



AZ91 MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fevzi KELEN^{1*}, Tarık AYDOĞMUŞ², Mehmet GAVGALI³

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Magnezyum, TiNi, Hafif Alaşım ve Kompozitler, Otomotiv Malzemeleri, Korozyon.</i>	TiNi mikro partiküller ile %5-25 hacimsel oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon özellikleri %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon (PDS) yöntemi ile araştırılmıştır. Elektrokimyasal değerlendirmeler Tafel ekstrapolasyonu tekniği ile saptanmıştır. Metalografik incelemeler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal analizler elektrokimyasal değerler ile birbirini desteklemektedir. Korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin artan takviye miktarıyla arttığı belirlenmiştir. Korozyon sonrası yüzey incelemelerinde tüm kompozit numunelerde çukurcuk korozyonu gözlenmiştir. Matris fazda yer alan alan β -Mg ₁₇ Al ₁₂ intermetalik çökeltilerin ve yüzey morfolojisindeki homojensizliklerin kompozit malzemelerin korozyon dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF CORROSION CHARACTERISTICS OF AZ91 MAGNESIUM MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Keywords	Abstract
<i>Magnesium, TiNi, Lightweight Materials, Automotive Materials, Corrosion.</i>	The corrosion features of AZ91 magnesium matrix composite materials, which are reinforced with TiNi microparticles at the rate of 5-25% volumetrically, were investigated by potentiodynamic polarization (PDS) method in 3.5% NaCl solution. Electrochemical evaluations were detected by the Tafel extrapolation technique. Metallographic examinations were carried out using a scanning electron microscope (SEM) and an optical microscope (OM). The microstructural analyses have been supporting electrochemical values. Corrosion potential (E_{cor}) and corrosion current density (i_{corr}) of values were specified to increase with increasing reinforcement amount. In post-corrosion surface examinations, pitting corrosion was observed in all composite specimens. It has been determined that β -Mg ₁₇ Al ₁₂ intermetallic precipitates in the matrix phase and inhomogeneities in the surface morphology have a significant effect on the corrosion resistance of composite materials.

Alıntı / Cite

Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., (2022). AZ91 Magnezyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Özelliklerinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 84-90.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Kelen, 0000-0003-3900-4503
T. Aydoğmuş, 0000-00020928-5095
M. Gavgalı, 0000-0002-1581-2605

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	12.07.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	01.11.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	15.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, kolay geri kazanım ve mükemmel

* İlgili yazar/Corresponding author: fkelen@yyu.edu.tr, +90-432-225-1701

sönümleme kapasitesi gibi karakteristikleri ile otomotiv uygulamaları için en dikkat çekici yapısal malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. Bu malzemeler otomobillerin iç donanım, araç ön alanı, güç aktarma organları, şasi ve karoseri gibi temel sistem ve bileşenlerinde kullanılarak ağırlıkta önemli kazanımlar sağlayabilir. Böylece yakıt verimliliği iyileştirilerek hem insan sağlığı hem de çevre kalitesi açısından son derece tehlike unsurları içeren egzoz emisyonları minimize edilebilir (Gaines, et. al., 1996, Kelen, 2014., 2021a). Magnezyum alaşım serilerinden AZ91, oda sıcaklığı iyi mekanik özellikleri nedeniyle gerek otomotiv gerekse de diğer alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Otomobillerde koltuk çerçevesi, direksiyon kolunu ve braketleri, gösterge paneli ve fan gibi pek çok uygulaması bulunmasına karşın esas kullanımlarının taşıt ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturan güç aktarma organları ve araç ön alanı bileşenleri olduğu öngörülmektedir. Fakat matris fazın düşük korozyon direnci bu uygulamalardaki kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu malzemelerin dezavantajlarını bertaraf etmek amacıyla partikül ya da elyaf şeklinde daha mukavemetli bir çok farkı seramik veya metalik takviye materyali kullanılmıştır. Bunların akma dayanımı, çekme mukavemeti, elastik modül, süneklik ve sürünme direnci gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisi açıklanırken zayıf korozyon dayanımına olan tesirine pek değinilmemiştir. Özellikle magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon dayanımı hakkında yapılan çalışmalar son derece sınırlıdır (Fink, 2003, Hassan and Gupta, 2002, Nguyen and Gupta, 2010, Aydogmus, 2015, Esen, 2012, Kelen et. al., 2018, Kelen vd., 2019, 2021b, Çevik et. al. 2021). Bu çalışmada, TiNi mikro partiküller ile hacimsel olarak farklı oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

