



An Investigation on Microstructural, Hardness and Corrosion Properties of As-Cast ZW21 Biodegradable Alloy

Kenza Djebari^{1*}, Yunus Türen², Hayrettin Ahlatçı³, Levent Elen⁴

¹ Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabük, Turkey, (ORCID: 0000-0003-0158-4741), kenzadjebari@gmail.com

² Karabük University Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabük, Turkey, (ORCID: 0000-0001-8755-1865), [ytüren@karabuk.edu.tr](mailto:yturen@karabuk.edu.tr)

³ Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabük, Turkey, (ORCID: 0000-0002-6766-4974), hahlatci@karabuk.edu.tr

⁴ Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabük, Turkey, (ORCID: 0000-0001-8740-7900), leventelen@karabuk.edu.tr

(4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, November 10 - 13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1202073)

ATIF/REFERENCE: Djebari, K., Türen, Y., Ahlatçı, H. & Elen, L. (2022). An Investigation on Microstructural, Hardness and Corrosion Properties of As-Cast ZW21 Biodegradable Alloy. *European Journal of Science and Technology*, (43), 6-12.

Abstract

In this study, ZW21 alloy one of magnesium (Mg) alloys containing Zinc (Zn) and Yttrium (Y) was produced by gravity casting method then its microstructure, hardness, corrosion and wear properties were investigated. The microstructure images of the produced alloys were made by classical metallographic methods such as sanding, polishing, and etching. Microstructure images were taken with optical and SEM devices and EDX analyzes were performed. The hardness of the metallographically prepared samples was determined by Brinell hardness tester. To achieve in vitro experiments, potentiodynamic polarization and immersion tests were performed in Hank's solution at (36.5 ± 0.5°C). In addition, in the corrosive wear tests, a reciprocating wear test device was used to implement the necessary experiments under constant load, at constant speed and distance also with Hank's contact conditions. According to XRD results, the presence of I and W phases was determined. The hardness of the materials was found to be 52.55 HV. It was observed that the corrosion rate slowed down over time and an oxide film layer was formed on the sample surfaces. A significant mass loss was detected in corrosive wear depending on the distance.

Keywords: Mg-Zn-Y Alloys, ZW21, Microstructure, Hardness, Hank's solution, Corrosion, Corrosive Aşınma.

Biyobozunur ZW21 Döküm Alaşımlarının Mikroyapı, Sertlik ve Korozyon Özelliklerini İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada, Çinko (Zn) ve İtiryum (Y) içeren magnezyum (Mg) alaşımlarından ZW21 alaşımı kokıl kalıba dökülerek üretimleri yapılmıştır ve daha sonra mikroyapı, sertlik, korozyon ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Üretilen alaşımların mikroyapı görüntüleri, zımparalama, parlatma ve dağlama gibi klasik metalografik yöntemleriyle yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri optik ve SEM cihazları ile alınmış ve EDX analizleri yapılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin sertlikleri Brinell sertlik test cihazı ile tespit edilmiştir. In vitro deneyleri gerçekleştirilemek için, potansiyodinamik polarizasyon ve daldırma testleri Hank sıvısında (36.5 ± 0.5°C) sıcaklığında yapılmıştır. Ayrıca, korozyon testlerinde, sabit yük altında, sabit hız, mesafede, Hank sıvısında ileri-geri aşınma yöntemiyle yapılmıştır. XRD sonuçlarına göre I ve W fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Malzemelerin sertliği 52.55 HV olarak bulunmuştur. Korozyon hızının zamanla yavaşladığı ve numune yüzeylerinde oksit film tabakası oluşturulduğunu gözlenmiştir. Korozyon aşınmada mesafeye bağlı olarak önemli bir ağırlık kaybı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mg-Zn-Y Alaşımları, ZW21, Mikroyapı, Sertlik, Hank sıvısı, Korozyon, Korozyon Aşınma.

* Corresponding Author: kenzadjebari@gmail.com

1. Giriş

Hem endüstriyel hem de biyomedikal uygulamalar için arzu edilen özelliklerde Magnezyum (Mg) alaşımlarının geliştirilmesine artan bir ilgi vardır. Mg alaşımlarına olan endüstriyel ilgi, daha iyi yakıt verimliliği için ulaşım araçlarının ağırlığının azaltılması yönündeki güçlü talebe dayanmaktadır. Bu nedenle yüksek mukavemet, iyi süneklik ve yüksek korozyon direnci özelliklerinin gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, biyomedikal magnezyum alaşımlarında gerekli mekanik özellikler, fizyolojik ortamda uygun bozunma hızı ve insan vücudu için biyo-güvenlik faktörleri önem kazanmaktadır (N. Li & Zheng, 2013).

