

Araştırma Makalesi – Research Article

ZM21 Magnezyum Alaşımına Lantan ve Kalsiyum İlavesinin Mikroyapı, Mekanik ve Hadde Özelliklerine Etkisi

The Effect of Lanthane and Calcium Additional to ZM21 Magnesium Alloy on Microstructure, Mechanical and Rolling Properties

Halil Ahmet Gören^{1*}, Mehmet Ünal², Yunus Türen³, Hayrettin Ahlatçı⁴

Geliş / Received: 02/10/2021

Revize / Revised: 01/11/2021

Kabul / Accepted: 04/11/2021

ÖZ

Bu çalışmada ZM21 Magnezyum (Mg) alaşımına La ve Ca ilavesinin döküm ve hadde sonrası mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde haddeleme sonrasında La ilaveli alaşımda taneler incelirken ikincil fazların bir miktar hadde yönünde uzadığı görülmüştür. Bundan farklı olarak Ca ilaveli alaşımda oluşan fazların haddeleme esnasında kırıldığı tespit edilmiştir. XRD sonuçlarına göre alaşımlarda MgZn, MgZn₂, MgZn₃, C5Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃, LaZn₂, LaMg₃ fazlarının oluştuğu görüldü. Daldırma korozyon özelliğine bakıldığında ZM21 Mg alaşımına kıyasla ZM21+0,5(La) Mg alaşımının hem döküm hem hadde olarak daha az ağırlık kaybı yaşanmıştır. Fakat döküm halinde ZM21+0,5(Ca) alaşımı daha düşük, haddelenmiş olarakta çok daha fazla ağırlık kaybı sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler- Mg Alaşımları, ZM21, Döküm, Hadde

ABSTRACT

In In this study, the microstructure, mechanical and corrosion properties of La and Ca addition to ZM21 Magnesium (Mg) alloy after casting and rolling were investigated. When the microstructure results were examined, it was observed that the secondary phases elongated a little in the rolling direction, while the grains were thinner in the La added alloy after rolling. Differently from this, it was determined that the phases formed in the Ca-added alloy were broken during rolling. According to XRD results, it was observed that MgZn, MgZn₂, MgZn₃, C5Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃, LaZn₂, LaMg₃ phases were formed in the alloys. Considering the immersion corrosion property, ZM21+0.5(La) Mg alloy experienced less weight loss in both casting and rolling compared to ZM21 Mg alloy. however, ZM21+0.5(Ca) alloy exhibited lower weight loss in cast form and much greater weight loss in rolled form.

Keywords- Mg Alloys, ZM21, Casting, Rolling

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: agoren@sinop.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4455-4024>)

Mekatronik Programı, Sinop Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Sinop, Türkiye

²İletişim: munal@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3836-4566>)

İmalat Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

³İletişim: ytüren@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8755-1865>)

Metaller ve Malzeme Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

⁴İletişim: hahlatci@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6766-4974>)

Metaller ve Malzeme Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

I. GİRİŞ

Magnezyum mühendislik malzemesi olarak kullanılan metalik malzemelerin en hafifidir. Magnezyum alaşımları düşük yoğunluk, kolay geri dönüşüm, bol kaynak ve korozyon direnci gibi spesifik özellikleri ile bilinir [1]. Magnezyum spesifik olarak mukavemet ve işlenebilirlik gibi üstün özelliklerinden dolayı çok etkili bir malzeme olup kontrollü atmosfer altında iyi dökülebilirliğe sahiptir [2]. Mg-Zn alaşımları, orta düzeyde mukavemet ve korozyon direnci ile birlikte yüksek şekillendirilebilirlik ana avantajı ile en umut verici Mg alaşımları arasındadır [3]. Son zamanlarda, toksik olmayan elementler içerdiği için yüzey işlemi gerektirmeyen Mg-Zn serisi alaşımlar, implant malzemeleri olarak büyük potansiyel göstermiştir. Bununla birlikte, büyük miktarda alaşım elementinin eklenmesi, özellikle Zn içeriği ağırlıkça % 3' ten büyük olduğunda, korozyon direncinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür [4]. ZM21 alaşımı, biyo-uyumluluk özelliklerinden dolayı implant için en uygun aday malzemelerden biri olup [5] şekillendirilebilirlik açısından iyidir [6]. Literatürde Ca gibi elementlerin ZM21'e eklenmesi ile ilgili az sayıda çalışma bulunurken, La elementinin ZM21 Mg alaşımının haddelenebilirliği üzerindeki etkisine dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma, La, Ca, katkılı ZM21 alaşımlarının özelliklerinin hem döküm hem de haddelenmiş durumda karşılaştırmalı bir incelemesini sunmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

