



NTE katkılı Mg-2Zn Alaşımının Yük Altında Aşınma Davranışı ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Halil Ahmet GÖREN¹ ve Mehmet ÜNAL²

How to cite: Gören, H. A., & Ünal, M. (2025). NTE katkılı Mg-2Zn alaşımının yük altında aşınma davranışı ve bazı özelliklerinin incelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 549-561. <https://doi.org/10.33484/sinopfbid.1700424>

Araştırma Makalesi

Sorumlu Yazar

Halil Ahmet GÖREN
 agoren@sinop.edu.tr

Yazarlara ait ORCID

H.A.G: 0000-0003-4455-4024
 M.Ü: 0000-0003-3836-4566

Received: 16.05.2025

Accepted: 14.10.2025

Öz

Magnezyum (Mg) alaşımları, mühendislik alaşımlarının en hafifi olarak havacılık, otomotiv, yapı malzemeleri ve implant uygulamaları gibi alanlarda artan kullanım oranına sahiptir. Bu çalışmada iyi mukavemet, şekillendirilebilirlik ve absorpsiyon özelliklere sahip Mg-2Zn magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Döküm Mg-2Zn alaşımın mekanik özelliklerini geliştirmek için %0.5 oranında popüler hafif Nadir Toprak Elementi (NTE) La (lantan) eklenerek iki farklı alaşım elde edilmiştir. Alaşımlar üzerinde La'nın etkileri, OM (Metalografik İnceleme), SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu), sertlik, çekme ve aşınma testleri ile araştırılmıştır. Araştırma sonuçları incelendiğinde Mg-2Zn alaşımına La elementinin eklenmesiyle Mg tane yapısı modifiye edilmiştir. La elementi Mg alaşımı içerisinde çözünmediği için, La ilavesi dokuyu zayıflatmıştır. Matriste çözünen La elementi bazal olmayan doku bileşenleri meydana getirmiştir. Akma dayanımı %17.62 düşerken, çekme dayanımı %4.13 artmıştır, % uzama ise %61.31 artarak çok iyi performans sergilemiştir. Sertlik değeri %48.53 artmıştır. 20 N yük altında, La ilavesi ile aşınma değeri %41.68 oranında azalmıştır. Araştırmanın sonuçları Mg-2Zn hafif metal alaşımının özellikleri üzerinde nadir toprak elementi olan La'nın düşük oranlarda ilavesinin faydasını açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mg-Zn, magnezyum, döküm, lantan, aşınma

Investigation of Under-Load Wear Behavior and Some Properties of Mg-2Zn Alloy with REE Addition

¹Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, Sinop, Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Karabük, Türkiye

Abstract

Magnesium (Mg) alloys are the lightest of engineering alloys and are increasingly used in fields such as aerospace, automotive, construction materials, and implant applications. In this study, Mg-2Zn magnesium alloy with good strength, formability, and absorption properties was used. To improve the mechanical properties of the cast Mg-2Zn alloy, two different alloys were obtained by adding 0.5% of the popular light Rare Earth Element (REE) La (lanthanum). The effects of La on the alloys were investigated using OM (Metallographic Examination), SEM (Scanning Electron Microscope), hardness, tensile, and wear tests. When the research results were examined, it was found that the addition of the La element to the Mg-2Zn alloy modified the Mg grain structure. Since the La element can dissolve in the Mg alloy, the addition of La weakened the texture. The La element dissolved in the matrix formed non-basal texture components. While the yield strength decreased by 17.62%, the tensile strength increased by 4.13%, and the elongation increased by 61.31%,

Giriş

Magnezyum (Mg) metali hafifliği ile önemli bir mühendislik malzemesi olarak göze çarpmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde mikroyapı karakterizasyonu, mekanik özellikler ve korozyon özelliklerin gelişimi çalışmaları geniş yer tutar. Bu kapsamda element ilavesi ile mikroyapıyı dizayn etme işlemi yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. Mg hafif alaşım olduğu için özellikle enerji tasarrufu, düşük karbon emisyonu, performans gibi birçok sebepten dolayı rağbet görmektedir. Mg doğada en yaygın olarak bulunan elementlerden biridir ve 8. sırada yer alır [O> Si> Al> Fe> Ca> Na> K> Mg], yer kabuğu kütlesinin yaklaşık %2.35'ini oluşturur ve aynı zamanda deniz suyunda en bol bulunan üçüncü çözülmüş mineraldir [1]. Düşük yoğunluğu (1.74 g/cm³), yüksek özgül mukavemeti ve mükemmel sönümleme kapasitesi nedeniyle magnezyum alaşımının otomobil ve havacılık endüstrilerinde geniş uygulama olanakları vardır [2]. Ayrıca Mg metali çinko (Zn) elementiyle alaşım haline getirildiğinde mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde çok faydalı sonuçlar meydana gelmektedir. Bu alaşımlar uçak, otomotiv, savunma ve elektronik sanayi sektörlerinde kullanılan, parçaların üretiminde kullanılır. Yıllar geçtikçe önemi daha çok artan Mg alaşımlarının geliştirilmesi için çok sayıda araştırmacı çalışmaktadır. Magnezyum alaşımlarının içinde karakteristik özellikleriyle göze çarpan temel alaşım sistemlerinden biri olan (Mg-Zn) alaşım sisteminin özel alaşımlarında biri olan Mg-2Zn alaşımı bu çalışmada kullanılmıştır. Mg-Zn içerikli Mg alaşımları orta seviyede mukavemet, korozyon dayanımı göstermektedir. Ayrıca yüksek seviyede şekillendirilebilme avantajıyla önemli bir Mg alaşımı olarak göze çarpar [3]. Gün geçtikçe zehirsiz elementler içerdiğinden, yüzeyine işlem yapılmadan kullanılabilen Mg-Zn tabanlı alaşımların, implantların yapım malzemesi alanında geniş bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir [3], [4]. Mg alaşımlarına nadir toprak elementi ilavesi ile ilgili çalışmalarında Calado ve arkadaşları, nadir toprak içeren Mg alaşımlarının, içermeyen magnezyum alaşımlarına kıyasla daha üstün korozyon direncine sahip olduğu bildirmişlerdir [5]. Benzer şekilde Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Nadir toprak elementlerinin Mg alaşımlarında tanelerin rafine edilmesi ve keskin bazal dokuları zayıflatılması ve şekil alabilme özelliğinin geliştirilmesinde büyük rol oynadığını bildirmişlerdir [6]. Bununla beraber, Li ve arkadaşları biyolojik olarak parçalanabilen metallerin özelliklerinin geliştirilmesinde alaşım elementleri olarak nadir toprak elementlerinin benzersiz atomik yapıları ve özellikleri sayesinde büyük ilgi çektiği belirtmişlerdir [7]. Tekin ve arkadaşları, Mg-Zn alaşımlarının biyolojik olarak emilebilen malzeme olarak ve kemik mekaniğine yakın özellikleri nedeniyle biyomedikal alanlarda uygulanmasında önünün açık olduğunu bildirmişlerdir [8]. Buna ilaveten, Bairagi ve arkadaşları Mg'nin Zn ile alaşımlanması ve ikincil ve üçüncül işlemler vasıtasıyla