Son zamanlarda biyomedikal uygulamalar için dikkat çeken ve bununla beraber ortopedik uygulamalar için önemli bir materyal ünvanı kazanmış Mg alaşımları ile biyobozunur malzemelerin geliştirilmesidir. Metalik malzemeler, yüksek mekanik mukavemetleri ve yüksek kırılma toklukları nedeniyle seramik veya polimerlere kıyasla yük taşıma gerektiren uygulamalar için daha çok tercih edilmektedir. Mg (1.738 g/cm^3) ve Mg alaşımlarının (1.75 ve 1.85 g/cm^3) yoğunlukları insan kortikal kemiğinkine (1.75 g/cm^3) çok benzerdir (Wang et al., 2008). Biyoyumluluk için Mg iyonları insan vücudunda büyük miktarda bulunur ve birçok metabolik reaksiyonda ve biyolojik mekanizmada yer alır. Mg alaşımları, ortopedik implantlar için umut verici adaylardır ve ikincil bir ameliyata gerek kalmaması sayesinde ilgi çekmektedirler. Ekonomik olmaları ve fizyolojik ortam uyumlulukları göz önüne alındığında Mg ve alaşımları en uygun malzemeler olarak ön plana çıkmaktadırlar.

Mg-Zn-Y sistemli magnezyum alaşımlarının her zaman yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar (Chen et al., 2015), ZW21 adında yeni bir Mg-Zn-Y alaşımı geliştirilmişlerdir. ZW21 alaşımı, 205 MPa'lık bir nihai çekme mukavemetine, %18.25'lik bir uzama ve 50 HV'lik bir sertliğe sahiptir. Uygun ısıl işlem prosesleri ile bu üç mekanik özellik geliştirilebilmektedir. Böylece incelenen alaşım tipi, yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra yaygın olarak kullanılan diğer türdeş alaşımlara kıyasla ağırlıkça daha hafif ve düşük maliyetli olarak elde edilecektir. Tüm bu nedenlerden dolayı bu çalışmada, ZW21 alaşımı ele alınmıştır. ZW21 alaşımının, klinik uygulamalarda yük taşıma için uygun olduğu belirlenen yüksek mukavemete sahip bir Mg alaşımı olmasıdır (Chen et al., 2015). ZW21 alaşımlarının hem in vitro hem de in vivo olarak homojen bozunma ile iyi sito-uyumluluk gösterdiği ve in vivo olarak sadece sınırlı gaz oluşumu gözlemlendiği rapor edilmiştir (Hänzi et al., 2010).

Mg ve alaşımlarında zayıf korozyon özelliklerini geliştiren çinko (Zn), aynı zamanda doğal olarak insan vücudunda mevcut olup kemik dokularının meydana gelmesinde önemli rol oynayan bir elementtir (Yamaguchi, 1998). Ayrıca, bakterilerin DNA yapısını deforme edip, aynı zamanda çoğalmasını ve yaşamını sürdürmesini engelleyen antibakteriyel özellikler gösterir (Tie et

al., 2013). İtiryum (Y) ise hücre çoğalmasına, daha iyi biyoaktivite özelliklerinin kazandırılmasına ve biyolojik korozyonun geciktirilmesine yardımcı olur. Ayrıca Y'nin belirli derecelerde antibakteriyel özellikleri olduğu, önceki bir yaklaşımda in vitro olarak hücre biyoyumluluğu testi ile kanıtlanmıştır. Bu nedenlerden dolayı Y ilavesinin, kemik dokularının onarımı ve rekonstrüksiyonu için kullanılacak ideal bir implant malzemesinde önemli olduğu anlaşılmıştır (Zhang et al., 2020).

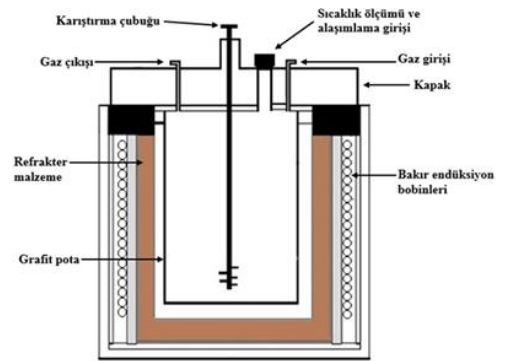
Ayrıca, Mg'da nispi olarak yüksek bir çözünürlük sergilerler ve fizyolojik ortamda biyolojik uyumluluğu arttırmaları beklenir (Zheng, 2015). Bahsedilen alaşım elementleri ile uygulama ve yöntemler, ZW21 alaşımının hem metalürjik olarak hem de biyomalzeme olarak geliştirilmesi için oldukça önemlidir. Dolayısıyla da, Mg-Zn-Y alaşımları içerisinde biyomalzeme olarak en uygun alaşım tiplerinden biri olan ZW21 alaşımının farklı tür ve oranlarda alaşım elementleri ilave edilerek ve bunun yanı sıra deformasyon mekanizmaları aracılığıyla şekillendirme prosesleri uygulanarak incelenmesi ve geliştirilmesi ile insan sağlığı için daha güvenilir ve nitelikli bir biyomalzeme ortaya koymaktır. Özellikle bu çalışmada ZW21 alaşımının döküm halindeki mikroyapı, sertlik, aşınma ve korozyon sonuçlarının birlikte sistematik olarak çalışılması seçilmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Alaşım Üretimi