A. Alaşımlama Metodu

ZM21 Magnezyum alaşımlarına % 0,5 oranında La ve Ca elementleri ilave edilmiş ve indüksiyon ocağına yüklenerek 750 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Ergitme işlemi esnasında ortamın atmosferle temasını kesmek için koruyucu gaz olarak pota içerisinde sürekli Argon ve CO₂+SF₆ gazı akışı sağlanmıştır. Ergitme tamamlandıktan sonra Gravity yöntemi ile metal Y kalıba döküm yapılmıştır.

B. Haddelene Metodu

Ardından döküm parçalar kalıptan çıkarılmış ve uygun bölgelerden kesilerek haddelenecek kısımlar 400 °C 16 saat homojenleştirilmiştir. Böylece iç gerilmeler giderilmiştir. Sonrasında 350°C olarak seçilmiş haddelene sıcaklığında ve %80 haddelene oranı, 4,7 haddelene hızı, Numunelere geçiş başına yaklaşık olarak $\phi = 0.2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanmıştır. 10 mm'den 2 mm'ye kadar 8 paso ile haddelene işlemi yapılmıştır [7,8].

C. Numune Hazırlama Metodu

Sonrasında elde edilen numunelerden döküm ve hadde olarak optik mikroskop ile metalografik inceleme yapılması için numunelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1200 ve 2000 mesh zımparalar ile saf su yardımıyla zımparalanmıştır. Ardından 1 µm alümina kullanılarak numunelerin yüzeyleri parlatılmış, saf su ve alkolle numunelerin yüzeyi durulanmış ardından kurutulmuştur.

D. Mikroyapı Gözlem Metodu

Daha sonra yüzeyi kurutulmuş numuneler pikrik asit ile dağlama işlemi yapılmış, dağlanan numuneler tekrar sırasıyla saf su, alkol ile temizlenip kurutulmuş ve Nikon marka optik mikroskopta inceleme yapılmıştır. Ardından Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı ile SEM görüntüleri ve EDX analizleri alınmıştır. Döküm sonrası tüm numunelerin XRD profilleri Rigaku Ultima IV marka cihaz ile 10°-90° tarama açısı aralığında ve 3°/dakika tarama hızında yapılmıştır.

E. Sertlik Ölçme Metodu

Döküm, homojen ve haddelene numunelerinin sertlikleri Vickers sertlik testi ile ölçülmüştür. Vickers sertlik testinde 0,3 kg yük altında piramit şekilli batıcı uç ile 15 saniye bekletilmiş ve iz çapları ölçülerek sertlik değerleri belirlenmiştir.

F. Çekme Test Metodu

Döküm alaşımlarından 5 mm çapında ve 25 mm ölçü uzunluğunda köpek kemiği şeklindeki çekme numuneleri, EN ISO 6892-1'e göre işlenirken, haddelenmiş alaşımların çekme numuneleri, haddelene yönleri boyunca ASTM E8 M-04'e göre hazırlanmıştır. Numunelere yapılan Çekme testleri Zwick/Roell Z600 çekme cihazında, 1,67x10⁻³ s⁻¹ çekme hızında ve oda sıcaklığında uygulanmıştır. Her test koşulu en az üç kez tekrarlanmıştır.

G. Daldırma Korozyon Deney Metodu

%3,5 NaCl ile karıştırılmış saf su içerisinde 72 saat bekletilerek daldırma korozyon testi yapılmıştır. 3 saat ara ile numuneler kavanozlardan çıkarılarak sırasıyla saf su, kromik asit, alkol ile temizlendikten sonra ultrasonik titreşimli temizleme cihazında 10'ar dakika bekletilmiştir ve sonrasında tartılmış ardından tekrar %3,5 NaCl içine konmuştur. Bu işlemler 72 saat tamamlanıncaya kadar devam etmiştir.