özelliklerinin iyileştirilmesinin önemi artık dünya çapında kabul edildiğini ve biyomedikal magnezyum alaşımlarının alüminyum ve nadir toprak elementleri alaşımlandırma işlemlerinin yaygın olduğunu bildirmişlerdir [9]. Elen ve arkadaşı yaptıkları çalışmada Mg-2Zn alaşımları kuru ve korozif koşullardaki aşınma özellikleri incelenmişlerdir. Alaşımların mikroyapısında α -Mg ana matris, MgZn, Mg_2Zn_3 ve $MgZn_2$ fazlarını bulmuşlardır [10]. Koç ve Turan çalışmalarında simüle edilmiş vücut sıvısı içinde farklı yükler altında aşınma testlerinin sonuçlarını incelediklerinde, yaşlanma işleminin Mg-Zn alaşımlarının tribolojik özelliklerine olumlu yansıdığını rapor etmişlerdir [11]. Literatürde yapılan tüm bu çalışmalar Mg-2Zn alaşımlarının önemini göstermektedir. Eser miktarda La içeren Mg-Zn alaşımları nadiren rapor edilmiştir, ancak La'nın mikroyapıyı modifiye etmesi ve Mg-Zn alaşımlarının çökmesini uyarması çok muhtemeldir, çünkü kimyasal ve fiziksel özellikler bakımından çok benzerdirler [12]. Bu nadir toprak elementleri arasında Ce ve La, düşük maliyetli yüksek mukavemetli Mg alaşımları geliştirmek için kullanılma potansiyeli olan ucuz ve hafif nadir toprak elementleridir [13, 14]. Ayrıca, Alwakwak ve arkadaşları magnezyum alaşımlarında lantan gibi nadir toprak elementlerinin korozyon direncini artırdığını bildirmişlerdir [15]. Farklı çalışmalarda çok kullanılan La nadir toprak elementi Mg-Zn alaşımlarında çok az çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada son yıllarda yoğun ilgi gören Mg-2Zn alaşımına %0.5 oranlarda La elementi ilave edilecek ve bu ortaya çıkan yeni kombinasyon ile birlikte Mg-2Zn alaşımlarının dökümü Y blok tipi kalıp içerisine yapılacaktır. Döküm alaşımlardan tüm testler için numuneler alınacaktır. Alınan numuneler üzerinde; OM, SEM, çekme deneyi, sertlik testi ve aşınma deneyi yapılacaktır. Bu faydalı nadir toprak La elementini kullanarak Mg-Zn alaşımların mikroyapı, mekanik ve aşınma özelliklerine etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu sayede bilime ve sanayide çok kullanılan bu alaşımların daha iyi özelliklerle kullanılabilmesine katkı sunulacaktır.

Materyal ve Metot

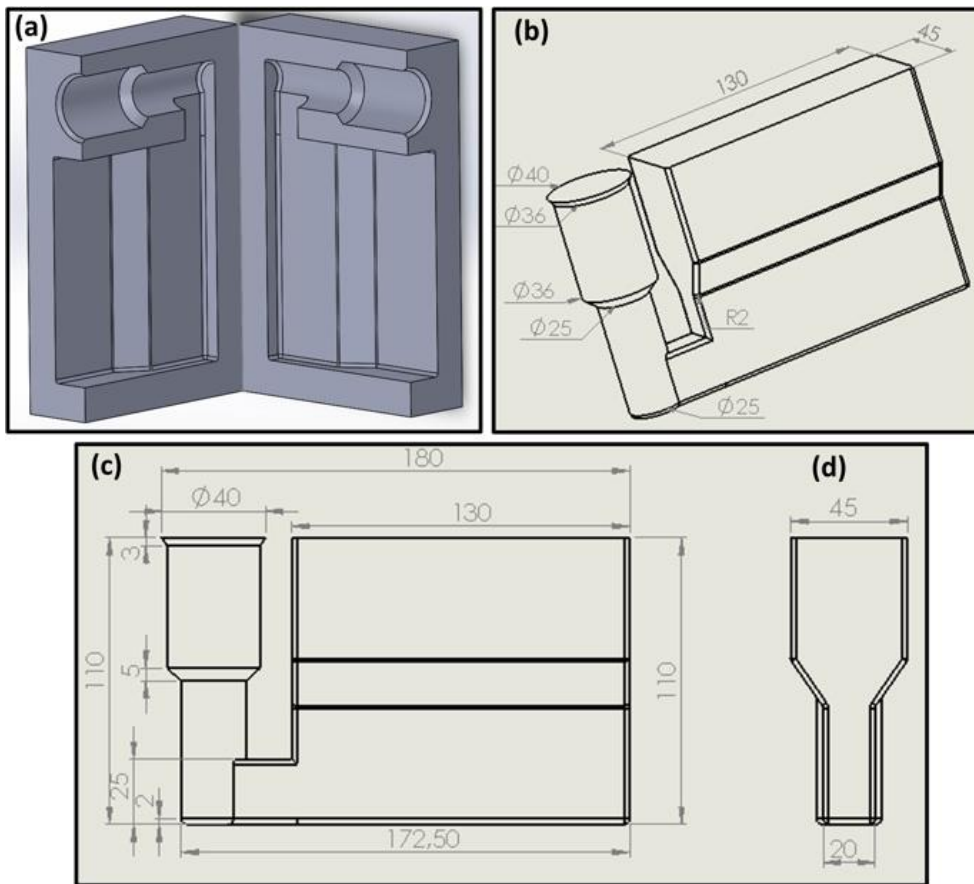
Alaşımların Kompozisyonu

Deneylerde kullanılacak alaşım için gerekli olan ~%99,9 saflıkta, magnezyum, çinko ve La elementleri temin edilmiştir. Mg alaşımları arasında kabul gören Mg-2Zn alaşım sistemi kullanılmıştır. Mg-2Zn alaşımına %0.5 La nadir toprak alaşım elementi ilave edilecektir. Alaşımların kompozisyonu tartılmış ve Tablo 1'de ağırlıkça % olarak gösterilmiştir. Ardından Mg indüksiyon ocağı içerisine yerleştirilmiş pota içerisine doldurulmuştur.