2.1.1. Ergitme Ve Döküm Yöntemi

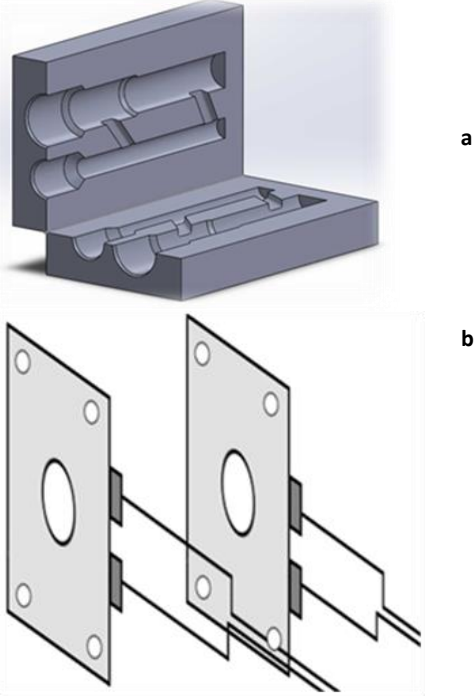
ZW21 alaşımlarının ergitme ve döküm proseslerinde Şekil 1'de verilen döküm indüksiyon fırını kullanılmıştır. Ergitme ve döküm proseslerinde kullanılan fırın gövdesinin dışı çelik, iç kısmı ise refrakter malzeme ile kaplıdır.



Şekil 1. Atmosfer kontrollü indüksiyon fırını.

Ergitme işlemindeki ZW21 alaşımı üretiminde öncelikle saf durumdaki Mg külçe parçalar grafit potaya eklenerek sıcaklığın $\sim 750^\circ\text{C}$ 'ye ulaşması sağlanmıştır. Sonrasında istenilen sıcaklığa ulaşan eriyiğe saf haldeki Zn ve Mg30Y master alaşım elementleri küçük parçalar halinde yüklenmiştir. İlave elementlerin eklenmesinin sonrasında eriyik, grafit çubuk yardımıyla homojen bir dağılım elde etmek için gerekli süre (15dk) boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sonrası kısa bir süre (5dk) beklenip eriyiğin döküm için uygun hale gelmesi sağlanmıştır.

Döküm işlemi, eritme ve karıştırma proseslerinin ardından Şekil 2(b)'de verilen ve 400°C ye kadar çıkabilen plaka ısıtıcılar yardımıyla 250°C'ye kadar ısıtılmış kokil kalıp Şekil 2(a) içerisine, (CO₂+SF₆) koruyucu gazı altında ve yolluk bölümüne filtre yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Yerleştirilen filtre sayesinde sıvı metal içerisinde oluşabilecek inklüzyonların kalıp içerisine nüfuz etmesi önlenerek döküm parçada daha temiz bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 2. (a) Döküm kalıbı, (b) Plaka ısıtıcılar.

2.2. Alaşım Karakterizasyon İşlemleri

Döküm işlemleri tamamladıktan sonrası bileşimin tespiti için XRF kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop ve SEM görüntüleri elde edilmiştir. Mekanik özelliklerinden Sertlik HB ile ölçülmüştür. In vitro sonuçları elde edebilmek için korozyon deneylerinde hem daldırma hem de potansiyodinamik yöntemler kullanılmıştır. Bununla birlikte korozif ortamda ileri-geri aşınma yöntemiyle korozif aşınma işlemi yapılmıştır.

2.2.1. XRF Analizi

Alaşım elementlerinin ağırlıkça % oranları, Rigaku ZSX Primus II marka cihaz kullanılarak XRF (X-Ray Fluorescence) yöntemiyle belirlenmiştir.

2.2.2. Mikroyapı İncelemesi ve Faz Analizi

Alaşımın mikroyapı incelemeleri için numuneler saf su altında (400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh) SiC zımpara kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler 1 µm'luk alümina ile parlatılmış ve daha sonra sırası ile önce saf su ile yıkanmış etanol ile yüzey durulanmış ve kurutulmuştur.

Görüntüleme öncesi son olarak pikrik asit içeren asit solüsyonunda numuneler dağlanmıştır. Optik mikroskopta (Nikon marka) incelenen numuneler daha sonra SEM görüntülemeleri ve EDX analizleri için elektron mikroskobunda (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini marka) detaylı mikroyapı ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Döküm numunelerinin faz analizleri, XRD faz analiz cihazında (Rigaku Ultima IV marka) 3 dk tarama hızında ve 10°-90° tarama açısı aralığında gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Sertlik Testi

Döküm alaşımlarının oda sıcaklığındaki, 'BMS 3000-HB Brinell' marka Brinell sertlik test cihazı ile sertlik değerleri belirlenmiştir. Brinell sertlik testinde, numune yüzeylerine 187,5 kgf yük altında 2,5 mm çapında bilye uygulanmış ve 10 saniye basılı tutulmuştur. Test sonrasında her numune için 5 ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanarak sertlik değerleri elde edilmiştir.