H. Potansiyodinamik Korozyon Deney Metodu

Potansiyodinamik polarizasyon testleri %3,5 NaCl içerisinde, bilgisayar kontrollü DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat ile yapılmıştır. Deneyin yapılışında karşıt elektrot için grafit çubuk, referans elektrot için doymuş kalomel elektrot (SCE) kullanılmış ve çalışma elektrodu olarak numune yüzeyinin kullanılarak klasik üç elektrotlu hücre kullanılarak yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri, 1 mV.s⁻¹ tarama hızında, -0,25 V (vs. açık devre potansiyeli, Eoc) +0,25 V (vs. Eoc) aralığında tarama ile oluşturulmuştur. Her parametre için 3 tane potansiyodinamik polarizasyon testi yapılmış ve bulunan sonuçların ortalaması alınmıştır.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. XRF Sonuçları

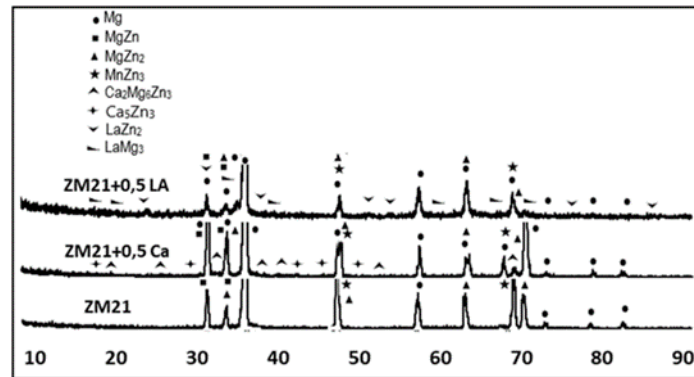
Üretilen alaşımların döküm sonrası kimyasal bileşimleri XRF X-Işınları Floresans yöntemi ile Rigaku ZSX Primus II marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemde floresans adı verilen her bir elemente özgü farklı dalga boylarına sahip ikincil ışımalarından faydalanarak alaşım elementlerinin ağırlık % oranları belirlenmiştir. Alaşımların döküm sonrası yapılan XRF testleri sonucunda elde edilen kimyasal bileşimleri Tablo1.'de görülmektedir.

Tablo 1. Alaşımın kimyasal kompozisyonu

Alaşımlar	Kimyasal Bileşim (Ağırlıkça %)				
	Zn	Mn	La	Ca	Mg
ZM21	2,053	0,512	-	0,031	Kalan
ZM21+%0,5 Ca	2,192	1,296	-	0,716	Kalan
ZM21+%0,5 La	2,027	1,146	0,679	0,063	Kalan

B. XRD Sonuçları

ZM21 alaşımının döküm olarak alınmış numuneden yapılan XRD testi sonuçları Şekil 1.'de verilmiştir. Alaşımların mikroyapısında Mg, MgZn, MgZn₂, MgZn₃, C₅Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃, LaZn₂, LaMg₃ ikili ve üçlü fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde çalışmamızda tespit edilen fazların benzer çalışmalarda da tespit edildiği gözlemlenmiştir [9-14].



Şekil 1. ZM21 Alaşımının XRD sonuçları.

