



## AZ91 Mg ALAŞIMLARINDA KOROZYON DAVRANIŞI-Fe TOLERANS SINIRI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Şennur CANDAN, <sup>2</sup>Serdar ÇİM, <sup>3</sup>Seren EMİR, <sup>4</sup>Ercan CANDAN

<sup>1,2,3,4</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>sennur.candan@bilecik.edu.tr, <sup>2</sup>serdar.cim@hotmail.com, <sup>3</sup>serenemir@gmail.com,  
<sup>4</sup>ecandan@yahoo.com

(Geliş/Received: 20.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.03.2019)

**ÖZ:** Bu çalışmada, aynı şartlarda üretilmiş (benzer katılma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) farklı Fe içeriğine (% ağırlıkta 0.025, 0.05, 0.1) sahip AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları-Fe tolerans limit değeri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Numunelerin mikro yapı analizleri Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve X Işını Difraktometre (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Korozyon davranışları %3,5 NaCl çözeltisinde, ağırlık kaybı ve potansiyodinamik polarizasyon test yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Mikroyapı analizlerinde, Fe içeriğinin artması ile yapıdaki “kısmen ayrılmış” veya “lameller ötektik” tipi β fazı morfolojilerinde artış eğiliminin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar, AZ91 alaşımı Fe tolerans limit değerinin ~%0.05 olduğunu bu değerden sonra korozyon kaybının eksponansiyel olarak arttığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AZ91 Mg alaşımı, Mikro yapı, Korozyon

### An Investigation of Relationship Between Corrosion Behaviour- Fe Tolerance Limit in AZ91 Mg Alloys

**ABSTRACT:** In this study, relationship between Corrosion Behaviour-Tolerance Limit of Fe content (0.025, 0.05, 0.1 wt. %) in AZ91 Mg alloys, cast under similar chemical composition and cooling rate, were investigated. The microstructures of Mg alloys were analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X Ray Diffractometry (XRD). The corrosion behaviours were evaluated by immersion tests and electrochemical polarization measurements in 3.5 wt. % NaCl solution. Microstructure analysis revealed that the increase of Fe content increased the “partially divorced” or “lamella eutectic” type β phase morphologies in the microstructure. Results indicated that the limit content value of Fe in AZ91 alloys was ~0.05 wt. % above which the corrosion loss had increased abruptly.

**Key Words:** AZ91 Mg alloys, Microstructure, Corrosion

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Magnezyum (Mg), düşük yoğunluğu nedeniyle telekomünikasyon, mikro elektronik, otomobil ve uzay endüstrisi gibi birçok mühendislik alanında kullanılan en hafif metalik mühendislik malzemesidir (Friedrich ve Mordike, 2006; Ikee ve diğ., 2015; Luo ve Sachedev, 2012; Pekguleryuz, 2013). Düşük toksik özelliği nedeniyle, Mg aynı zamanda biyo-uyumlu ve biyo-bozunur bir metaldir. Bu nedenle, ortopedik implant uygulamalarında plaka ve vida üretimi için biyo-bozunur metalik implant malzemeleri olarak gelecekteki kullanılabilme potansiyeli ilgi çekmektedir (Agarwal ve diğ., 2016; Eddy ve diğ., 2013).

Ancak, saf Mg'un dayanımının düşük olması nedeniyle kullanım alanındaki sınırlamalar değişik alaşımların üretilmesine yol açmıştır. Mg'un önemli alaşım grupları Mg-Al, Mg-Zn ve Mg-toprak alkali

metalleri (RE) olarak gruplandırılır. AZ91 Mg alaşımı (Mg-%9Al-%Zn), daha iyi döküm ve mekanik özellikleri nedeniyle diğer Mg alaşımlarına göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Ikeo ve diğ., 2015).

AZ serisi Mg alaşımının korozyon mekanizmalarını anlamaya yönelik son yıllarda çeşitli çalışmalar yayınlanmıştır (Candan, 2017; Candan, 2018a; Candan, 2018b; Esmaily ve diğ., 2017; Gusieva ve diğ., 2015; Salman ve diğ., 2010; Samaniego ve diğ., 2013; Singh ve diğ., 2015; Wang ve diğ., 2012). Bu çalışmalara göre genel olarak Mg ve alaşımlarının zayıf korozyon direnci, yüzeyde oluşan oksit filmlerinin tamamen koruyucu olmaması, özellikle safsızlıkların (Fe, Ni, Cu vb.) veya ikincil fazların ( $Mg_{17}Al_{12}$ , AlMn,  $Mg_2Si$  vb.) galvanik veya bimetallik korozyona neden olmasına dayandırılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını olumsuz etkileyen Fe, Si, Cu ve Ni gibi empürite elementleri alaşımda her zaman bulunur (Pan ve diğ., 2016a; Pan ve diğ., 2016b). Fe empürite elementi, küçük bir miktar bile olsa, Mg alaşımlarının korozyon direncini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Özellikle, endüstriyel uygulamalar için Fe'nin tolerans limit değerlerinin bilinmesi maliyet/kalite oranı açısından son derece önemlidir. Literatürde Fe'nin olumsuz etkisi ile ilgili tolerans limit değerleri saf Mg için bulunmasına rağmen (Friedrich, 2006; Polmear, 2006), AZ91 alaşımları için bu bilgi sınırlıdır (Song ve Atrens,1999).