Tablo 1. Alaşımlarda bulunan kimyasal kompozisyon

Alaşımlar	Kimyasal kompozisyon (Ağırlıkça %)									
	Zn	Mn	Fe	La	Ca	Al	Si	Cu	Sr	Mg
Mg-2Zn	1.99	0.01	-	-	0.01	0.02	0.01	-	0.001	Kalan
Mg-2Zn+0.5La	2.10	0.02	-	0.55	0.01	0.01	0.01	-	0.01	Kalan

Alaşımların üretim aşamasında önce saf magnezyum külçeleri ~ 750 °C sıcaklığa kadar ergitilmiştir. Ardından Zn ve La alaşım elementleri eritme ocağının üst kısmındaki haznedan yüklenmiştir. Ergitme ve döküm sürecinde ortamın atmosfer ile temasını kesmek için kullanılan ocağın içine (Argon) ve kalıbın içine ($\text{CO}_2 + \text{SF}_6$) koruyucu gazlarının akışı devamlı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlere yakın bir çalışma Zhang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmada grafit bir pota kullanılmış ve eritme sıcaklığı olarak 750 °C tercih edilmiştir [16]. Tablo 1’deki kompozisyon içerikleriyle kalıp içerisine yapılan döküm işlemiyle Mg-2Zn ve Mg-2Zn+0.5 La alaşımları üretilmiştir. Döküm alaşımlardan çekme deneyi, sertlik, mikroyapı, SEM ve aşınma numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 1’de döküm yapılan kalıbın katı modeli gösterilmiştir.



Şekil 1. Döküm kalıbı teknik resmi: a) katı model, b) perspektif, c) ön görünüş, d) yan görünüş

Mikroyapı İnceleme Metodu

Metalografi deneyi için hazırlanan numuneler bakalite içine alınmıştır. Ardından numuneler öncelikle kaba zımpara kağıdı ile ardından sırasıyla 400, 600, 800, 1200, 2000 mesh SiC zımpara kâğıtlarıyla su ortamında zımparalanmıştır ve ardından saf su ile yıkanmıştır. Ardından, etanol yardımıyla yıkanmış ve ardından pikrik asit temelli dağlayıcı ile dağlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde mikroyapı incelemeleri Mühendislik Fakültesindeki mikro yapı laboratuvarındaki Nikon optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SEM Analizi

SEM ve EDX analizleri bakelite alınarak hazırlanan numuneler üzerinde Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü (MARGEM) laboratuvarında Vishay System 7000 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Malzemeyi meydana getiren elementlerin malzeme yüzeyinde oluşturduğu fazların nasıl dağılım gösterdiği SEM resimleri üzerinde yapılan incelemelerle belirlenmiştir.

XRD Deneyi

XRD testleri Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü (MARGEM) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. XRD testlerinde ekran görüntülerinde alaşımında bulunan fazlar belirlenmiştir. Ardından, bu fazların alaşımların mikroyapı, mekanik ve aşınma özellikleri üzerinde etkileri karşılaştırılmıştır.

Vickers Sertlik Testi

Vickers sertlik testi Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin, Metalürji ve Malzeme Laboratuvarındaki Vickers sertlik testi cihazında 0.3 kg yük kullanılarak yapılmıştır. Sertlik testinde malzeme üzerindeki 5 farklı bölgenin sertliği ölçülmüştür ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir.

Çekme Testi

Çekme testinin doğru olarak belirlenebilmesi için her alaşımdan 3'er tane ISO 6892-1 standardına göre 5 mm çap ile 25 mm master boyuna sahip çekme numune örnekleri hazırlanmıştır. Ardından, çekme testi yapımında Zwick/Roell Z600 çekme cihazı kullanılmıştır. Testler $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ çekme hızı ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü (MARGEM) laboratuvarında yapılmıştır. Uygulanacak mekanik testler alaşımların çekme dayanımı, akma dayanımı, % uzama değerlerini belirleyecektir.