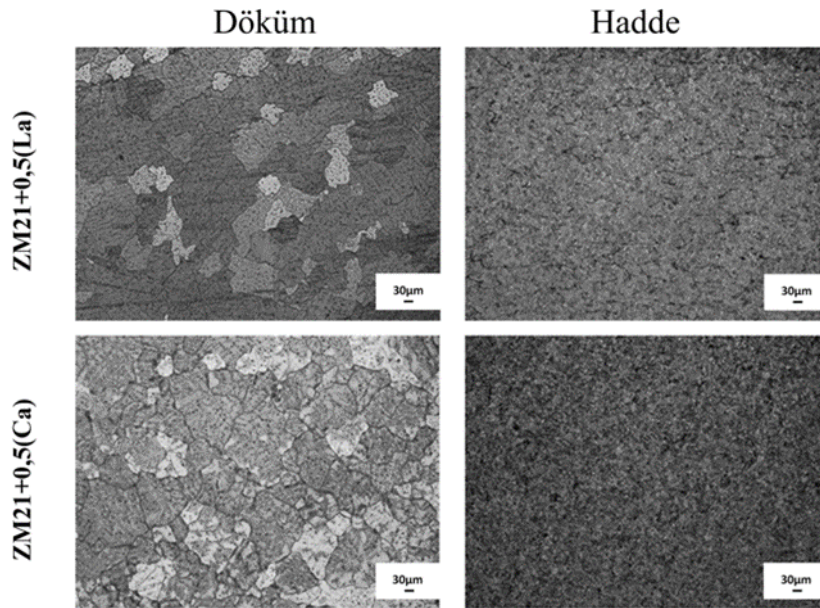
C. Mikroyapı ve SEM Sonuçları

Döküm ve haddelenmiş alaşımlara baktığımızda alaşımlardaki α -Mg ortalama tane büyüklüğü Şekil 2.'deki mikroyapılarda görülmektedir. Dökme alaşımlarda La ilavesi ile ortalama tane büyüklüğü, tane şekilleri ve matriste bir değişim olduğu görülmektedir. Ca ilavesi ile de tanelerde ve matriste bir değişim olmuştur. Haddelenmeden sonra tane boyutu incelmış ve hadde yönünde kesme bantları olduğu düşünülen izler meydana geldiği görülmüştür.

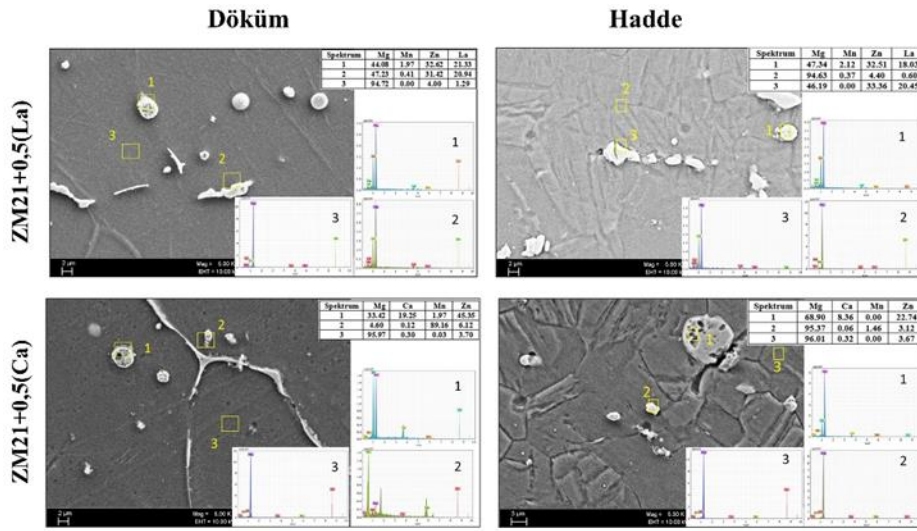
Şekil 3'de verilen sem görüntüleri incelendiğinde La ilavesi ile matris içerisinde oluşan fazların haddeme ile uzadığı görülmektedir. Ca ilaveli alaşıma baktığımızda matris ve tane sınırlarında fazların oluştuğu görülmektedir. Haddeme ile bu fazların kırıldığı açıkça görülmektedir. Bu duruma Ca ilavesi ile meydana gelen sertlik ve düşük akmanın neden olduğu düşünülmektedir.

Literatürdeki Mg-Zn-Mn alaşımlarının mikroyapısı ile ilgili benzer bir çalışmada farklı Zn içeriğine sahip Mg-Zn-Mn-Ca alaşımlarının optik mikrografları gösterilmiştir. Döküm halindeki Mg-Zn-Mn-Ca alaşımlarının Zn içeriği arttıkça tane boyutunun azaldığını göstermiştir. İkincil faz, tane sınırında esas olarak şerit benzeri dağılırken, bazı tanecikli fazlar matriste bulunmuştur. Zn içeriğinin artmasıyla ikincil fazların miktarının arttığı gözlenmiştir. EDX analizleri incelenen çalışmada, tane sınırındaki ve matristeki ikincil fazların her ikisinin de Mg, Zn ve Ca elementlerinden oluştuğu belirtilmiştir [15].

Diğer bir çalışmada haddeme sıcaklığı ve geçiş başına azalma, ZME200 alaşımının deformasyon mekanizması ve nihai mikro yapısı üzerinde büyük etkilere sahiptir. Deformasyon ikizlenmesi, daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek kalınlık azalmalarında daha aktiftir ve daha ince mikro yapıya yol açar. Haddelenmiş ZME200 alaşımında oluşturulan doku, enine yöne geniş yayılıma sahip tipik bir bazal dokudur. Tavlama sırasında statik yeniden kristalleşme nedeniyle ZME200 alaşımında çift pik yayılan bazal olmayan bir doku oluştuğu bildirilmiştir [16].