Dolayısıyla bu çalışmada, aynı şartlarda üretilmiş (benzer katılma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) farklı Fe içeriğine (%0.025, 0.05, 0.1) sahip AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları-Fe tolerans limit değeri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL)

AZ91 Mg alaşımlarının üretimi için minimum saflığı %99,90 olan Mg, Al ve Zn külçeler kullanılmıştır. Master alaşımı, saf Mg ve Al alaşımının, 750 °C'de Ar gaz atmosferi altında grafit pota içinde eritilmiş ve dökme demir kalıba (22 mm çap, 220 mm uzunluk) döküm yapılmıştır. Optik emisyon spektrometresi (OES) ile elde edilen alaşımların kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 1.** Deneylerde kullanılan alaşımların kimyasal analizleri (% ağırlıkça oranı)

**Table 1.** Chemical compositions of AZ9 Mg alloys used with various Fe contents (wt. %)

Alaşım	Al	Zn	Mn	Fe	Ti	Cu	Mg
<b>AZ91 kontrol</b>	9.1	0.85	0.28	0.018	<0.002	<20	Kalan
<b>AZ91+0.025Fe</b>	8.90	0.85	0.30	0.022	<0.002	<20	Kalan
<b>AZ91+0.050Fe</b>	9.00	0.83	0.32	0.045	<0.002	<20	Kalan
<b>AZ91+0.1Fe</b>	9.15	0.87	0.29	0.12	<0.002	<20	Kalan

17 mm çapında ve 12 mm kalınlığındaki numuneler, döküm alaşımlarından işlenmiştir. Numuneler daha sonra 220, 400, 600, 800 ve 1200'lük zımpara kâğıdı ile zımparalanıp, ardından 1 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapı değerlendirmeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Numuneler alkolle temizlendikten ve tartıldıktan sonra 3, 7 ve 21 gün boyunca %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma testleri yapılmıştır. Daldırma testlerinden sonra, yüzeylerden korozyon ürünlerini uzaklaştırmak için 15 dakika boyunca 200 g/l  $CrO_3$  içeren bir çözelti içinde numuneler temizlenmiş ve hassas terazide tartılmıştır. Korozyon kayıpları, numunelerin toplam yüzey alanı göz önüne alınarak  $mg/cm^2$  biriminde hesaplanmıştır.

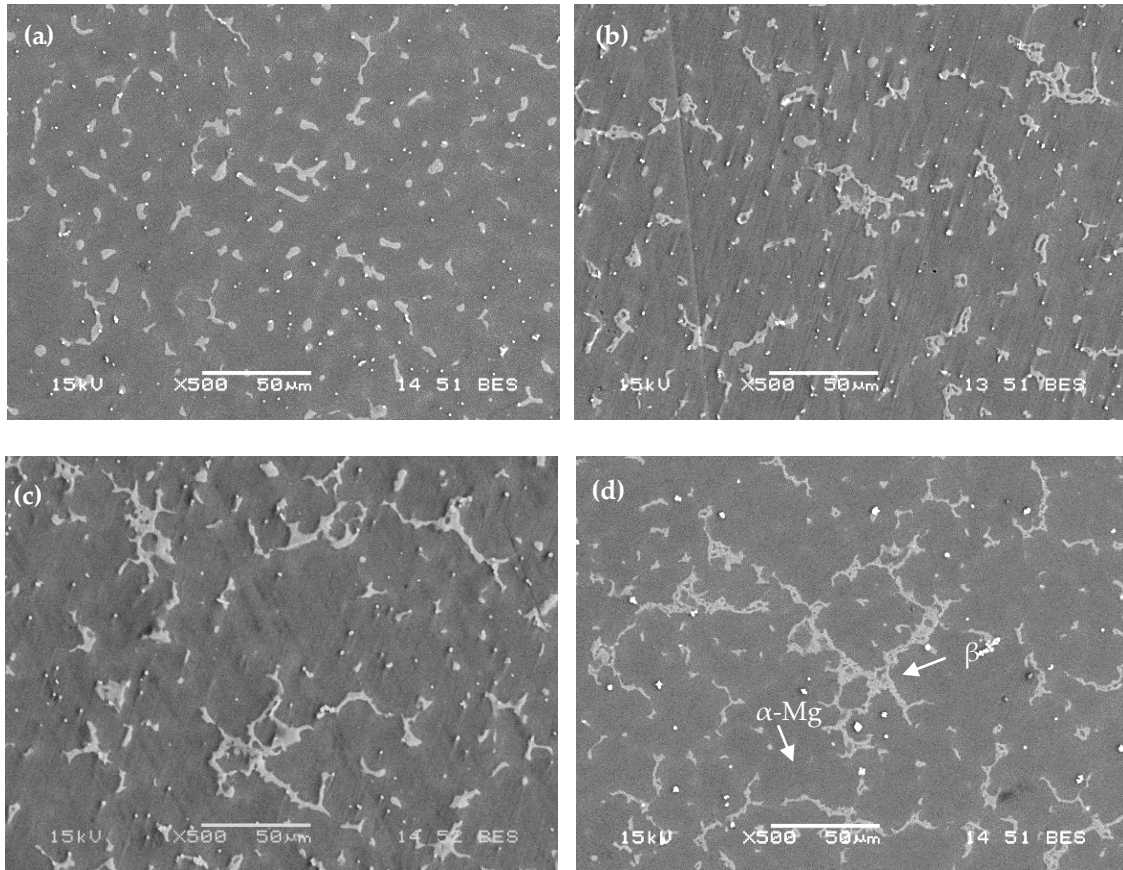
Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri için, 1  $cm^2$  yüzey alanına sahip (numunelerin yüzeyleri, daldırma deneylerinde olduğu gibi hazırlanmıştır) örnekler (yani çalışma elektrotları) bakır kabloya bağlanmış ve bir epoksi reçine tutucuya gömülmüştür. Korozyon incelemelerinde DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvonostat

kullanılmıştır. Karşı elektrot olarak karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, %3,5 NaCl çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dk süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline ( $E_{kor}$ ) ulaştıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, -2V - +1V arasında  $1mVs^{-1}$  tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{kor}$ ) hesaplanmıştır.

## SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (RESULTS and DISCUSSION)

### Mikroyapı (Micro structure)

AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı mikro yapı karşılaştırmaları Şekil 1a-d'de verilmiştir. SEM analizi, AZ91 Mg alaşımının mikro yapısının Mg matris ( $\alpha$ ) fazının yanı sıra ötektik  $Mg_{17}Al_{12}$  ( $\beta$ ) fazının oluştuğunu göstermiştir. Literatürde (Boby ve diğ., 2015; Srinivasan ve diğ., 2007) ve önceki çalışmalarımızda (Candan, 2018a; Candan ve diğ., 2016; Candan ve diğ., 2011) rapor edildiği gibi,  $\beta$  fazı  $Mg_{17}Al_{12}$  intermetalik bileşik olarak AZ91 alaşımında  $\alpha$ -Mg matrisinde tane sınırları boyunca oluşmaktadır. Katılaşmanın ilk aşamalarında, yapısal aşırı soğuma ve Zn'nin ayrışma eğilimi nedeniyle dendrit kollarının önündeki Al'nin zenginleşmesi meydana gelir. Ön kısımdaki zenginleşmiş Al,  $\alpha$ -Mg ile ötektik  $\beta$  fazını oluşturur. AZ91 alaşımının mikro yapılarında Fe miktarı arttıkça  $\beta$  fazının kabalaştığı görülmektedir (Şekil 1d).