2.2.4. Korozyon Testleri

Bu çalışmada In vitro testleri gerçekleştirilmesi için daldırma ve korozif aşınma kullanılmıştır. Ayrıca elektrokimyasal korozyon testlerinden potansiyodinamik polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır.

Daldırma Korozyon Testi

Daldırma korozyon testleri, vücut sıcaklığına uygun şekilde (36.5 ± 0.5°C) Hank solüsyonu ortamında yapılmıştır. Daldırma testleri için, ZW21 döküm alaşımlardan 1 cm³ ebatında küp numuneler hazırlanmıştır. Numuneler saf su altında (400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh) SiC zımpara kullanılarak zımparalanmış ve test öncesi 5 dakika boyunca etanol içeren ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Teste başlamadan önce her numunenin ilk ağırlığı tartıldı ve yüzey alanı ölçüldü. Ardından 72 saat korozif ortama daldırıldı. Her test aralığından sonra numunelerin korozyon ürünleri, ultrasonik bir temizleyici kullanılarak, 182 g/l sulu kromik asit çözeltisine 5 dakika daldırılarak temizlenmiştir. Daha sonra deiyonize su (saf su) ile yıkanarak 3 dakika boyunca etanol içerisinde ultrasonik banyoya tabi tutulmuştur. Son aşamada ılık havada kurutulmuş ve ardından ağırlık ölçümü yapılmıştır. Daldırma süreleri olarak; 24, 48 ve 72 saatlik aralıklar olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede deney numunelerinin korozyon hızları hakkında diğer korozyon testlerinin de yorumlanmasına yardımcı olacak bilgiler elde edilmiştir.

Potansiyodinamik Polarizasyon Testi

Elektrokimyasal korozyon deneyleri vücut sıcaklığına uygun şekilde (36.5 ± 0.5°C) simüle edilmiş vücut sıvısının eş değeri olan Hank's solüsyonunda gerçekleştirilmiştir. Hank solüsyonunun kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Tafel yöntemi kullanılarak ZW21 döküm halindeki numunelerinin korozyon oranları belirlenmiştir. Potansiyodinamik eğrileri sağlamak için bilgisayar destekli DC105 korozyon analiziyle Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/ galvanostat aracılığıyla korozyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, 1 mV/s tarama alanında -0,25 V (vs Eoc) ve +0,25 V (vs Eoc) arasında uygulanmıştır.

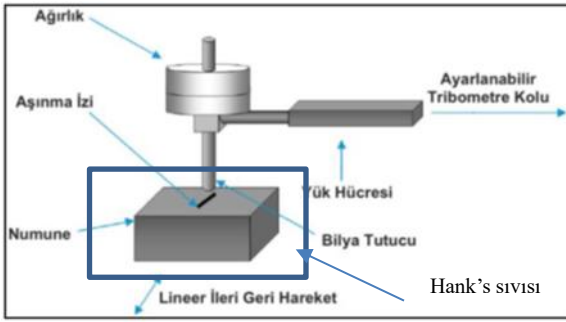
Korozif Aşınma Testi

Aşağıdaki standartlarda ve Şekil 3' de (ileri-geri) aşınma test cihazı şeması gösterildiği gibi korozif aşınma testi yapılmıştır:

Numunelerin deney yapılmadan önce hazırlanması için , cihazdaki numune yatağına uygun olacak şekilde kesilmiştir, yüzeyleri 1200 numaralık zımparaya kadar zımparalanıp saf su ve alkol ile temizlenmiştir. Sabit olarak hem 20N yük altında, 0,1 m/s kayma hızında, toplam 400 metre kayma mesafesinde, Hank's sıvısı içerisinde yapılmıştır. Aşındırıcı uç olarak AISI 52100 kalite yüksek sertlikte çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma sırasındaki sürtünme kuvveti tribometre koluna bağlanan yük hücresi tarafından ölçülerek anlık olarak bilgisayara kaydedilmiştir.

Tablo 1. Hank's solüsyonunun kimyasal bileşimi (pH 6.8).

Reaktifler	Bileşen (g/L)
NaCl	8.00 g
NaHCO ₃	0.35 g
KCl	0.40 g
KH ₂ PO ₄	0.60 g
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.60 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.06 g
CaCl ₂	0.14 g
Na ₂ HPO ₄	0.06 g
Glikoz.2H ₂ O	1.00 g



Şekil 3. İleri-geri aşınma testi cihazının şeması

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Alaşımların Kimyasal Analizi

Dökümü yapılan alaşımların kimyasal bileşimi XRF cihazı kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 2' de gösterilmiştir. Deney öncesi planlanan ZW21 alaşımını oluşturan alaşım elementleri (Mg, Zn ve Y) oranı tam olarak elde edilmiştir.