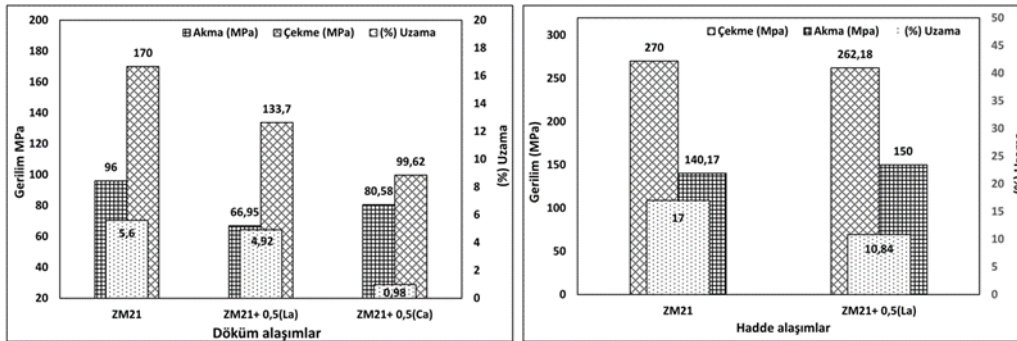
Şekil 2. ZM21 Döküm ve hadde olarak 100x mikroyapı görüntüleri



Şekil 3. Döküm ve hadde olarak SEM görüntüleri.

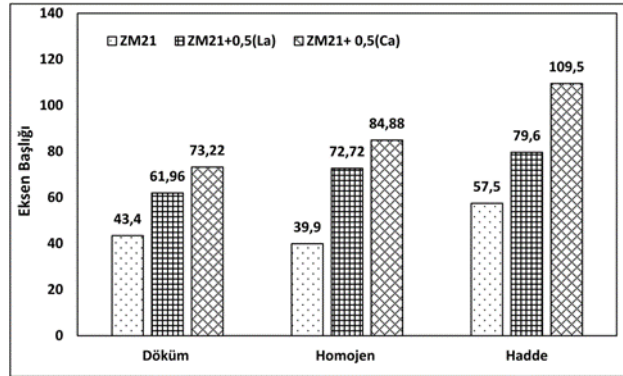
D. Mekanik Özellikler

Şekil 4'teki çekme deneyi sonuçlarına baktığımızda döküm halinde incelenen alaşımlarda element ilavesi ile çekme, akma ve uzama değerleri düşmüştür. Bu durum sertliğin artması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Özellikle Ca ilavesi ile % uzamanın çok alt seviyelere düşmesi, oluşan fazların sertliğini ne ölçüde arttırdığının göstergesidir. Haddelenmiş alaşımlara baktığımızda Ca ilaveli alaşımlar şekillendirme sırasında sertlikten dolayı parçalandığı için çekme numunesi alınamadı ve bu yüzden çekme sonucu elde edilememiştir. ZM21 ve %0,5 La ilaveli alaşımların haddelenme için elverişli olduğu tespit edilmiştir. % uzama değerleri de haddelenme ile yükselmiştir. Çekme değeri ve % uzamalar arasında iyi bir ilişki olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Döküm ve hadde olarak Çekme, Akma, Uzama

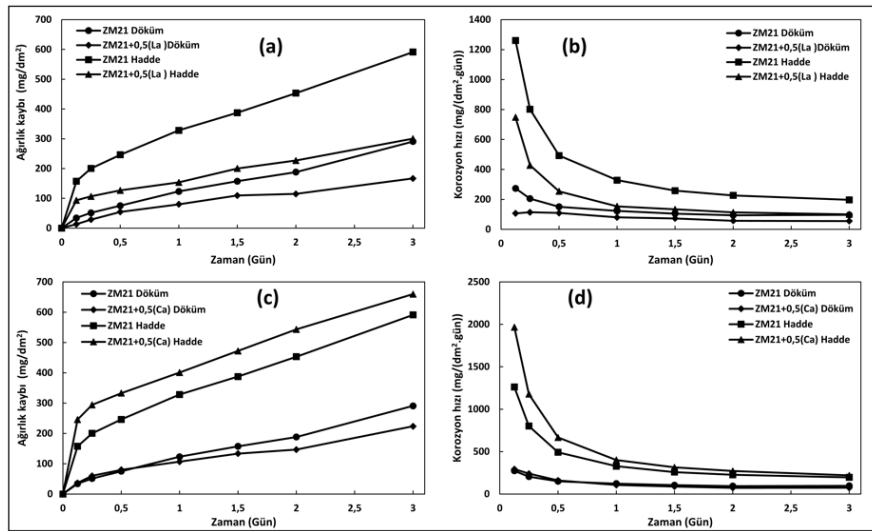
Şekil 5'teki sertlik sonuçları incelendiğinde en yüksek sertlik değeri Ca ilaveli alaşımda ortaya çıkmıştır. Bu durum hadde esnasında kırılan parçalarda ölçüldüğünde çok yükseldiği tespit edilmiştir. Kırılmanın nedeni olarak Ca ilavesi ile yapıda oluşan fazların sertliği çok arttırması hususu olduğu düşünülmektedir. Z. H. Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıda oluşan bu gibi fazların katı çözelti sertleşmesi ve dağılımlı dayanımı güçlendirdiğini bildirmişlerdir [17].