TiNi mikro partiküller ile %5, %10, %15, %20 ve %25 hacimsel oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemlerinden biri olan tek eksenli sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Alaşım tozlardan, matris partiküller, TangShan WeiHao Magnesium Powder Co. Ltd. (Çin), takviye materyali ise AP&C Advanced Powders and Coatings Inc. (Kanada) firmasından temin edilmiştir. Tablo 1'de kimyasal kompozisyonları geometrik şekilleri ve üretim yöntemleri verilen tozların saflığı imalatçı şirketler aracılığıyla sağlanan sertifikalı kimyasal analizler sonucu tespit edilmiştir. Alaşım tozlar bir spatula vasıtasıyla 10 dakika boyunca karıştırılmış, sonrasında 40 mm çaplı silindirik grafit kalıplarda, 420°C sıcaklıkta, 50 MPa basınçta, 1 saat süre ile inert gaz atmosferinde sinterlenmiştir. Deneylerde kullanmak amacıyla kompozit malzemelerden tüm ereyon tekniğiyle 5x5x10 mm³ boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Elektrokimyasal analizler öncesinde tüm numuneler metalografik olarak hazırlanmış, akabinde etil alkol içerisinde 5 dakika ultrasonik temizlemeye tabi tutulmuştur. Korozyon deneyleri PCI14/750 test cihazı kullanılarak % 3.5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin korozyon dayanımları üç elektrot yöntemine göre saptanmış, referans elektrot (RE) olarak doymuş gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl), karşıt elektrot (CE) olarak platin (Pt) ve çalışma elektrodu (WE) olarak da hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon (PDS) analizleri öncesi çalışma elektrodu/çözelti ara yüzeyindeki anodik ve katodik reaksiyon akımlarının denge durumuna gelmesi amacıyla potansiyelde meydana gelen değişimler ölçülmüş, akabinde eğriler, -2V ile 1V arasında katodikten anodik yöne doğru 0.5 mV/sn tarama hızında oluşturulmuştur. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) analizleri ise 100000 Hz'den 0.01 Hz'e kadar olan frekans aralıklarında tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kompozit numunelerin üretiminde kullanılan alaşım tozların özellikleri (Properties of alloy powders used in the production of composite samples)

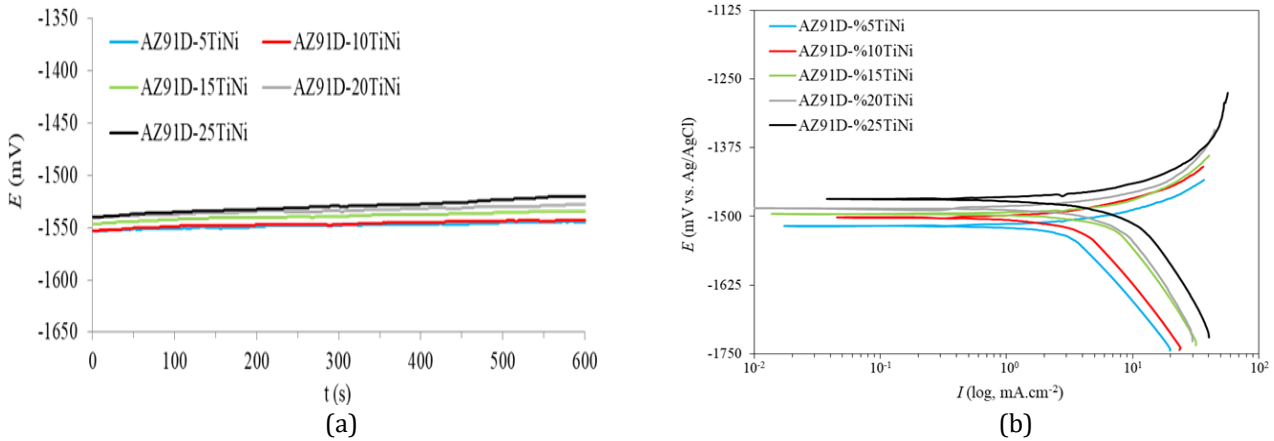
Matris ve Takviye Tozlar	Kimyasal Bileşim (%)						Toz Boyutu (µm)	Toz Şekli	İmalat Yöntemi
	Mg	Al	Zn	Ti	Ni	Diğer			
AZ91D *	90.4	8.93	0.4294			Kalan	150-300	Küresel	Atomizasyon
TiNi **			49.2	50.8			0-45		