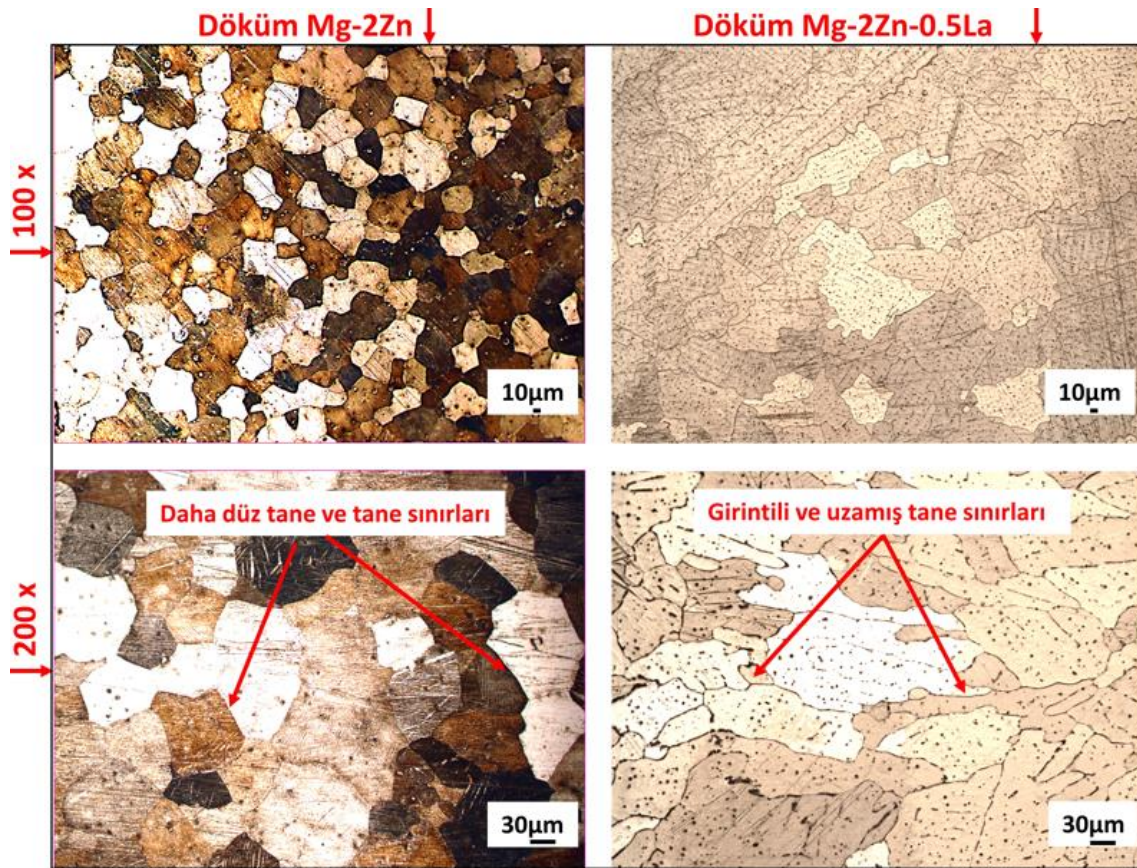
Aşınma Deneyi

Aşınma deneyleri Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında yapılmıştır, Batıcı uç olarak AISI 52100 kalitede, yüksek sertlik değerine sahip çelik bilyeli batıcı uç uygulanmıştır. Aşınma testleri %3.5 NaCl ortamında, 20N yükün altında, 0.1 m/s kayma hızı ile toplamda 400 metre kayma mesafesi ile yapılmıştır. Spesifik aşınma oranı katsayısı $(\text{g}/(\text{m.N})).(10^{-5})$ eşitliğinin kullanımıyla hesap edilmiştir. Aşınma hızı $(\text{g}/(\text{m.N})).(10^{-5})$ eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte (N=Newton), (m=metre), (g=gram) olarak kullanılmıştır.

Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Metalografik İnceleme (Optik Mikroskop)

Metalografi incelemelerinde 400, 600, 800, 1200, 2000 mesh SiC zımpara kâğıdı ile su ortamında zımparalanan dağlanan, saf su ve alkol ile temizlenip kurutulan numunelerin optik mikroskop ile mikro yapılarının incelenmesi yapılmıştır. Şekil 2’te görülen mikro yapı resimleri incelendiğinde Mg-2Zn alaşımına %0.5 La ilavesi ile düz hatlara sahip olan tane sınırlarının girintili çıkıntılı bir hal aldığı görülmüştür. Ayrıca tane yapısında uzama benzeri değişimler oluşmuştur. Magnezyum alaşımlarında La ilavesi ile tane sınırı çizgileri, intermetalik faz oluşumunu destekleyen daha tırtıklı bir hal almıştır [15].

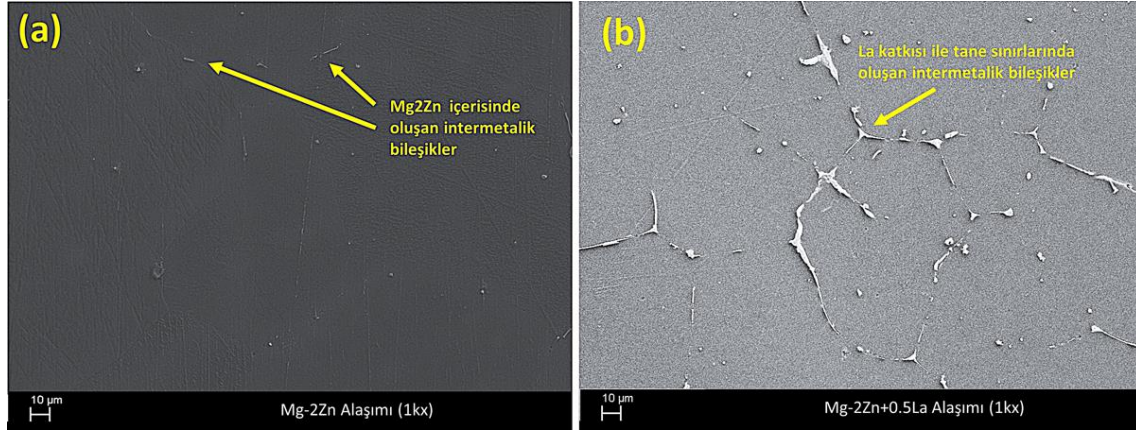


Şekil 2. Optik mikroskop görüntüleri.

SEM Analizi

SEM analizi görüntüleri malzemeyi meydana getiren kimyasal bileşenlerin dağılımı hakkında fikir verir. Şekil 3’teki SEM analizi görüntüleri incelendiğinde Mg-2Zn alaşımına La ilavesinin katılma sistemini, çekirdeklenme oranını, tane yapısını nasıl değiştirdiği, ayrıca tane sınırlarında intermetalik bileşiklerin olduğu gözlemlenmektedir. Mg-2Zn alaşımına La ilavesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. La nadir toprak elementinin Mg alaşımları üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışmada, bu çalışmadakine benzer SEM görüntüleri olduğu görüldü ve buna ek olarak Mg-Zn-Ca

alaşımının termal kararlılığı Ce/La ilavesiyle etkili bir şekilde geliştirilebileceği belirtilmiştir. Termal kararlılığı Ce/La ilavesiyle etkili bir şekilde geliştirilebileceği konusu düşük erime noktalı ikili Mg-Zn fazı daha yüksek termal kararlılığa sahip Mg_xZn_y -Ca-(Ce/La) fazına dönüştürüldüğü ve $Ca_2Mg_6Zn_3/\alpha$ -Mg ötektik yapı miktarının azaldığı sonucuna dayandığı rapor edilmiştir. Ayrıca La/Ce içeren Mg-Zn-Ca-xCe/La alaşımlarının çözelti işlem süresi (saat) arttıkça tane yapısı değişmektedir [17]. Gören ve arkadaşları bu alaşıma ek olarak %1 mangan ilaveli döküm Mg-2Zn-1Mn alaşımlarında La ilavesiyle tane sınırında intermetalik oluşumu ve kısmı olarak tanelerin uzadığını rapor etmişlerdir [3].