Şekil 5. Döküm, homojen ve hadde olarak %Uzama.

E. Daldırma korozyon deneyi

Şekil 6'daki daldırma korozyon deneyi sonuçlarına baktığımızda, ZM21+0,5(La) Mg alaşımının hem döküm hem hadde olarak ZM21 Mg alaşımına kıyasla daha az ağırlık kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. Korozyon hızlarının daha düşük olduğu görülmektedir. ZM21 Mg alaşımına oranla ZM21+0,5(Ca) alaşımı incelendiğinde döküm olarak daha düşük fakat hadde olarak çok daha fazla ağırlık kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon hızı çok yüksektir fakat döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon hızı daha düşüktür. Hadde alaşımında Ca ilavesiyle yapıda oluşan 2'li ve 3' lü fazların haddelemenin etkisiyle kırıldığı SEM resimlerinde görüldü ve bu durumda korozyon özellikleri üzerinde etki ettiği düşünülmektedir. Literatürdeki benzer bir çalışmada korozyon davranışı, %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma testleri ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri ile değerlendirildi. Daldırma testleri ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlarda, AZ91 alaşımının korozyon direncinin, alaşımın Ti içeriğinin artmasıyla kademeli olarak arttığı rapor edilmiştir [18].



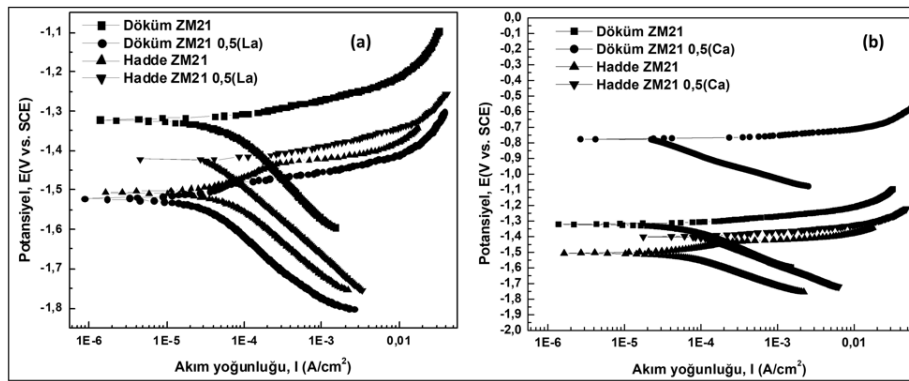
Şekil 6. ZM21 ve La ilaveli alaşımın (a) Ağırlık kaybı (b) Korozyon hızı ve ZM21 ve Ca ilaveli alaşımın (c) Ağırlık kaybı (d) Korozyon hızı.