*, % Ağırlık, **, % Atomik

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Tek eksenli sıcak presleme tekniği ile üretilen kompozit malzemelerin açık devre potansiyel (OCP) değişimleri ve potansiyodinamik polarizasyon (PDS) analizleri sırasıyla Şekil 1a ve b'de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen önemli bazı korozyon parametreleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Numunelerin açık devre potansiyel değişimlerinin artan takviye içeriği ile artışı gözlemlenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinde ise korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerlerinin yanı sıra korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin de takviye miktarı ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Kompozit malzemelerde korozyon hızının artması matris fazın yüksek elektronegatif potansiyeli ve yüzeyde teşekkül eden oksit/hidroksit tabakanın kararlı bir yapıya sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Zira yüksek elektronegatif potansiyel yapı içerisinde magnezyum oranını

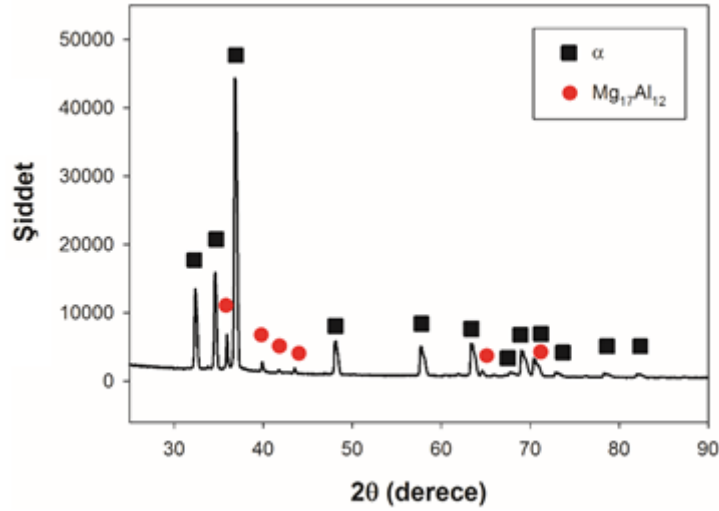
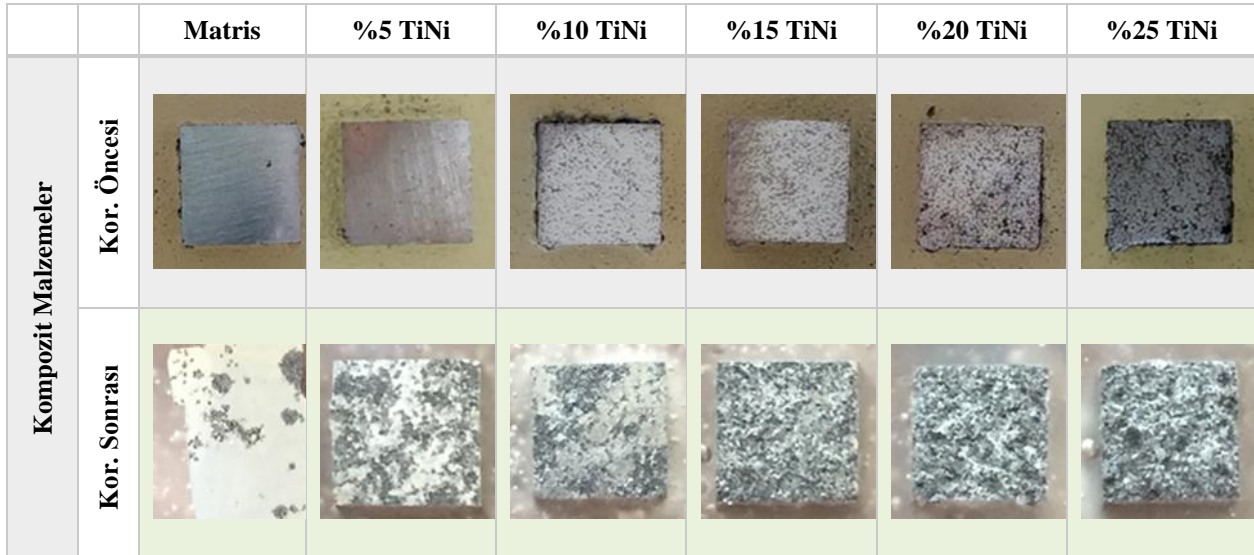
azaltmakta, bu durum, yüzeydeki MgO miktarının düşmesine neden olmaktadır. Buna bağlı olarak oksit tabakada meydana gelen süreksizlikler pasif yapıda doku bozukluğuna yol açarak kırılma ve yarılmalara neden olan bası gerilmelerini oluşturabilir. Ortamdaki klor iyonları bu hasarlı yapılara sızarak, çeşitli magnezyum tuzlarını oluşturup hem numunelerin çözünmesini hızlandırmakta hem de koruyucu filmin parçalanarak dağılmasına sebep olmaktadır (Lindström et. al., 2004, Hillis, 2006, Arrabal et. al., 2015). Ayrıca soy karakterdeki güçlendirici (Hodgson et. al., 1990), bünyedeki katot oranını artırarak küçük anot/büyük katot olarak adlandırılan ektiyeye neden olup, numunelerin korozyon direncini düşürmüş olabilir. Diğer taraftan yüzeyde oluşan oksit film tabakası MgO ve Mg(OH)₂ karma yapısı haricinde, Mg-Al karma oksit yapılarını da ihtiva etmektedir. Bu yapılar Al₂O₃ bakımından zengin olup, koruyuculukları alüminyum içeriğine bağlı olarak değişmektedir (Song and Atrens 1999). Dahası β fazındaki alüminyum miktarının, matrise kıyasla daha fazla olması, üzerindeki