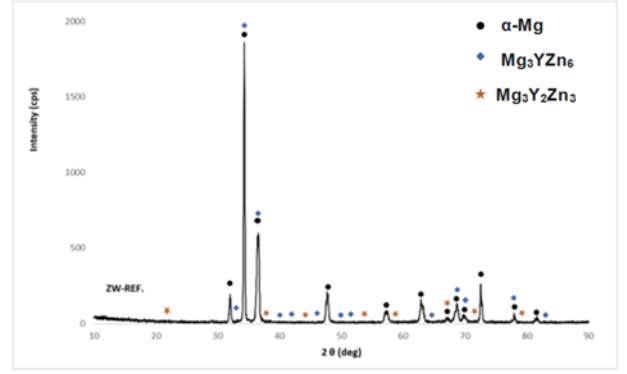
Tablo 2. ZW21 Döküm Alaşımının Kimyasal Analizi

Kimyasal Kompozisyon, % Ağ.							
Alaşım	Mg	Zn	Y	Mn	Na	Al	Si
ZW21	Kalan	1.963	0,964	0,048	0,013	0,019	0,144

3.2. XRD Analizleri

Alaşımların XRD faz analiz sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ZW21 yapısı içerisinde α -Mg ana matrisinin yanı sıra I: (Mg₃YZn₆) ve W: (Mg₃Y₂Zn₃) fazlarının varlığı tespit edilmiştir.

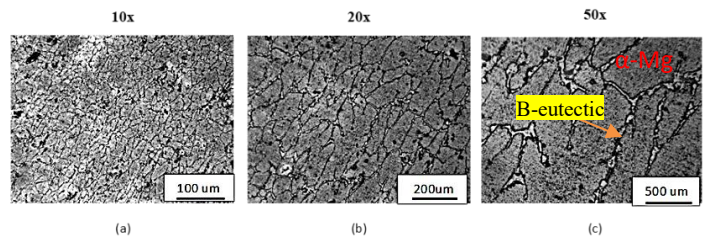
Şekil 4. ZW21 döküm alaşımının XRD faz analizleri.



Mg-Zn-Y alaşımlarına artan ilgi, belirli özelliklere sahip üç Mg-Zn-Y üçlü fazından kaynaklanmaktadır. Üç faz, I fazı (Mg₃Zn₆Y), W fazı (Mg₃Zn₃Y₂) ve Z veya X fazı (Mg₁₂ZnY) anlamına gelir ve hepsi yüksek sertliğe sahiptir. I ve Z fazları α -Mg matrisi ile uyumludur ve bu nedenle matris ile ara yüzey bağı çok güçlüdür ve bazal kaymayı etkili bir şekilde geciktirebilir. Bu nedenle, I ve/veya Z fazı içeren alaşımlar yüksek mekanik özelliklere, özellikle de yüksek sıcaklıkta iyi mekanik özelliklere sahiptir. Ancak W fazı için, mevcut araştırmaların çoğu, bunun Mg matrisi ile uyumlu olmadığını ve arayüzün ayrılmasının kolay olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, W fazının kırılması da kolaydır. Bu nedenle, W fazı içeren alaşımlar her zaman nispeten düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, bazı araştırmalar W fazının mekanik özellikleri iyileştirmek için faydalı olduğunu göstermiştir: W fazı sünekliği iyileştirebilir. Hacim oranı %11.2 ile %17.5 arasında olduğunda, alaşımlar, W fazı ve Mg matrisi arasındaki güçlü bağ ara yüzü nedeniyle üstün mukavemete sahiptir. W+Z fazları içeren alaşımlar, benzersiz I veya Z fazı içerenlere göre daha kapsamlı mekanik özellikler sergilemiştir (Tahreen & Chen, 2016)

3.3. Mikroyapı Sonuçları

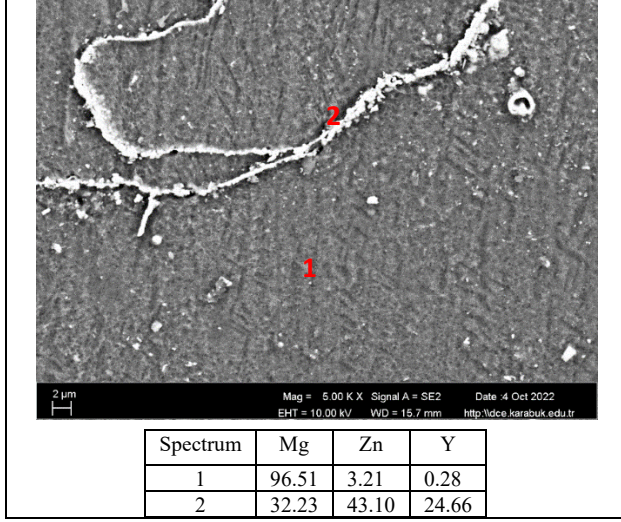
İncelenen numunelerin optik görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. ZW21 döküm alaşımının OM görüntüleri.