F. Potansiyodinamik korozyon deneyi

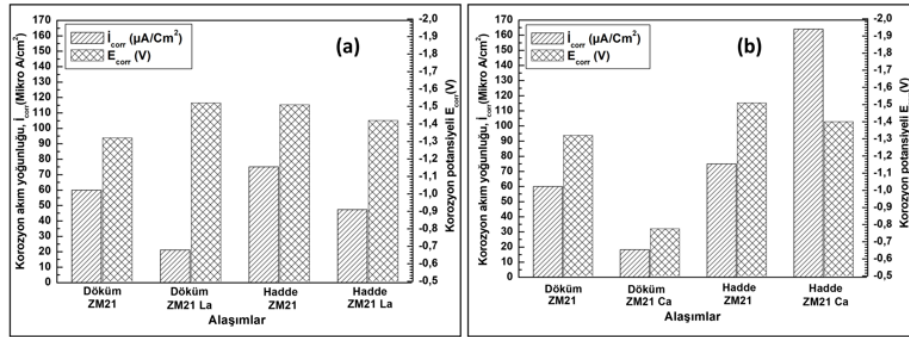
Şekil 7. (a)'ya bakıldığında elde edilen polarizasyon eğrilerinde ZM21+0,5(La) alaşımı döküm ZM21'e göre daha negatif değerde kalmıştır. Hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 8 (a)'da gösterilmektedir ve korozyon potansiyellerine bakıldığında alaşımının ZM21'e göre korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır.

Şekil 7 (b) bakıldığında elde edilen polarizasyon eğrilerinde döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımı döküm ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımı, hadde ZM21'e göre daha pozitif değerde kalmıştır. Bunlardan hesaplanan korozyon akım yoğunlukları ve korozyon potansiyelleri Şekil 8. (b)'de gösterilmektedir ve korozyon potansiyellerine bakıldığında döküm ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu azalmış ve korozyon direnci artmıştır. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu artmış ve korozyon direnci düşmüştür.

Literatürdeki bir çalışmada ZM21 alaşımına Ca ilavesi ile α -Mg matris korozyonunu engelleyen tane inceltme, $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ fazının oluşumu meydana gelmiş ve korozyon direnci artmıştır. Ağırlıkça %1.6 gibi fazla Ca ilavesi, alaşımın hem mekanik performansını hem de korozyon direncini zayıflatan Mg_2Ca fazının oluşmasına neden olduğu rapor edilmiştir [19]. Bu çalışmada da [19] döküm ZM21'e %0,5Ca ilavesi ile elde edilen sonuçlar uyusmaktadır.



Şekil 7. ZM21 alaşımı ile karşılaştırmalı olarak (a) La ilaveli ve (b) Ca ilaveli alaşımların potansiyel ve akım yoğunlukları gösterilmektedir.



Şekil 8. ZM21 alaşımı ile karşılaştırmalı olarak (a) La ilaveli ve (b) Ca ilaveli alaşımların korozyon akım yoğunlukları (I_{kor}) ve korozyon potansiyelleri (E_{kor}) gösterilmektedir.

IV. SONUÇLAR

Döküm ve sonrasında haddeleme ile üretilen ZM21, ZM21+0,5(La), ZM21+0,5(Ca) alaşımlarının mikroyapı, mekanik özellikleri ve korozyon davranışlarının karşılaştırılması sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir: Mikroyapı sonuçları incelendiğinde haddelenmeden sonra tane boyutu incelmış ve hadde yönünde kesme bantları olduğu düşünülen izler meydana geldiği görülmüştür. SEM, EDX sonuçları incelendiğinde haddeleme sonrası La ilavesiyle fazların uzadığı, Ca ilavesi ile oluşan sert fazların kesildiği SEM resimlerinde görülmektedir. XRD sonuçları incelenen alaşımların mikro yapılarında her iki alaşımda da Mg, MgZn, MgZn₂, MgZn₃ fazları, Ca içeriği ile C₅Zn₃, Ca₂Mg₆Zn₃ fazları ve La içeriği ile LaZn₂, LaMg₃ ikili fazlarının oluşumu tespit edilmiştir. Döküm halindeki numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde ZM21'e göre La ve Ca ilaveli alaşımların mekanik özellikleri çok az daha düşük değerlere sahiptir. Ayrıca Ca ilaveli döküm alaşımın % uzama değeri çok düşüktür. ZM21+0,5(La) Mg alaşımının hem döküm hem de hadde olarak ZM21 Mg alaşımına kıyasla korozyon deneyi sonrasında daha az ağırlık kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. ZM21 Mg alaşımına kıyasla ZM21+0,5(Ca) alaşımı incelendiğinde döküm olarak daha düşük fakat hadde olarak çok daha fazla ağırlık kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon test sonrası ZM21+0,5(La) ve ZM21+0,5(Ca) kalite döküm alaşımlarının ZM21'e