oksit yapının, numunenin diğer bölgelerine nazaran daha soy karakterde olacağını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda intermetalik bileşiğin %5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon potansiyeli değerinin -1.2 V olduğu ifade edilmektedir (Song and Atrens 2003). Dolayısıyla başlangıç tozlarında yer alan β fazı (Şekil 2) matris faza göre daha soy bir değere sahiptir. Anodik polarizasyon sırasında gerek yüzeyde oluşan alüminyum içerikli karma oksit yapıları gerekse de β fazının fiziksel bir bariyer gibi davranması kompozit malzemelerin korozyon hızındaki artışı kısıtlamıştır. Nitekim yapılan çalışmalarda, intermetalik bileşiğin matris faz içerisindeki hacimsel oranına bağlı olarak, $V_{\beta} > V_{\alpha}$ olması halinde, aşımında korozyon oluşumunu engellediği belirtilmiştir (Ballerini et. al., 2005, Zeng et. al., 2006). Morfolojik incelemelerde tüm numunelerde çukurcuk korozyonu türüne rastlanılmıştır. Literatürde magnezyum matrisli malzemelerin klorlu ortamlarda çukurcuk şeklinde korozyona uğradığı ifade edilmektedir (Andrei et. al., 2002, Ghali et. al., 2004, Kelen vd., 2019, 2021b, Çevik et. al. 2021). Şekil 3 ve 4'te sırasıyla makro ölçek ve SEM görüntüleri verilen tüm kompozit malzemelerde çukurcuk korozyonunun yoğun olarak matris/takviye ara yüzünde teşekkül ettiği görülmüştür. Soy karakterdeki fazların katot, matris fazın anot olarak davranması sonucu korozyon direncinin bu bölgelerde düştüğü saptanmıştır. Kompozit malzemelerde tanelerarası korozyon çatlaması sıklıkla tane sınırlarında ya da takviye fazı sınırları boyunca gözlenmiştir (Şekil 4c). Deneysel çalışmalarda bu aşım serilerinde alüminyumun çatlak ilerlemesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca gevrek yapıdaki β fazı çatlak ilerlemesini artırmaktadır. Bu fazının korozyon dayanımını iyileştirmesindeki ana faktör tane sınırlarının dislokasyon hareketlerini kısıtlayarak korozyona karşı fiziksel bir bariyer şeklinde hareket etmesidir. Bu nedenle Mg₁₇Al₁₂ intermetalik bileşiğin yapı içerisindeki dağılımı gerek mekanik özellikler gerekse de korozyon dayanımı açısından büyük önem arz etmektedir (Hamu et. al., 2009, Aung and Zhou 2010, Aydoğmuş vd., 2020).