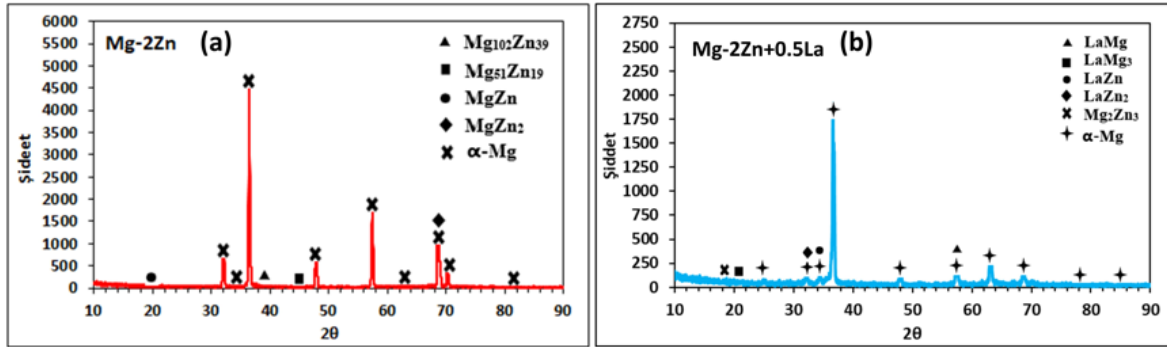


Şekil 3. SEM görüntüleri: a) Mg-2Zn, b) Mg-2Zn+0.5La

XRD Deneyi

Döküm Mg-2Zn alaşımına ek alaşım elementi %0.5 La ilave edildi ve katılan bu elementin alaşımın mikroyapısında oluşturduğu yeni fazlar incelendi. Şekil 4'te gösterilen (XRD) X-ışını kırınımı sonuçları alaşımda tespit edilen fazları göstermektedir. Mg-Zn alaşımında $Mg_{102}Zn_{39}$, $Mg_{51}Zn_{19}$, MgZn, $MgZn_2$, α -Mg fazları XRD ekran görüntüsü sonuçlarda görülmüştür. Mg2Zn+0.5La alaşımında LaMg, LaMg₃, LaZn, LaZn₂, Mg_2Zn_3 , α -Mg fazları ekran görüntüsünden tespit edilmiştir. Alaşımlarda oluşan bu fazların alaşımların özelliklerini etkilediği yapılan sertlik, çekme, aşınma testlerinde görülmüştür. Literatürdeki bir çalışmada α -Mg, MgZn, $Mg_{17}La_2$ ve bilinmeyen fazlar tespit edildiği rapor edilmiştir [17]. Literatürde bir Mg-Zn-Ca-La alaşımının deformasyon sırasındaki dinamik çökeltme davranışı incelenmiştir. Deformasyondan sonra dinamik çökeltmenin meydana geldiğini gösteren büyük miktarda ince çökelti tespit edilmiş. Tane sınırlarındaki çökeltelerin $Ca_2Mg_6Zn_3$ ve Mg_4Zn_7 içerirken, taneler arası çökelteler esas olarak Mg_4Zn_7 olduğunu rapor etmişlerdir. Mg ile benzer bir difüzyon katsayısına sahip olan Zn, Mg_4Zn_7 'nin matris etrafında dağılmasıyla sonuçlandığını ve tane sınırı çökeltlerinin, tane büyümesine karşı etkili engeller olarak hareket etmiş ve rafine bir mikroyapı oluşumuna yol açtığı belirtilmiştir. Tane içi Mg_4Zn_7 çökeltleri dislokasyonların hareketliliğini engelleyerek mekanik özellikleri iyileştirdiği rapor edilmiştir [18]. Literatürde başka bir çalışmada La-Mg-Zn faz diyagramı deneysel olarak incelenmiş ve ilgili izotermal bölüm kısmen belirlenmiştir. Bu bölüm, ikili bileşiklere (LaMg, LaZn, LaMg₃, LaMg_{10.3} ve La₂Zn₁₇) ve üç üçlü faza ($La_3(MgZn)_{11}$, $La_{4.27}Mg_{2.89}Zn_{30}$ ve

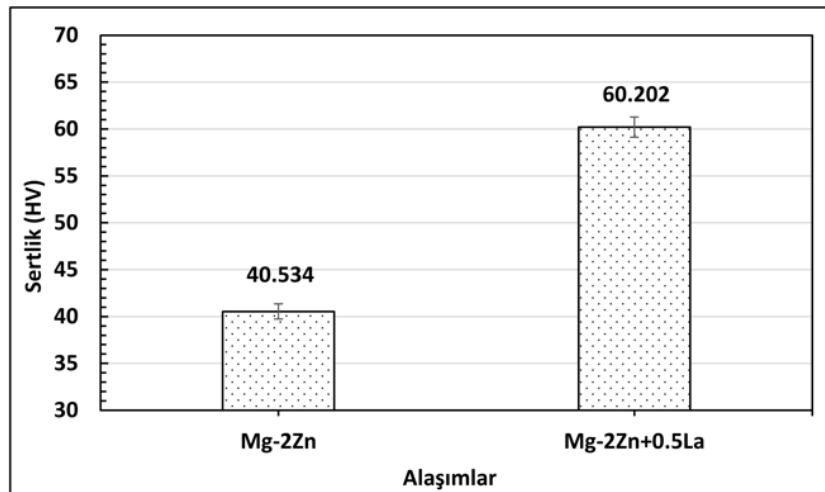
$\text{La}_8(\text{MgZn})_{92}$ dayanan 5 ikame katı çözeltiyi içerdiği rapor edilmiştir [19]. Bir diğer çalışmada LaMg_3 , Mg_2La , $\text{La}_2\text{Mg}_{17}$ fazlarının varlığı bildirilmiştir [3, 15].