Optik mikroskop görüntülerinin incelendiğinde tane ve tane sınırları belirgindir, Tane sınırlarında bir ağ şeklinde ikincil fazların (β - ötektik) dağıldığı gözlenmiştir. Şekil 5(a)'da gösterildiği gibi, döküm ZW21 alaşımının mikroyapısı küçük eş eksenli dendritlerden oluşur ve bir tanedeki dendrit kolları dendritik ötektik yapı ile ayrılır (T.J. Chen, 2012.). Ayrıca ZW21 alaşımının temel olarak birincil α -Mg dendritleri ve interdendritik ötektik yapılardan oluştuğunu gösterdiği ve ötektiklerin bir fazının W ve/veya I fazı olduğu belirlendi. Bu nedenle, ZW21 alaşımının interdendritik ötektiği, esas olarak Mg-Zn-Y üçlü alaşımının ötektik bileşenlerinden oluşmalıdır. (Q. Li et al., 2005).

SEM görüntüleri ise şekile 6'da verilmiştir. Tane içi ve tane sınırlarından elde edilen EDX analizleri ortaya çıkartmıştır, matristen alınan 1 nolu EDX analizinde Mg miktarı % 96.51 gibi yüksekliktedir. 2 nolu spectrumsa sırasıyla (Ağ. %), Mg: 32.23, Zn: 43.10, Y: 24.66 içeren intermetalik oluştuğunu göstermiştir. Önceki XRD incelemelerinde bu durumun I ve W intermetalığının ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6. ZW21 döküm alaşımının SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

3.3. Sertlik Testi Sonuçları

Tablo 3'te döküm halindeki ZW21-2Zn1Y alaşımının Brinell (HB) sertlik test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. ZW21 döküm alaşımının sertlik değerleri.

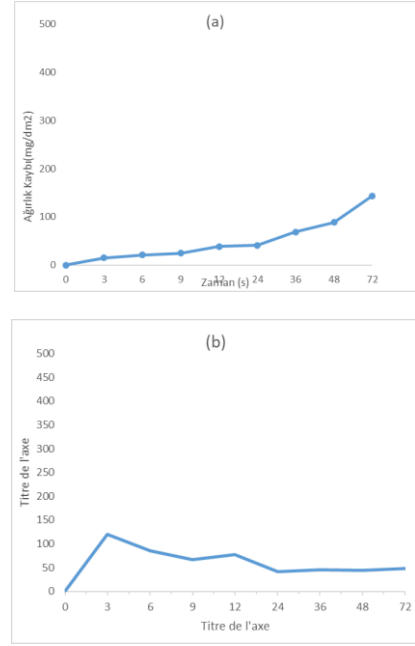
ZW21- Döküm	Brinell Sertlik Değeri (HB)
Ölçüm -1	50,88
Ölçüm -2	51,20
Ölçüm -3	47,58
Ölçüm -4	49,72
Ölçüm -5	50,23
Ortalama	49,92 = 52,55 HV

Bu sonuçlara göre ve bilindiği üzere Y ilavesinin mükemmel tane inceleme gösterdiği; ayrıca Mg'de nispeten yüksek katı çözünürlük; Y açısından zengin fazların oluşması nedeniyle, dolayısıyla tane inceltici etkisi, döküm halindeki ZW21-2Zn1Y'de sertlik değerini artırdığını göstermiştir (Ding et al., 2014). Bu çalışmada döküm halindeki ZW21 alaşımının sertlik değeri 52.55 HV' dir. Dolayısıyla, önceki araştırmada (T.J. Chen) döküm halindeki ZW21-0.5Nd-0.5Sn-0.3Zr-0.05Ca alaşımı sertliği (50 HV) karşılaştırıldığında hemen hemen aynı değerdedir.

In Vitro Korozyon Test Sonuçları

3.4. Daldırma Korozyon Testi Sonuçları

Şekil 7'de daldırma korozyon testi sonrası döküm numunenin korozyon hızı ve saatlere göre ağırlık kaybı grafikleri verilmiştir.



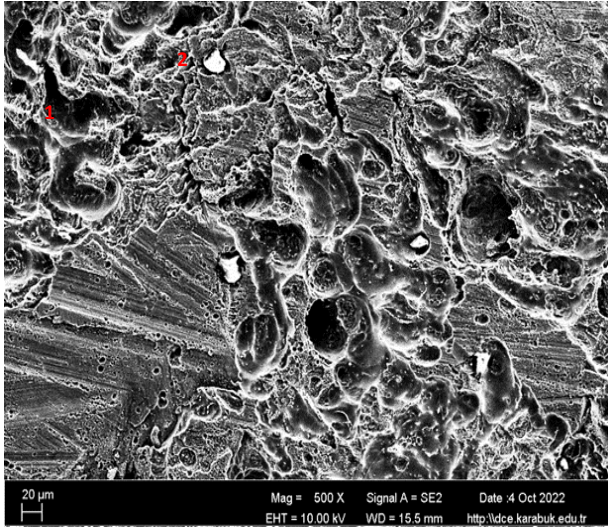
Şekil 7. Döküm alaşımının saatlere göre (a) ağırlık kaybı (b) korozyon hızı (mm/d) grafikleri.

Daldırma test sonuçlarına göre, ilk 3 saate kadar şekilde 7 (b)'de gösterildiği gibi numuneye etki eden korozyon hızı yüksektir, daha sonraki zaman aralığında korozyon gettikçe yavaşlamaktadır. Özellikle 24 saat sonrası korozyon hızı denge haline gelmiştir. Bu denge hali muhtemel yüzeyde oluşmuş olan koruyucu oksit film (MgO) tabakasına dayandırılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. ZW21 döküm alaşımının 72 saat sonra Daldırma görüntüsü.