Şekil 1. Kompozit malzemelerin açık devre potansiyel (OCP) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDS) eğrileri (a) OCP, (b) PDS (Open circuit potential (OCP) and potentiodynamic polarization (PDS) curves of composite materials (a) OCP, (b) PDS)

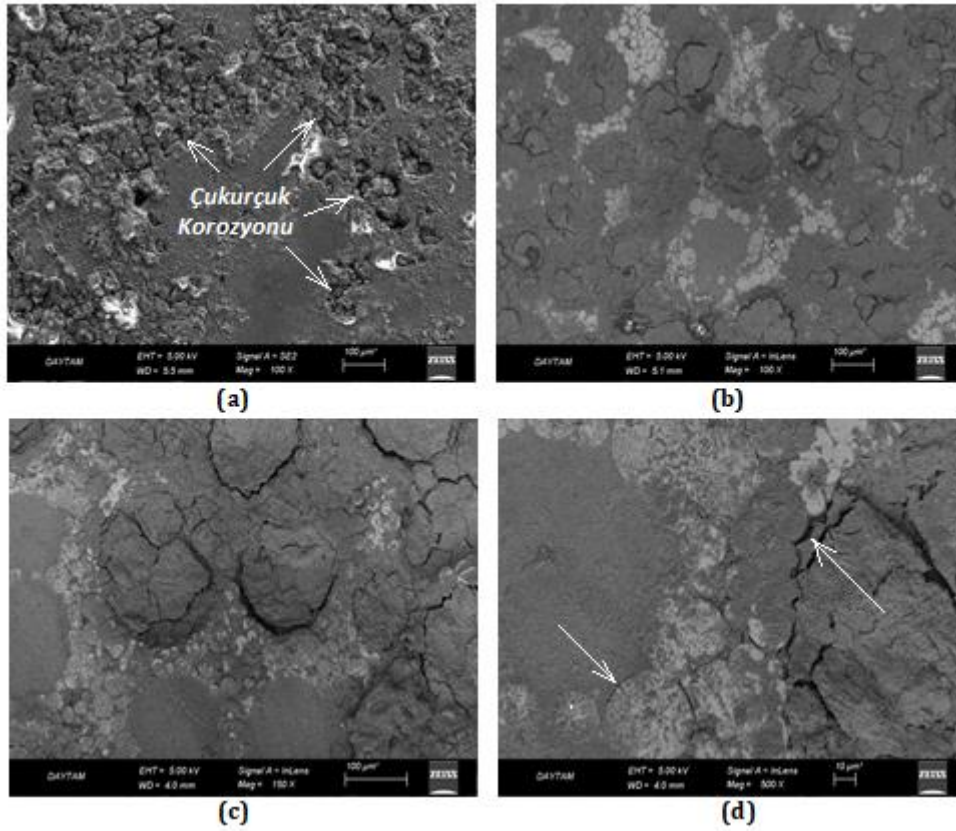
Tablo 2. Kompozit malzemelerin polarizasyon analizlerinden elde edilen önemli bazı korozyon parametreleri (Some important corrosion parameters obtained from polarization analyzes of composite materials)