Şekil 4. Alaşımların XRD sonuçları: a) Mg-2Zn, b) Mg-2Zn+0.5La

Vickers Sertlik Testi

Vickers sertlik testinde yapılışında, malzeme yüzeyindeki 5 farklı bölgeden sertlik ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak en doğru sertlik ölçüsü tespit edilmiştir. Şekil 5'te Mg-2Zn+0.5 La alaşımının sertliği Mg-2Zn alaşımından yaklaşık %48 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. %0.5 La ilavesiyle tane sınırlarında ve matriste intermetalik bileşiklerin oluşması çekirdeklenme aşamasını ve tane yapısını modifiye etmiştir. Literatürde La/Ce içeren Mg-Zn-Ca-xCe/La alaşımlarının çözelti işlem süresi uzadıkça tane yapısı kısmı ölçüde korunduğu, fakat La/Ce içermeyen alaşımların tane yapısının saatler geçtikçe modifiye edildiği rapor edilmiştir [17]. Bir diğer çalışmada ise La ilave miktarının artması ile sertliğin arttığı gösterilmiştir [15].

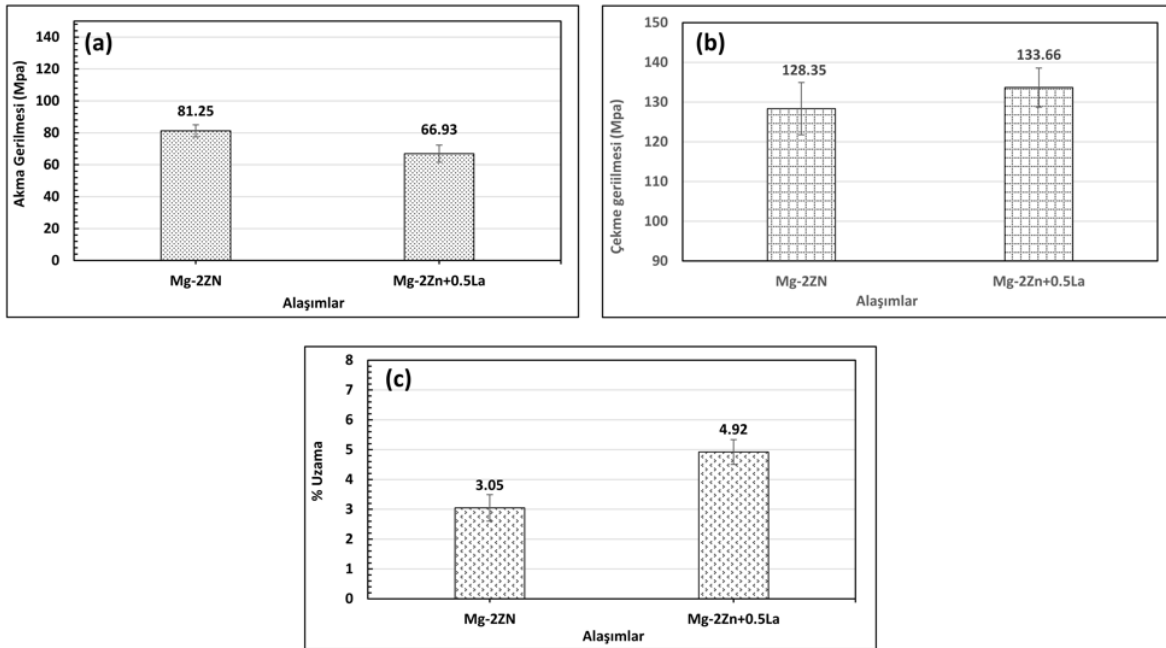


Şekil 5. Alaşımların sertlik değerleri

Çekme Testi

Çekme testinin doğru olarak belirlenebilmesi için her alaşımdan en az 3'er tane çekme numunesi hazırlanmış ve çekme testi 5 tonluk çekme kapasitesinde ayarlanan çekme cihazı ile 0.5 mm/dk çekme hızı ayarında, gerçekleştirilmiştir. Uygulanacak çekme testi alaşımların çekme dayanımı, akma

dayanımı, % uzama değerlerini belirlemiştir. Şekil 6'de görülen çekme gerilmesi ve % uzama değerleri sırasıyla yaklaşık %4.13 ve %61.31 oranında artarken, akma gerilmesi %17.62 azalmıştır. Literatürde $Mg_{80}Gd_{20}$ (NTE = La veya Ce, ağırlıkça %) alaşımları döküm yoluyla hazırlanmıştır. Mikroyapılar, yaşlanma sertleşme davranışı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Sonuç olarak $Mg_{80}Gd_{20}$ alaşımına ağırlıkça %1 La veya Ce ilavesinin dentrit kol aralığını azalttığını ve mekanik özellikleri ve yaşlanma sertleşmesi tepkisini hafifçe iyileştirdiği rapor edilmiştir [20]. Döküm halindeki numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde ZM21'e göre La ve Ca ilaveli alaşımların mekanik özellikleri çok az daha düşük değerlere sahiptir [3]. Fakat literatürdeki bir çalışmada La ile alaşımlamanın dinamik yeniden kristallenmeyle tane yapısı üzerinde rafine edici etki ettiğini ve bunun sebebi olarak α -Mg alaşımında La'nın çözünmüş atom olmasını ve La ilavesinin dokuyu zayıflatıldığını bildirmişlerdir. Matriste La'nın çözünmüş atomlar şeklinde var olması bazal olmayan doku bileşeni oluşmasını tetiklediğini açıklanmışlardır. $Mg_{60}Zn_{40}$ -0.2La alaşımında %35'e varan uzama özelliği ile üstün bir süneklik sergilemiştir. Bu durum alaşımın zayıflayan bağ dokusuyla ilişkili idi. Ancak La içeriği %1 olunca sünekliğin azaldığı bildirilmiştir. Az miktarda La ilavesinin tercih edilmesinin daha iyi olduğu bulunmuştur [21].

