum Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of A390 Aluminium Alloy", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 4559-4564, (2017).
- [22] Hekimoğlu, A.P., Çalış, M. "Effect of Grain Refinement with Titanium on the Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Al-25Zn Alloy", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 311-322, (2020).
- [23] Yang, Y., Tan, P., Sui, Y., Jiang, Y., Zhou, R. "Influence of Zr Content on Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Al-Zn-Mg-Cu Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 867, 158920, (2021).
- [24] Gad Elrab, H.G., Abdalla, G. "Joint Addition of Zirconium, Titanium and Chromium to Commercial Pure Aluminium", *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 22(2), 58-64, (2020).
- [25] Berladir, K., Hovorun, T., Botko, F., Gusak, O., Denysenko, Y. "Effect of Ti-Zr Ligature on Microstructure and Mechanical Properties of Automotive Silumin", Grabchenko's *International Conference on Advanced Manufacturing Processes*, 253-263, (2022).
- [26] Nunes, H., Emadinia, O., Soares, R., Vieira, M.F., Reis, A. "Adding Value to Secondary Aluminum Casting Alloys: A Review on Trends and Achievements", *Materials*, 16(3), 895, (2023).
- [27] Mahmoud, M.G., Samuel, A.M., Doty, H.W., Valtierra, S., Samuel, F.H. "Effect of Rare Earth Metals, Sr, and Ti Addition on the Microstructural Characterization of A413.1 Alloy", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 4712946, (2017).
- [28] Ali, N., Fulazzaky, M.A. "The Empirical Prediction of Weight Change and Corrosion Rate of Low-Carbon Steel", *Heliyon*, 6(9), e05050, (2020).
- [29] Zhang, J., Guo, W., Bai, Q., Liu, X., Li, Z., Sun, Z., Jin, Y., Zhao, Z. "Effect of Rare Earth Ce and Y on Microstructure and Viscosity of ZL114A Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 1004, (2024).
- [30] Ahmad, R., Sheggaf, Z.M., Asmael, M.B.A., Hamzah, M.Z. "Effect of Rare Earth Addition on Solidification Characteristics and Microstructure of ZRE1 Magnesium Cast Alloy", *Advances in Materials and Processing Technologies*, 3(3), 418-427, (2017).
- [31] Cai, H., Wang, Z., Liu, L., Su, J., Li, G., Guo, F. "Grain Refinement Mechanism of Rare Earth Elements (Ce, Y and Gd) on AZ91 Magnesium Alloy at Different Cooling Rates", *International Journal of Metalcasting*, 18, 2933-2943, (2024).
- [32] Jiang, H., Li, S., Zheng, Q., Zhang, L., He, J., Song, Y., Deng, C., Zhao, J. "Effect of Minor Lanthanum on the Microstructures, Tensile and Electrical Properties of Al-Fe Alloys", *Materials & Design*, 195, (2020).
- [33] Mathew, J. "Recyclability of Aluminium and Aluminium Alloys" (PhD Thesis/Dissertation), University of Warwick, August, (2020).
- [34] Tsai, Y.C., Chou, C.Y., Jeng, R.R., Lee, S.L., Lin, C.K. "Effect of Rare Earth Elements Addition on Microstructures and Mechanical Properties of A356 Alloy", *International Journal of Cast Metals Research*, 24(2), 83-87, (2011).
- [35] Ahmad, R., Asmael, M.B.A. "Influence of Lanthanum on Solidification, Microstructure, and Mechanical Properties of Eutectic Al-Si Piston Alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 2799-2813, (2016).
- [36] Liao, J., Wang, H., Chen, T.Y. "Experimental Investigation and Thermodynamic Calculation of Ni-Al-La Ternary System in Nickel-Rich Region: A New Intermetallic Compound Ni₂AlLa", *Materials*, 11(12), 2396, (2018).
- [37] Sina, H., Emamy, M., Saremi, M., Keyvani, A., Mahta, M., Campbell, J. "The Influence of Ti and Zr on Electrochemical Properties of Aluminum Sacrificial Anodes", *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2), 263-276, (2006).
- [38] Kim, K., Heo, U., Yang, H., Kang, N. "Enhancement of the Corrosion Properties of Al-10%Si-2%Cu Alloys with La Addition", *Materials*, 17(11), 2496, (2024).