Matris Faz	Takviye oranı (%)	E_{ocp} (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	Beta A (mV/dec.)	Beta C (mV/dec.)	Korozyon Hızı (mpy) $\times 10^3$
AZ91	5	-1545	-1518	3.32	48	290	2.65
	10	-1543	-1504	4.85	70	388	3.68
	15	-1534	-1496	6.42	84	282	4.67
	20	-1527	-1489	8.95	119	431	6.30
	25	-1519	-1468	10.80	188	935	13.01

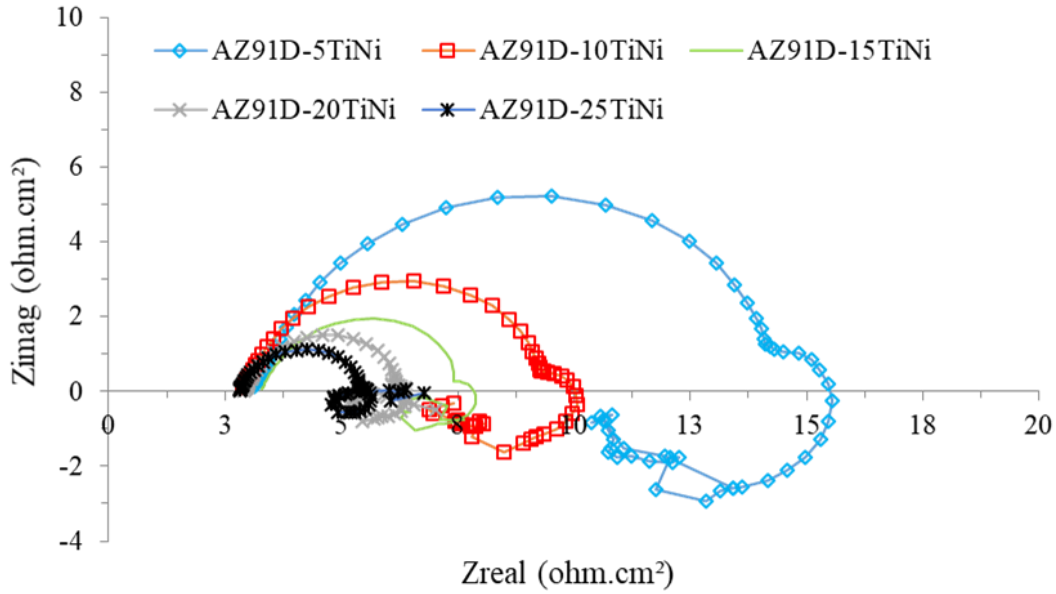
**Şekil 2.** Matris tozlarının XRD paternleri (XRD patterns of matrix powders)**Şekil 3.** Kompozit malzemelerin korozyon öncesi ve sonrası makroskobik görüntüleri (Microscopic images of composite materials before and after corrosion)

Alüminyumun matris faz yüzeyinde meydana gelen hidroksit film tabakasının morfolojisini değiştirerek korozyon özelliklerini geliştirdiği açıkça ifade edilebilir. Zira farklı alaşımlar ile aynı özellikteki çözelti içerisine yapılan daldırma testlerinde AZ31'de ağırlık kaybının 55.2 mg/cm², AZ80'da 0.75 mg/cm², AZ91D'de ise 1.05 mg/cm² olduğu tespit edilmiştir (Pardo et. al., 2008, Ghali, 2010, Song and Atrens 2003). Dolayısıyla alüminyum içeriğinin artmasıyla korozyon dayanımının iyileştiği görülmektedir. Buna ilaveten alaşımdaki çinko elementi matrisin