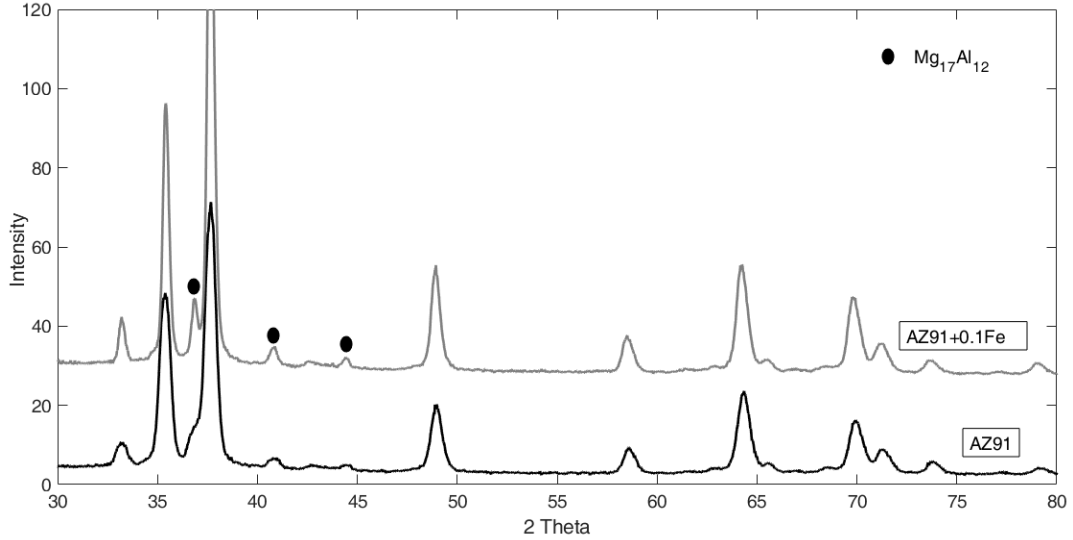


**Şekil 1.** Farklı Fe içeren AZ91 Mg alaşımlarının (a) AZ91 kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe mikro yapı karşılaştırması

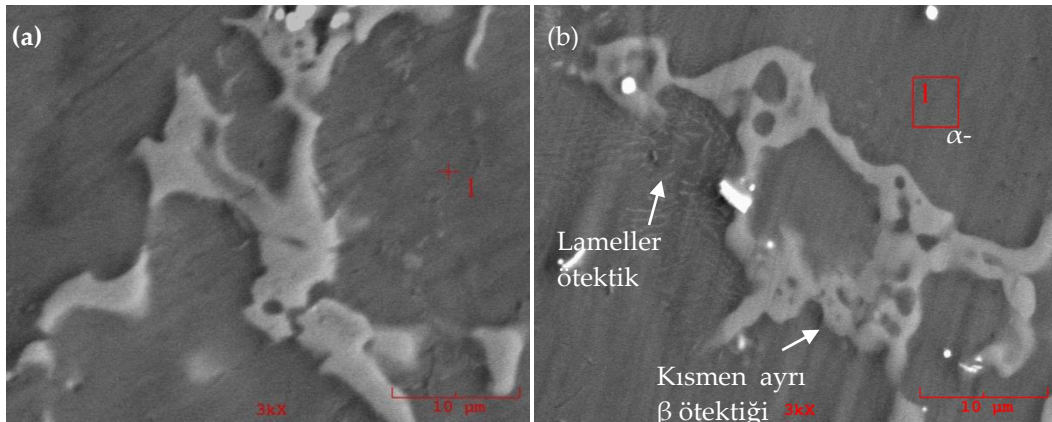
**Figure 1.** ( $Mg_{17}Al_{12}$  ( $\beta$ )) (Microstructure of (a) AZ91 control, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe and (d) AZ91+0.1Fe alloys

Şekil 2'de AZ91 ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleri karşılaştırılmıştır. Alaşıma 0.1Fe ilavesi durumunda  $\beta$  fazı pik şiddetlerinde artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 3a, b'de verilen yüksek büyütme SEM mikro yapıları karşılaştırıldığında, en düşük ve en yüksek Fe içeren

AZ91 alaşımları arasındaki fazların morfolojisinde önemli farklılıkların olduğu görülmektedir. SEM mikro yapıları literatür ışığında değerlendirildiğinde (Candan ve diğ., 2016; Candan ve diğ., 2011; Candan, 2009; Dahle ve diğ., 2001; Nave ve diğ., 2000; Zhao ve diğ., 2008),  $\beta$  faz morfolojisinin “kısmen ayrılmış” ve/veya “lameller ötektik” yapıda olduğu görülmektedir. AZ91 kontrol alaşımı ile kıyaslandığında, Fe içeriğinin artması ile alaşımdaki  $\beta$  faz morfolojisinin kısmen ayrılmış veya lameller ötektik morfolojilerinde artış eğilimi gözlenmiştir.



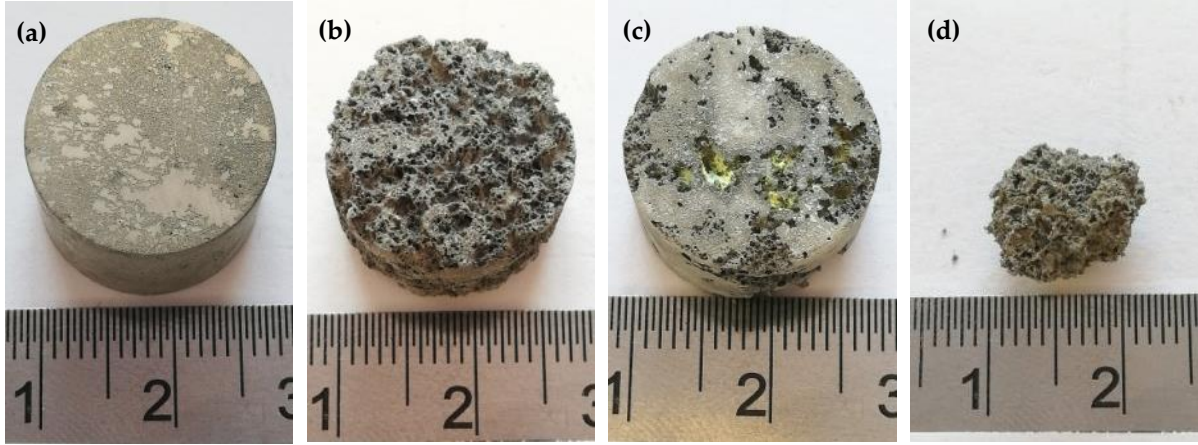
**Şekil 2.** AZ91 kontrol ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleri  
**Figure 2.** XRD patterns of AZ91 control and AZ91+0.1Fe alloys