Döküm alaşımlarına 72 saat (3 gün) boyunca yapılan daldırma korozyon testleri sonrasında korozyona uğramış yüzeyden alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 9' da verilmiştir. Bu sonuçlara göre Mg ,Zn ve Y haricinde diğer belirtilmiş elementler Hank sıvısından kaynaklıdır.

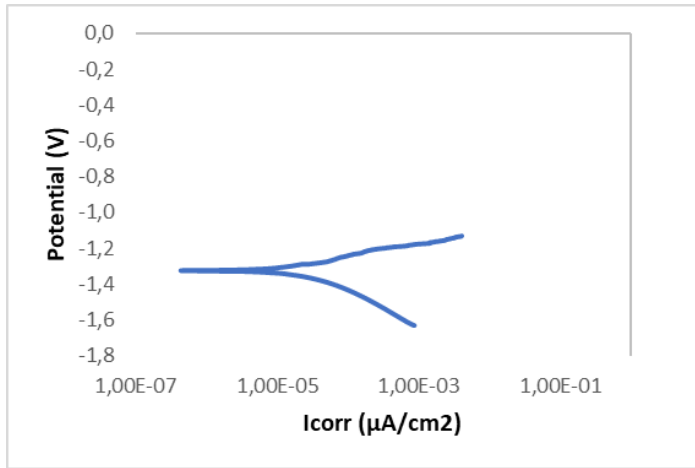


Spectrum	O	Na	Mg	S	Cl	K	Ca	Zn	Y
1	8.87	0.15	83.79	0.1	0.12	0.16	0.04	4.49	2.3
2	5.08	0.34	91.43	0.0	0.0	0.04	0.18	2.82	0.11

Şekil 9. ZW21 döküm alaşımının Daldırma SEM görüntüleri ve EDX analizleri

3.5. Potansiyodinamik Polarizasyon Test Sonuçları

Döküm halindeki ZW21 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon testi sonrası Tafel eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 10. ZW21 döküm alaşımının potansiyodinamik polarizasyon test grafiği.

Tablo 4. ZW21 döküm alaşımının Korozyon akımı yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri.

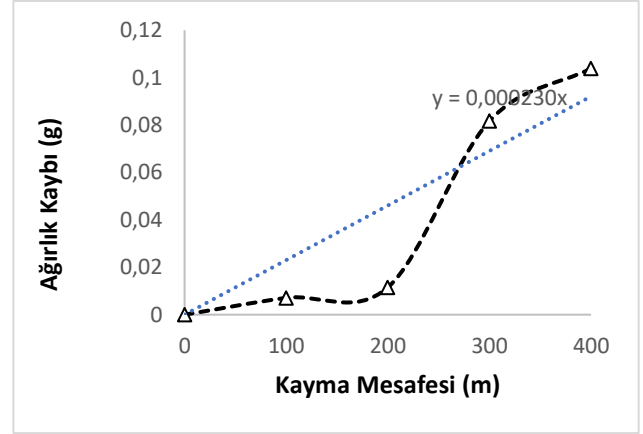
Alaşım	I_{corr} (10^{-6} A/cm ²)	E_{corr} (V)
ZW21-2Zn1Y	19,4	-1,33

Potansiyodinamik sonuçlara göre Korozyon akımı yoğunluğu, korozyon hızı ile doğru orantılı olarak değişir. Ayrıca incelenen alaşımın (Şekil 10) anodik bölgelerindeki kırılmanın, numune

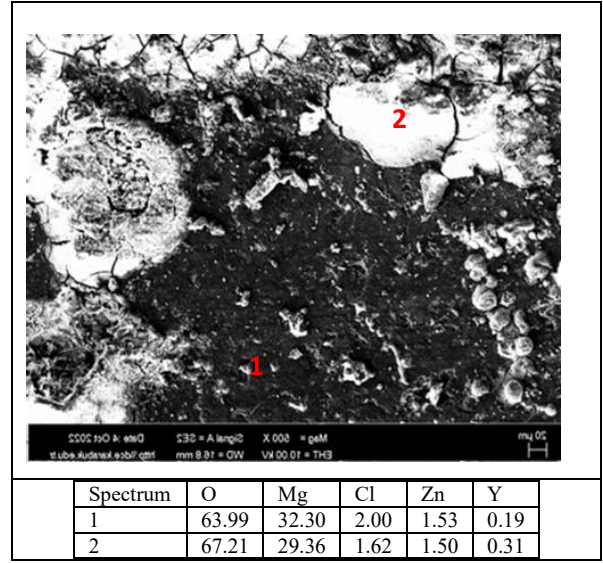
yüzeylerinde $Mg(OH)_2$ oluşumunun neden olduğu lokal çözünmeye bağlı olduğunu düşünülmektedir (Kabir et al., 2021).