elektrokimyasal olarak daha soy olmasını sağlamaktadır. Takviye materyali ile birlikte artan soy karakter, numunelerin korozyon dayanımını geliştirerek direncin düşmesini sınırlandırmıştır. Proses sürecinde takviye elemanlarının korozyona uğramadığı, korozyonun tercihli olarak ara yüzeyde ilerlediği, matriste meydana gelen çözünme sonucu güçlendirici etrafının boşaldığı ve yapıdan koparak ayrıldığı belirlenmiştir (Şekil 3d). Ayrıca yerel olarak topaklanan takviye materyalleri lokal katot oranını artırarak küçük anot/büyük katot olarak ifade edilen korozyon türüne yol açmaktadır. Bu korozyon mekanizması çok hızlı cereyan ederek çukurcukların derinlemesine büyümesine ve güçlendirici partiküllerin yapıdan ayrılmasına neden olmaktadır. Şekil 5'te kompozit malzemelerin elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) analizleri sonrası Nyquist grafikleri verilmiştir. Bu eğrilerden yüksek frekanstan ortak frekans bölgesine kapasitif bir dairenin oluşumu ve düşük frekans bölgesinde indüktif bir döngünün varlığı dikkat çekmektedir. Numunelerde takviye miktarının artması ile birlikte çapın fark edilir düzeyde küçüldüğü görülmektedir. Bu davranış oksit film dayanımı ile ilgili olup, azalan yarıçap, oksit tabakada direncinin düştüğünü göstermektedir. Diğer bir ifade ile yüzeyde meydana gelen koruyucu tabaka oldukça kalın, gözenekli, kırılğan ve dayanıksızdır. Burada dikkat edilmesi gereken husus eğrilerin başlangıcında oluşan çok yüksek reel empedanstan da görülebileceği üzere kullanılan çözeltinin yüksek dirençli olmasıdır. Zira yüksek direnç numune/çözelti ara yüzeyinde faradik proseslerin, difüzyonun, proses sırasında da devam ettiğini göstermektedir. Kompozit malzemeler otomotiv güç aktarma organları imalatında kullanılmak üzere geliştirildiğinden, ASTM tarafından bu aksamlar için belirlenen test çözeltileri standartları (Baboian, 2005), göz önünde bulundurularak deneysel çalışmalarda yüksek dirençli solüsyon tercih edilmiştir. Ortamdaki yüksek klor iyonu konsantrasyonu yüzeydeki koruyucu tabakaya bunların absorpsiyonunu artırmaktadır. Kapasitif dirençteki azalma numunelerin düşük korozyon dayanıma atfedilmektedir. Düşük frekanslarda gözlemlenen indüktif döngü ise ağırlık kaybının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. Kompozit malzemelerin SEM görüntüleri a) %5TiNi, b) %15TiNi ve c-d) % 25TiNi (SEM images of composite materials a) 5%TiNi, b) 15%TiNi and c-d) 25%TiNi)



Şekil 5. Kompozit malzemelerin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) eğrileri (Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) curves of composite materials)

4. Sonuç (Conclusion)

Kompozit malzemelerin korozyon testlerinde tüm numunelerin açık devre potansiyel değişimlerinin zamanla arttığı gözlenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon analizlerinde ise korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin artan takviye oranı ile birlikte arttığı tespit edilmiştir. Korozyon sonrası gerçekleştirilen morfolojik incelemelerde tüm numunelerde çukurcuk korozyonu gözlenmiştir. Matris fazın yüksek elektronegatif potansiyeli ve yüksek agresif çözelti koruyucu oksit tabakada hasarlara neden olduğu saptanmıştır. Başlangıç tozlarında yer alan β ($Mg_{17}Al_{12}$) çökeltileri ve yüzey morfolojisindeki homojensizliklerin kompozit malzemelerin korozyon dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmaya maddi olarak sağladıkları katkıdan dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 215M808) ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na (Proje No: 2015-FBE-D275), teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Andrei, M., Eliezer, A., Bonora, P. L., Gutman, E. M., 2002. DC and AC Polarisation Study on Magnesium Alloys Influence of the Mechanical Deformation, *Materials and corrosion*, 53(7), 455-461.
- Arrabal, R., Mingo, B., Pardo, A., Matykina, E., Mohedano, M., Merino, M. C., Rivas, A., Maroto, A., 2015. Role of Alloyed Nd in the Microstructure and Atmospheric Corrosion of as-cast Magnesium Alloy AZ91, *Corrosion Science*, 97, 38-48.
- Aung, N. N., Zhou, W., 2010. Effect of grain size and twins on corrosion behaviour of AZ31B magnesium alloy, *Corrosion Science*, 52(2), 589-594.
- Aydogmus T., 2015. Processing of interpenetrating Mg-TiNi composites by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering A*, 624: 261-270.
- Aydoğmuş, T., Kelen, F., Aydemir, E., 2020. Sıcak Presleme Yöntemi ile AZ91 Magnezyum Alaşımının Üretimi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 277-287.
- Baboian, R., 2005. *Automotive*, Baboian R. (Ed.), *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation-Second Edition*, içinde (s. 673-687.). ASTM international, West Conshohocken; U.S.A.
- Ballerini, G., Bardi, U., Bignucolo, R., Ceraolo, G., 2005. About some corrosion mechanisms of AZ91D magnesium alloy, *Corrosion Science*, 47(9), 2173-2184.
- Esen Z., 2012. The effect of processing routes on the structure and properties of magnesium-TiNi composites. *Materials Science and Engineering A*, 558: 632-640.