**Şekil 3.** AZ91 kontrol ve AZ91+0,1Fe alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi  
**Figure 3.** SEM morphology of secondary phases in (a) AZ91+0.1Fe and (b) AZ91+0.1Fe alloys

### Korozyon (Corrosion)

3 ve 21 gün %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen farklı Fe içeren AZ91 alaşımlarının makroskobik fotoğrafları, Şekil 4a-d 'de verilmiştir. Şekil 4' de görüldüğü gibi numunelerin korozyon direncinin Fe artışıyla azaldığı gözlenmiştir. 21. günün sonunda, en fazla korozyona uğrayan alaşımın, en yüksek Fe saflık oranına sahip olan AZ91+0.10Fe alaşımı olduğu ve aynı alaşımın tekrarlanan örneklerinden bazılarının tamamen çözüldüğü gözlenmiştir. AZ91 Mg alaşımlarının Fe safsızlık oranlarına karşı korozyon kayıpları Şekil 5'te verilmiştir. Bütün alaşımlarda Fe safsızlık oranındaki artışa bağlı olarak korozyon kaybının arttığı ve yine korozyon kayıpları karşılaştırıldığında, Fe içeriği %0,05'yi aştığında korozyon kaybında ani artış gözlenmiştir.

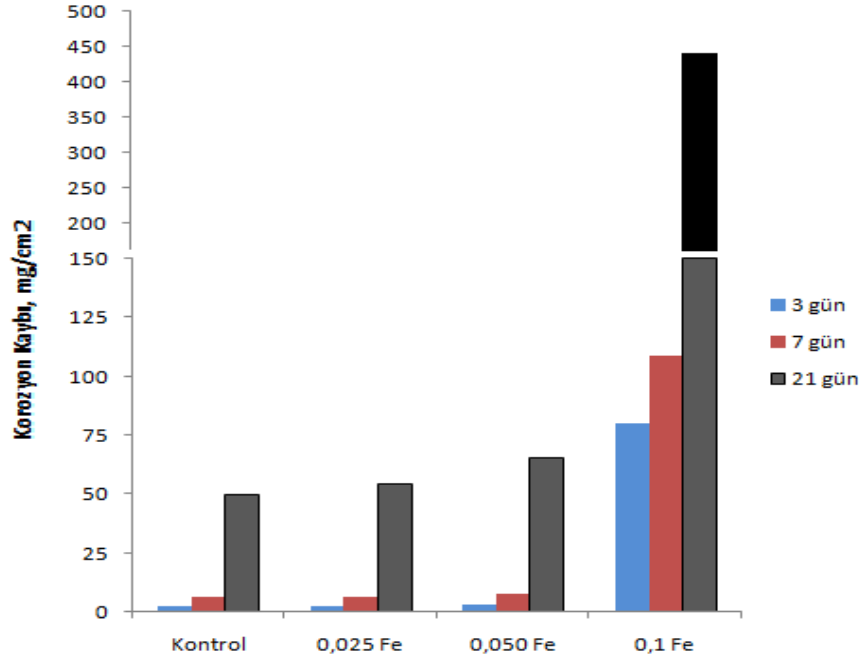


**Şekil 4.** AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen numunelere ait korozyon sonrası makro yapı fotoğrafları (a) AZ91 kontrol, 3gün, (b) AZ91+0.1Fe, 3 gün, (c) AZ91 kontrol, 21 gün, (d) AZ91+0.1Fe, 21 gün