göre korozyon akım yoğunluğu azalmıştır ve bu da korozyon direncinin arttığı anlamına gelmektedir. Hadde ZM21+0,5(Ca) alaşımının korozyon akım yoğunluğu artmış dolayısıyla korozyon direnci düşmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Proje No: FDK-2019-2103 numaralı proje ile Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ünal, M., Gören, H. A., Koç, E., Türen, Y., Ahlatçı, H., & Sun, Y. (2017). Effect of cooling rate and 2 wt % silicon addition on microstructure and mechanical properties of AZ91 Mg alloys. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5 (7), 25-28.
- [2] Mordike, B. L. & Ebert, T. (2001). Magnesium: properties application-potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302, 37-45.
- [3] Ballam, L.R., Arab, H., Bestetti, M., Franz, S., Masi, G., Sola, R., Donati, L., & Martini, C. (2021). Improving the corrosion resistance of wrought ZM21 magnesium alloys by plasma electrolytic oxidation and powder coating. *Materials*, 14, 2268.
- [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, 987–993.
- [5] Sriraman, N. & Kumaran, S. (2019). Improved bio-acceptability of thermomechanically processed ZM21 magnesium alloy. *Materials Research Express*, 6 (5).
- [6] Li, Q., Fan, S., Peng, J., Yang, J., Jiang, X. & Pan, F. (2014). Effects of Ce on microstructure and mechanical properties of ZM21 magnesium alloy. *Materials Research Innovations*, 18 (4), 178-182.
- [7] Thirumurugan, M., Kumaran, S., Suwas, S. & Rao T. S. (2011). Effect of rolling temperature and reduction in thickness on microstructure and mechanical properties of ZM21 magnesium alloy and its subsequent annealing treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (29-30), 8460-8468.
- [8] Zengin H. & Türen Y. (2018). Effect of La content and extrusion temperature on microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Zn-Zr magnesium alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 214, 421-430.
- [9] Xie, Y. P., Wang, Z. Y., & Hou Z. F. (2013). The phase stability and elastic properties of MgZn₂ and Mg₄Zn₇ in Mg–Zn alloys. *Scripta Materialia*, 68: 495-498.
- [10] Alidoust, M., Kleiven, D. & Akola, J. (2020). Density functional simulations of pressurized Mg-Zn and Al-Zn alloys. *Physical Review Materials*, 4, 4: 045002.
- [11] Ghosh, P. & Medraj, M. (2013). Thermodynamic calculation of the Mg–Mn–Zn and Mg–Mn–Ce systems and re-optimization of their constitutive binaries. *Calphad*, 41, 89-107.
- [12] Alessia, P., Arjun, P., Vitalij, P., Marina, P., Carlo, F., Volodymyr, S., Anja, M. & Pietro, M. (2018). Effect of chemical and physical pressure on the superconducting properties of LaZn₂-xSn₂”, *APS March Meeting 1-2*.
- [13] Wang, M. H., Pan, R. K., Li, P. B., Bian, N., Tang, B.Y., Peng, L. M. & Ding, W. J. (2014). First-principles study on mechanical properties of LaMg₃ and LaCuMg₂. *Journal of Central South University*, 21(6), 2136-2142.
- [14] Sreejith, S. S., Mohan, N. & Kurup, M. R. P. (2018). Experimental and theoretical analysis of a rare nitrate bridged 3d-4f complex containing LaZn₂ core synthesized from a Zn(II) metallolig and. *Journal of Molecular Structure*, 1153, 85-95.
- [15] Fu, J., Liu, K., Du, W., Wang, Z., Li, S. & Du, X. (2017). Microstructure and mechanical properties of the as-cast Mg-Zn-Mn-Ca alloys. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 182, 012053.
- [16] Gao, L., Yan, H., Luo, J., Luo, A. A. & Chen R. (2013). Microstructure and mechanical properties of a high ductility Mg–Zn–Mn–Ce magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 283-291.
- [17] Chen, Z. H., Zhou, T., Chen, D., Yan, H. G., & Chen, J. H. (2008). Microstructure characterisation and mechanical properties of rapidly solidified Mg–Zn–Ca alloys with Ce addition. *Materials Science and Technology*, 24(7), 848-855.
- [18] Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y. & Candan, E. (2011). Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (5), 1958-1963.
- [19] Yang, J., Peng, J., Li, M., Nyberg, E. A. & Pan, F.S. (2017). Effects of Ca Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of ZM21 Wrought Alloys. *Acta Metallurgica Sinica*, 30(1) 53-65.