- Fink, R., 2003. Die Casting Magnesium, Kainer, K. U. (Edt.), Magnesium Alloys and Technology, içinde (s. 23-44.). WILEY-VCH Verlag, Germany.
- Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S., 1996. Potential automotive uses of wrought magnesium alloys (No. ANL/ES/CP-89958; CONF-9604136-21), Argonne National Lab, IL 60439, USA.
- Ghali, E., 2010. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing (Vol. 12). John Wiley & Sons.
- Ghali E., Dietzel W., Kainer K.U. 2004. General and localized corrosion of magnesium alloys: a critical review. Journal of Materials Engineering and Performance, 13 (1): 7-23.
- Hamu, G. B., Eliezer, D., Wagner, L., 2009. The relation between severe plastic deformation microstructure and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy, Journal of alloys and compounds, 468(1-2), 222-229.
- Hassan S.F., Gupta M. 2002. Development of a novel magnesium/nickel composite with improved mechanical properties. Journal of alloys and compounds, 335 (1-2): L10-L15.
- Hillis, J., 2006. Corrosion, Friedrich, H. E., Mordike, B. L. (Ed.), Magnesium Technology, içinde (s. 469-498.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Hodgson, D.E., Wu M.H., Biermann R.J. 1990. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, içinde (s. 2: 897-902.). ASM Handbook Committee, U.S.A.
- Kelen, F., 2014. Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(1-2), 80-87.
- Kelen, F., 2021, Magnezyum ve Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Önemi ve Uygulamaları, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(1), 548-562.
- Kelen, F., Gavgalı, M., Aydoğmuş, T., 2018. Microstructure and mechanical properties of a novel TiNi particulate reinforced AZ91 metal matrix composite. Materials Letters, 233, 12-15.
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., Dikici, B., 2019. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş magnezyum matrisli kompozitlerin korozyon duyarlılıkları. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(3), 914-920.
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., 2022. Tek Eksenli Sıcak Presleme Tekniği İle İmal Edilen Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12 (1), 34-41.
- Çevik, E., Gündoğan, M., İncesu, A., Turan, M. E., 2021. Corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated TiB2 reinforced AZ91 magnesium matrix semi-ceramic hybrid composites, Hittite Journal of Science and Engineering, 8(1), 27-33.
- Lindström, R., Johansson, L. G., Thompson, G. E., Skeldon, P., Svensson, J. E., 2004. Corrosion of magnesium in humid air, Corrosion Science, 46(5), 1141-1158.
- Nguyen, Q.B., Gupta, M., 2010. Enhancing mechanical response of AZ31B using Cu+ nano-Al2O3 addition. Materials Science and Engineering A, 527 (6): 1411-1416.
- Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Arrabal, R., Viejo, F., Matykina, E., 2008. Corrosion behaviour of magnesium/aluminium alloys in 3.5 wt.% NaCl, Corrosion Science, 50(3), 823-834.
- Song, G., Atrens, A., 2003. Understanding magnesium corrosion—a framework for improved alloy performance, Advanced engineering materials, 5(12), 837-858.
- Song, G. L., Atrens, A., 1999. Corrosion mechanisms of magnesium alloys, Advanced engineering materials, 1(1), 11-33.
- Zeng, R. C., Zhang, J., Huang, W. J., Dietzel, W., Kainer, K. U., Blawert, C., Wei, K. E., 2006. Review of studies on corrosion of magnesium alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16, 763-771.