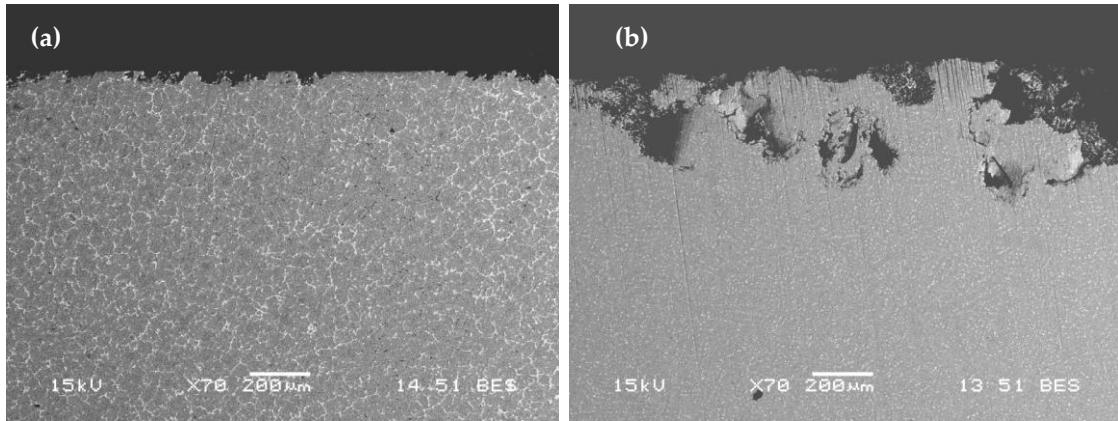
**Figure 4.** Macroscopical pictures of Mg alloys exposed to 3.5% NaCl (a) AZ91 control, 3 days, (b) AZ91+0.1Fe, 3 days, (c) AZ91 control, 21 days and AZ91+0.1Fe, 21 days

Şekil 6 a-d' de, 3 gün %3,5 NaCl çözeltisine daldırılan AZ91 ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının kesit SEM mikro yapıları verilmektedir. SEM analizleri korozyon kaybı sonuçlarını doğrulamakta olup en fazla korozyona uğrayan alaşımın AZ91+0.1Fe olduğunu göstermiştir. AZ91 kontrol numunesinin yüzeyi ile kıyaslandığında, yüksek Fe içeren numunelerin korozyonunun yüzeyden iç kısımlara ilerlediği görülmektedir. Bu durum korozyonun  $\beta$  fazları boyunca iç kısımlara doğru ilerlediğini işaret etmektedir. %0.1Fe içeren numunelerin kesiti incelendiğinde, büyük parçaların  $\beta$  fazını takip ederek yüzeyden ayrıldığı görülmüştür. Mikro yapı bölümünde açıklandığı gibi, yüksek Fe içeriği kaba ötektik ve kısmen ayrılmış  $\beta$  fazlara neden olduğu için, bu fazlar boyunca korozyonun ilerlemesine neden olduğu düşünülmektedir. Daldırma deneyleri sırasında, zamanla katı parçaların yüzeyden ayrıldığı ve dibe biriktiği gözlemlenmiştir ki bu yukarıdaki görüşü desteklemektedir.





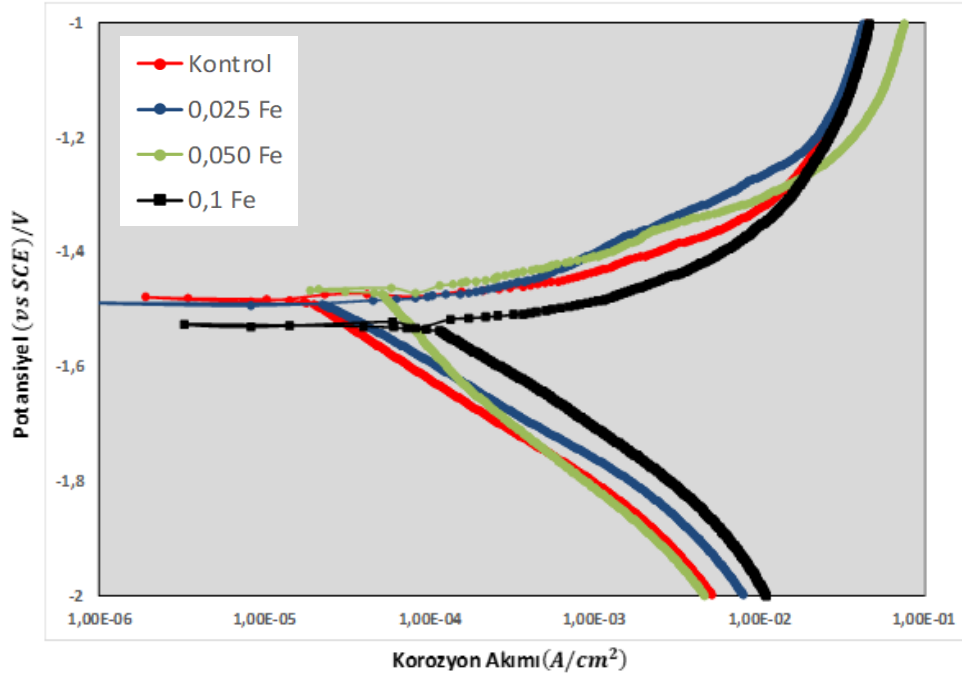
Şekil 5. AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyon kaybı  
Figure 5. Corrosion loss of AZ91 Mg alloys containing various Fe contents