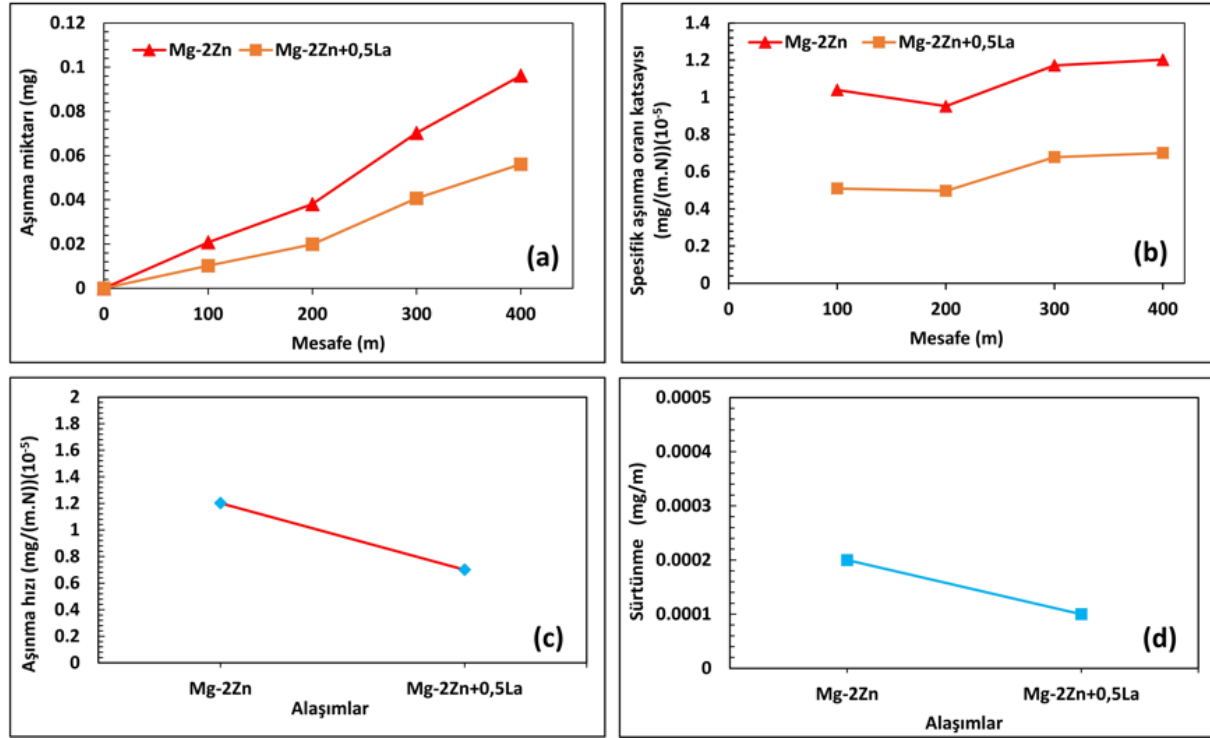


Şekil 6. Alaşımların a) Akma gerilmesi b) Çekme gerilmesi c) % Uzama değerleri

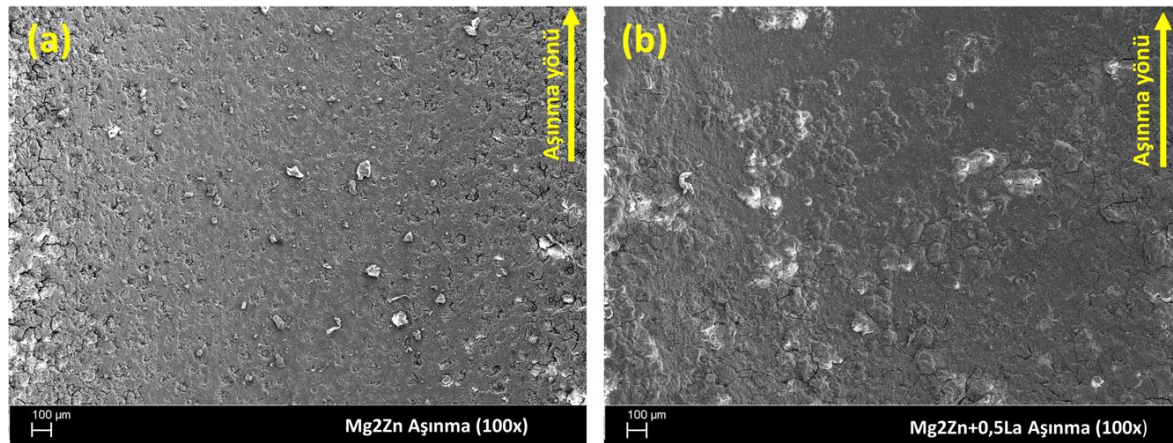
Aşınma Deneyi

Aşınma deneyi 20N yük altında 400 metre mesafede yapılmıştır. Şekil 7'de $Mg_{20}Zn_{80}$ alaşımının aşınma oranı $Mg_{20}Zn$ alaşımına göre %41.68 oranında azalmıştır. Bu durum La ilavesiyle oluşan intermetalik bileşiklerin alaşımın mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisinin alaşımın aşınma davranışlarına pozitif yansması olarak açıklanabilir. Şekil 8'da aşınma testi yapılan alaşımların SEM

resimleri görülmektedir. SEM resimleri incelendiğinde Mg-2Zn+La alaşımının aşınmaya direnç gösteren bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Mg-2Zn alaşımının yüzeyi ise daha düz ve daha kolay aşındığı görülmektedir. Literatür incelendiğinde Kararlı oksit yüzey tabakalarının oluşumu ve La içeren alaşımın gelişmiş sertliği nedeniyle, farklı uygulanan normal yüklerde aşınma oranının Mg-10Dy alaşımından önemli ölçüde daha düşük olduğu rapor edilmiştir [22].



Şekil 7. Alaşımların (a) Aşınma miktarı, (b) Spesifik aşınma oranı katsayısı, (c) Aşınma hızı, (d) Sürtünme değerleri



Şekil 8. Alaşımların aşınma SEM görüntüleri.

Sonuçlar

Bu proje, La ilavesinin Mg-2Zn alaşımının mikroyapı, mekanik özelliklerine 20N yük sabit yük, sabit hız ve sabit mesafe kullanılarak aşınma davranışı üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmaktadır. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Mg-2Zn alaşıma La ilavesi ile alaşımanın tane sınırlarında ve matriste LaMg, LaMg₃, LaZn, LaZn₂, fazlarının varlığı belirlenmiştir.
2. Mg-2Zn alaşıma La ilavesi ile elde edilen Mg-2Zn+La alaşımasının sertliği %48.53 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
3. La ilavesi Mg tanelerinin dokusunu zayıflamış ve bazal olmayan dokuları oluşturarak üstün bir süneklik sergilemiştir.
4. Mg-2Zn+La alaşımasının Mg-2Zn alaşıma çekme gerilmesi ve % uzama değerleri sırasıyla yaklaşık %4.13 ve %61.31 oranında artarken, akma gerilmesi %17.62 azalmıştır.
5. Mg-2Zn+La alaşımasının aşınma oranı Mg-2Zn alaşıma göre %41.68 oranında azalmıştır.
6. %0.5 La nadir toprak elementinin ilavesinin, Mg-2Zn alaşımı üzerinde olumlu sonuçlar ortaya çıkardığı belirlenmiştir.