3.6. Korozyon Aşınma Testi Sonuçları

ZW21 döküm alaşımının korozyon aşınma test sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları ve aşınma oran katsayısı Şekil 11'de verilmiştir. Ayrıca Korozyon aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 11. ZW21 döküm alaşımının grafiği.



Spectrum	O	Mg	Cl	Zn	Y
1	63.99	32.30	2.00	1.53	0.19
2	67.21	29.36	1.62	1.50	0.31

Şekil 12. ZW21 döküm alaşımının korozyon Aşınma SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

Şekil 11'de, 200 merte sonrası ağırlık kaybının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum koruyucu oksit tabakasının bozulması ile açıklanabilir. Dolayısıyla, Şekil 12'de verilen SEM görüntüsü ve EDX analizine göre spectrumlarda oksijen değerleri yüksek olması oksit tabakasının varlığını ortaya koymaktadır. Aşınma yüzeyinde zamanla bu tabakanın kırılarak aşınma oranının arttığı ve buna bağlı olarak ağırlık kaybında arttığı gözlenmiştir.

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, ZW21 döküm alaşımının mikroyapı, sertlik, korozyon ve korozyon aşınma özellikleri incelenmiş olup aşağıda genel sonuçlar sırasıyla verilmiştir.

- ZW21döküm alaşımının mikroyapısında intermetalik olarak I ve W fazları tespit edilmiştir.
- Alaşımın sertlik test sonucunda 52.55 HV sertlik değeri elde edilmiştir.
- Daldırma testinde ZW21 alaşımının yüzeyinde zamana bağlı olarak oksit film tabakası oluşmuştur ve korozyon hızı buna bağlı olarak yavaşlamıştır.
- Potansiyodinamik sonuçlara göre Korozyon akımı yoğunluğu, korozyon hızı ile doğru orantılı olarak değişmiştir.
- Korozif aşınmada ağırlık kaybının oluşumu, hem sürtünme hem de korozyon etkisiyle meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Kaynakça

- Chen, T. J., Guo, H., Ma, Y., & Hao, Y. (2015). Effects of Reheating Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Thixoforged ZW21 Alloy. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 56(9), 1530–1538. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2015151>
- Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P., & Li, Y. (2014). Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: a review. *J. Mater. Chem. B*, 2(14), 1912–1933. <https://doi.org/10.1039/C3TB21746A>
- Hänzi, A. C., Gerber, I., Schinhammer, M., Löffler, J. F., & Uggowitzer, P. J. (2010). On the in vitro and in vivo degradation performance and biological response of new biodegradable Mg–Y–Zn alloys☆. *Acta Biomaterialia*, 6(5), 1824–1833. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.10.008>
- Kabir, H., Munir, K., Wen, C., & Li, Y. (2021). Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives. *Bioactive Materials*, 6(3), 836–879. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.013>
- Li, N., & Zheng, Y. (2013). Novel Magnesium Alloys Developed for Biomedical Application: A Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(6), 489–502. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.005>
- Li, Q., Wang, Q., Zhou, H., Zeng, X., Zhang, Y., & Ding, W. (2005). High strength extruded Mg–5Zn–2Nd–1.5Y–0.6Zr–0.4Ca alloy produced by electromagnetic casting. *Materials Letters*, 59(19–20), 2549–2554. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.044>
- Tahreen, N., & Chen, D. L. (2016). A Critical Review of Mg–Zn–Y Series Alloys Containing I, W, and LPSO Phases. *Advanced Engineering Materials*, 18(12), 1983–2002. <https://doi.org/10.1002/adem.201600393>
- Tie, D., Feyerabend, F., Müller, W.-D., Schade, R., Liefeth, K., Kainer, K., & Willumeit, R. (2013). Antibacterial biodegradable Mg–Ag alloys. *European Cells and Materials*, 25, 284–298. <https://doi.org/10.22203/eCM.v025a20>
- T.J. Chen , W. W. D. H. Z. Y. M. Y. H. (2012). , *Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZW21 magnesium alloy*.
- T.J. Chen , W. W. D. H. Z. Y. M. Y. H. (). Development of a new magnesium alloy ZW21. *Materials and Design*.
- Wang, Y., Wei, M., Gao, J., Hu, J., & Zhang, Y. (2008). Corrosion process of pure magnesium in simulated body fluid. *Materials Letters*, 62(14), 2181–2184. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.045>
- Yamaguchi, M. (1998). Role of zinc in bone formation and bone resorption. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 11(2–3), 119–135. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-670X\(1998\)11:2/3<119::AID-JTRAS>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-670X(1998)11:2/3<119::AID-JTRAS>3.0.CO;2-3)
- Zhang, B., Li, B., Gao, S., Li, Y., Cao, R., Cheng, J., Li, R., Wang, E., Guo, Y., Zhang, K., Liang, J., & Liu, B. (2020). Y-doped TiO₂ coating with superior bioactivity and antibacterial property prepared via plasma electrolytic oxidation. *Materials & Design*, 192, 108758. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108758>
- Zheng, Y. (2015). *Magnesium Alloys as Degradable Biomaterials*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18932>