Şekil 6. 3 günlük korozyon ortamında bekletilen (a) AZ91 kontrol ve (b) AZ91+0.1Fe alaşımlarının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri

Figure 6. Cross-sectional SEM images of (a) AZ91 control, (b) AZ91+0.1Fe alloys, immersed for 3 days

AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 7'de ve alaşımların, potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) ve korozyon akımı yoğunluğu ( $I_{kor}$ ) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. AZ91 kontrol alaşımı ile kıyaslandığında Fe oranının artması ile alaşımların korozyon akımının arttığı gözlemlenmiştir. AZ91 kontrol alaşımlarının  $I_{kor}$  değeri ( $25.43 \mu A/cm^2$ ) ve en yüksek Fe içeren AZ91+0.1Fe alaşımlarının  $I_{kor}$  değeri ( $161.10 \mu A/cm^2$ ) arasındaki fark 6 kattan fazladır. Fe içeriğine bağlı elektrokimyasal test sonuçları ve korozyon kaybı testleri benzer eğilim göstermektedir.



Şekil 7. AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri  
Figure 7. Potentiodynamic polarization curves for AZ91 alloys containing various Fe contents

Çizelge 2. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen, AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyon potansiyelleri ( $E_{kor}$ ), korozyon akım yoğunlukları ( $I_{kor}$ ) ve korozyon hızları (CR)

Table 2. Corrosion potentials ( $E_{cor}$ ), corrosion current densities ( $I_{cor}$ ) and corrosion rates (CR) values of AZ91 Mg alloys with various Fe contents, derived from the polarization curves

Alaşım	$E_{kor}$ (V)	$I_{kor}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	CR (mm/y)
AZ91	-1481	25.43	0.58
AZ91+0.025Fe	-1454	36.72	0.84
AZ91+0.050Fe	-1473	54.93	1.26
AZ91+0.10Fe	-1528	161.1	3.68

Fe miktarının artması ile korozyon artışı;

- Intermetaliklerin katot görevi yaparak korozyonu hızlandırıcı etki yapmasına ve
- Mikro yapı içerisindeki  $\beta$  ötektik fazındaki kabalaşmasına dayandırılabilir.

Mg, tüm ikincil fazlardan daha aktiftir ve sonuç olarak Mg matrisi anottur ve tercihen galvanik bir çiftte korozyona uğrar (Song ve diğ., 1998). Galvanik korozyonun temel prensibine göre, galvanik bir hücrede, büyük katoda (intermetalikler) karşın küçük anot ( $\alpha$ -Mg) bulunması anodik metalin daha fazla korozyona uğramasına neden olur. Ayrıca, Fe ilavesi ile hem ağ şeklinde oluşan hem de kabalaşan  $\beta$  fazı korozyonun iç kısımlara ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla bu da korozyon hızının artması anlamına gelir.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Tüm alaşımlarda, tane sınırlarında  $\beta$  ( $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ) intermetalik fazı oluşmaktadır. Alaşımdaki Fe oranındaki artış  $\beta$ -fazında kabalaşmayı teşvik etmektedir.
- Fe içeriğinin artması ile alaşımdaki  $\beta$  faz morfolojisinin kısmen ayrılmış veya lameller ötektik morfolojilerinde artış eğiliminin daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Polarizasyon testleri, Fe oranı artışı ile  $I_{kor}$  değerlerinin arttığını göstermiştir.