Teşekkür Yazarlar Karabük Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederler.

Fon/Finansman Bilgileri Çalışma, Karabük Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından KBÜBAP-23-DS-131 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Etik Kurul Onayı ve İzinler Çalışma, etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar Çatışmaları/Çatışan Çıkarlar Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Yazarların Katkısı Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamış, makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Kaynaklar

- [1] Xu, T. Yang, Y. Peng, X. Song, J., & Pan, F. (2019). Overview of advancement and development trend on magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys.*, 7(3), 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.08.001>
- [2] Mordike, B., & Ebert, T. (2001). Magnesium: Properties applications potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- [3] Gören, H. A. Ünal, M. Türen, Y., & Ahlatçı, H. (2021). ZM21 Magnezyum alaşıma lantan ve kalsiyum ilavesinin mikroyapı, mekanik ve hadde özelliklerine etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilim. Dergisi*, 8(2), 1024–1031. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1003822>
- [4] Zhang, E. Yin, D. Xu, L. Yang, L., & Yang, K. (2009). Microstructure, mechanical and corrosion properties and biocompatibility of Mg–Zn–Mn alloys for biomedical application. *Materials Science and Engineering: C*, 29(3), 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.08.024>
- [5] Calado, L. M. Carmezim, M. J., & Montemor, M. F. (2022). Rare earth based magnesium alloys A review on WE series. *Frontiers in Materials*, 8, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.804906>
- [6] Li, X. Liu, C. Wang, J., & Zhang, C. (2021). Tailoring the strength and formability of Mg alloys through rare earth element additions (Gd and Dy) and dynamic recrystallizations. *Materials Today Communications*, 28, 102627. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102627>

- [7] Li, H. Wang, P. Lin, G., & Huang, J. (2021). The role of rare earth elements in biodegradable metals: A review, *Acta Biomaterialia*, 129, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.05.014>
- [8] Tekin, R. Demir, B., & Saud, A. N. (2025). Tribological behavior of MgZn alloys produced by powder metallurgy: influence of Zn in dry and simulated body fluid environments. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34, 27901–27924. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11192-8>
- [9] Bairagi, D., & Mandal, S. (2022). A comprehensive review on biocompatible Mg-based alloys as temporary orthopaedic implants: Current status, challenges, and future prospects. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(3) 627–669. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.005>
- [10] Elen, L., & Çevik Elen, N. (2025). Effect of cooling rate on microstructure, mechanical and wear properties of Mg-2Zn and Mg-2Zn-1Mn alloys, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 64(1), 61–76. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2331372>
- [11] Koç, E., & Turan, M. E. (2019). Effect of Zn content and heat treatment on tribological behavior of biodegradable Mg-xZn alloys in simulated body fluid. *Materials Research Express*, 6(8), 0865b5. doi: 10.1088/2053-1591/ab1955.
- [12] Rokhlin, L. L. (2003). *Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals*. CRC Press, London, (pp. 256). <https://doi.org/10.1201/9781482265163>
- [13] Du, Y. Z. Qiao, X. G. Zheng, M. Y. Wu, K., & Xu, S. W. (2015). Development of high-strength, low-cost wrought Mg–2.5mass% Zn alloy through micro-alloying with Ca and La. *Materials & Design*, 85, 549–557. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.029>
- [14] Wu, W. Wang, Y. Zeng, X. Chen, L., & Liu, Z. (2003). Effect of neodymium on mechanical behavior of Mg-Zn-Zr magnesium alloy. *Journal of Materials Science Letters*, 22(6), 445–447. <https://doi.org/10.1023/A:1022911728702>
- [15] Alwakwak, M. A. I., Esen, I., Ahlatcı, H., & Keskin, E. (2023). Effect of Rare Earth Elements (Y, La) on Microstructural Characterization and Corrosion Behavior of Ternary Mg-Y-La Alloys. *Materials (Basel)*, 16(14) 5141. <https://doi.org/10.3390/ma16145141>
- [16] Zhang, S., Shaoxiang, Z., Xiaonong, Z., Changli, Z., Jianan, L., Yang, S., Chaoying, X., Hairong, T., Yan, Z., Yaohua, H., Yao, J., & Yujun, B. (2010). Research on an Mg–Zn alloy as a degradable biomaterial. *Acta Biomaterialia*, 6(2), 626–640. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.06.028>
- [17] Zhang, Q., Tong, L., Cheng, L., Jiang, Z., Meng, J. & Zhang, H. (2015). Effect of Ce/La microalloying on microstructural evolution of Mg-Zn-Ca alloy during solution treatment. *Journal of Rare Earths*, 33(1), 70–76. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60385-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60385-9)
- [18] Du, Y. Ge, Y., & Jiang, B. (2019). Dynamic Precipitation Behavior of a Mg-Zn-Ca-La Alloy During Deformation. *JOM*, 71(7), 2202–2208. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03468-x>
- [19] Berche, A., Benigni, P., Rogez, J., & Record, M.-C. (2014). Thermodynamic investigations in the solid state of the lanthanum–magnesium–zinc system. *Intermetallics*. 45, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.10.003>
- [20] Peng, Q., Wang, J., Wu, Y., Meng, J., & Wang, L. (2008). The effect of La or Ce on ageing response and mechanical properties of cast Mg–Gd–Zr alloys. *Materials Characterization*, 59(4), 435–439. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.02.013>

- [21] Du, Y., Zheng, M., Qiao, X., Peng, W., & Jiang, B. (2016). Effect of La addition on the microstructure and mechanical properties of Mg–6wt% Zn alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 673, 47-54, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.022>
- [22] Prasad, A., Jain, J., & Gosvami, N. N. (2021). Effect of minor La addition on wear behaviour of Mg-10Dy alloy. *Wear*, 486–487, 204121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204121>