- AZ91 alaşımında Fe tolerans limit değerinin max. %0,05'e kadar olduğu ve bu değerden sonra korozyon kaybının eksponansiyel olarak arttığı gözlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2017-01.BSEU.03-02 nolu BAP projesinden desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S., 2016, "Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications". *Materials Science and Engineering C*, Cilt 68, ss, 948–963.
- Boby, A., Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., Pai, B. C., 2015, "Mechanical characterization and corrosion behavior of newly designed Sn and Y added AZ91 alloy". *Materials and Design*, Cilt 88, ss, 871–879.
- Candan, S., Candan, E., 2018a, "Comparative study on corrosion behaviors of Mg-Al-Zn alloys". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Cilt 28, Sayı 4, ss, 642–650.
- Candan, Ş., Çim, S., Emir, S., Candan, E., 2018b, "AZ Serisi Mg Alaşımlarının Korozyon Davranışlarında  $\beta$ -Fazının Rolü". *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 6, Sayı 4, ss, 1139–1162.
- Candan, S., Candan, E., 2017, "A comparative study on corrosion of Mg--Al--Si alloys". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Cilt 27, Sayı 8, ss, 1725–1734.
- Candan, S., Celik, M., Candan, E., 2016, "Effectiveness of Ti-micro alloying in relation to cooling rate on corrosion of AZ91 Mg alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt 672, ss, 197–203.
- 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*, Cilt 509, Sayı 5, ss, 1958–1963.
- Candan, S., Unal, M., Turkmen, M., Koc, E., Turen, Y., Candan, E., 2009, "Improvement of mechanical and corrosion properties of magnesium alloy by lead addition". *Materials Science and Engineering A*, Cilt 501, Sayı 1–2, ss, 115–118.
- Dahle, A. K., Lee, Y. C., Nave, M. D., Schaffer, P. L., StJohn, D. H., 2001, "Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys". *Journal of Light Metals*, Cilt 1, Sayı 1, ss, 61–72.
- Eddy Jai Poinern, G., Brundavanam, S., Fawcett, D., 2013, "Biomedical Magnesium Alloys: A Review of Material Properties, Surface Modifications and Potential as a Biodegradable Orthopaedic Implant". *American Journal of Biomedical Engineering*, Cilt 2, Sayı 6, ss, 218–240.
- Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Birbilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Johansson, L. G., 2017, "Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion". *Progress in Materials Science*. Cilt 89, ss, 92–193.
- Friedrich, H. E., Mordike, B. L., 2006, *Magnesium technology: Metallurgy, design data, applications*. *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*.
- Gusieva, K., Davies, C. H. J., Scully, J. R., & Birbilis, N., 2015, "c". *International Materials Reviews*. Cilt 60, Sayı 3, ss, 169-194.
- Ikeo, N., Shimizu, J., Ishigaki, C., Sano, Y., Shimizu, Y., Mukai, T., 2015, "Magnesium Technology 2015, ed. by MV Manuel, A. Singh, M. Alderman and NR Neelameggham". Wiley.
- Luo, A. A., Sachdev, A. K., 2012, "Applications of magnesium alloys in automotive engineering". In *Advances in wrought magnesium alloys* (pp. 393–426). Elsevier.
- Nave, M. D., Dahle, A. K., StJohn, D. H., 2000, "Eutectic Growth Morphologies in Magnesium-Aluminium Alloys". In *Magnesium Technology 2000* (pp. 233–242).
- Pan, F., Chen, X., Yan, T., Liu, T., Mao, J., Luo, W., Jiang, B., 2016a, "A novel approach to melt purification of magnesium alloys". *Journal of Magnesium and Alloys*, Cilt 4, Sayı 1, ss, 8–14.



- Pan, F., Yang, M., Chen, X., 2016b, "A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys". *Journal of Materials Science and Technology*, Cilt 32, Sayı 12, ss, 1211–1221.
- Pekguleryuz, M., 2013, "Alloying behavior of magnesium and alloy design". In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy* (pp. 152–196).
- Polmear, I. J., 2006, *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. *Light Alloys*.
- Salman, S. A., Ichino, R., Okido, M., 2010, "A comparative electrochemical study of AZ31 and AZ91 magnesium alloy". In *International Journal of Corrosion*.
- Samaniego, A., Llorente, I., Feliu, S., 2013, "Combined effect of composition and surface condition on corrosion behaviour of magnesium alloys AZ31 and AZ61". *Corrosion Science*, Cilt 68, ss, 66–71.
- Singh, I. B., Singh, M., Das, S., 2015, "A comparative corrosion behavior of Mg, AZ31 and AZ91 alloys in 3.5% NaCl solution". *Journal of Magnesium and Alloys*, Cilt 3, Sayı 2, ss, 142–148.
- Song, G., Atrens, A., Wu, X., Zhang, B., 1998, "Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride". *Corrosion Science*, Cilt 40, Sayı 10, ss, 1769–1791.
- Song, G. L., Atrens, A., 1999, "Corrosion mechanisms of magnesium alloys". *Advanced Engineering Materials*, Cilt 1, Sayı 1, ss, 11–33.
- Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., Pai, B. C., 2007, "Effect of Pb addition on ageing behavior of AZ91 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering A*, Cilt 452, Sayı , ss, 87–92.
- Wang, L., Shinohara, T., Zhang, B. P., 2012, "Electrochemical behaviour of AZ61 magnesium alloy in dilute NaCl solutions". *Materials and Design*, Cilt 33, ss, 345–349.
- Wang, T., Kevorkov, D., Mostafa, A., Medraj, M., 2014, "Experimental Investigation of the Phase Equilibria in the Al-Mn-Zn System at 400°C". In *Journal of Materials*.
- Zhao, M. C., Liu, M., Song, G., Atrens, A., 2008, "Influence of the  $\beta$ -phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91". *Corrosion Science*, Cilt 50, Sayı 7, ss, 1939–1953.