




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Biyobozunur Mg-Ag Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Zn ve Nd Elementlerinin Etkisi

 Levent ELEN^{a,*}

^a*Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: leventelen@karabuk.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.996415

ÖZ

Bu çalışmada, %0,5 oranlarında (Zn ve Nd) element ilaveli Mg-%3Ag döküm alaşımlarının, mikroyapı, mekanik, in vitro korozyon özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, alaşımlara ilave edilen Zn elementinin etkisiyle (Mg-3Ag-0,5Zn) alaşımda tanelerin incelendiği ve bu sayede alaşımların bazı mekanik özelliklerinin de arttığı gözlenmiştir. Nd elementi ilavesi ile oluşturulan (Mg-3Ag-0,5Nd) alaşımında ise en yüksek sertlik değeri gözlenmiştir. Korozyon testleri sonrasında ise alaşım elementlerine bağlı olarak farklı korozyon değerleri tespit edilmiştir. Alaşımların yapısında tespit edilen ikincil fazların, alaşımların mekanik özelliklerine ve korozyon özelliklerine etki ettiği tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar neticesinde Mg-Ag alaşımlarının biyomalzeme alanında gelişime açık ve ihtiyaç duyduğu kanısına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mg-Ag alaşımları, Mikroyapı, Mekanik özellikler, *In vitro* korozyon özellikleri

Effect of Zn and Nd Elements on Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Biodegradable Mg-Ag Alloys

ABSTRACT

In this study, casting, microstructure, mechanical and in vitro corrosion properties of 0.5% (Zn and Nd) element added Mg-3%Ag cast alloys were investigated. According to the results of the experiment, it was observed that the grains got refined with the effect of Zn element added to the alloys and thus some mechanical properties of the alloys increased. The highest hardness value was observed in the alloy (Mg-3Ag-0.5Nd) created by the addition of Nd element. After the corrosion tests, differences were determined depending on the alloying elements. It has been determined that the secondary phases seen in the structure of the alloys have an effect on the mechanical and corrosion properties of these alloys. According to all these results, it was concluded that Mg-Ag alloys are required and open for development in the field of biomaterials.

Keywords: Mg-Ag alloys, microstructure, Mechanical properties, *In vitro* corrosion properties

I. GİRİŞ

Magnezyum (Mg) alaşımları iyi mekanik özellikleri sebebiyle endüstriyel yapı malzemesi olarak ve otomotiv endüstrisinde kullanımı açısından ilk sıralarda yer alırken [1], düşük yoğunluk özelliğinden dolayı ise havacılık ve elektronik endüstrisinde kendisine geniş yer bulmuştur. Fakat Mg ve alaşımları, biyomalzeme alanında yeni gelişmeler içerisinde olmasından dolayı tıp ve malzeme literatüründe doyurucu bir bilgiye henüz ulaşmış değildir. Özellikle biyobozunur malzeme üretiminde ve kullanımında tam manasıyla yaygınlaşmasını henüz tamamlayamamıştır. Bunun en temel nedenlerden biri insan sağlığı olduğu için yapılan deneysel ve klinik çalışmaların süresinin uzun olması ve de alaşımlandırma pratiğinin eksikliği ya da yanlışlığı sayılabilir. Ayrıca tıp alanında kullanılması öngörülen bu küçük boyutlardaki parçaların boyutsal uygunluğunun sağlanabilmesi için ikinci bir işlem mekanizmasının (ekstrüzyon, hadde vb.) devreye girmesi gerekebilir. Bunun yanı sıra en iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi için sadece üretim yöntemi değil alaşım elementleri ve soğuma hızı [2]–[4] bu duruma etki eder. Dolayısıyla da farklı yöntemlerle elde edilen bazı mekanik özellikler, döküm yöntemi, soğuma hızı ve alaşım elementlerinin sayesinde de sağlanabilir.

Biyobozunur Mg implantlarının en önemli özelliği fizyolojik ortamda yavaş yavaş çözünmesidir. Bu durum ise, implantları tekrar insan vücudundan çıkarmak için revizyon ameliyatı gerekliliğini ortadan kaldırır [5], böylece hastalar için ikincil bir ameliyat kaygısı ve muhtemel enfeksiyon riskleri de ortadan kaldırılmış olur. Dahası, yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip olan Mg ve alaşımlarının, Young modülü ($E= 41-45$ GPa) doğal kemiğin ($E= 3-20$ GPa) değerine oldukça yakındır [5]–[7]. Bu nedenle, Mg alaşımları, stres koruyucu etkiyi en aza indirger ve kemiğin kendi kendini tamir etmesini sağlar [5], [7].

Mg içerisinde yüksek çözünürlüğe (ağırlıkça %15) sahip olmakla birlikte katı çözeltili oluşturarak Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştiren gümüş (Ag) [8] biyomalzeme alanında oldukça önemli bir elementtir. Çünkü Ag, bakterilerin DNA ve RNA yapısını deforme edip çoğalmasını ve yaşamını sürdürmesini engelleyerek antibakteriyel özellik göstermektedir [9]. Özellikle metisilin dirençli stafilokok aureus (Kısa adı MRSA olan ve genel mukozal dokularda yaşayan ve türeyen bir tür bakteri) gibi fakültatif anaerobik, sporsuz ve gram pozitif olan bakterilerin canlılığını düşürebilmek ve ortadan kaldırabilmek için [9] Ag ilaveli Mg alaşımları ideal alaşımlar olarak nitelendirilebilir.

Çinko (Zn), Mg-Zn denge diyagramına göre hem katı çözeltili hem de yaşlandırma olanakları sağlayan, ağırlıkça %6,2 katı bir çözünürlüğe sahip önemli bir alaşım elementidir. Zn, insan vücudunda kemik metabolizmasında rol oynayan, vücutta fizyolojik işlevi koruyan ve kemiklerde osteoblast fosfataz aktivitesini artıran önemli bir eser elementtir [10]. Dolayısıyla biyomalzeme alanında da önemli bir elementtir.

Nadir toprak elementleri (REE)'ler, yüksek sıcaklıkta dayanımı ve sürünme direncini artırabilen zayıf yayılma özelliğine sahiptir [8]. Ayrıca Mg'a ilave edildiğinde mekanik özelliği artırması, korozyon direncini artırması ve fizyolojik ortamda biyolojik uyumluluğu artırması beklenir [8]. Özellikle Neodimyum (Nd) aynı zamanda kanser ilaçlarında da kullanılan antikansorejen özelliğe sahip önemli bir elementtir.

Dolayısıyla bu çalışmada %3 Ag içeren Mg-Ag alaşımlarına %0,5 (ağ.) oranında Zn ve Nd elementleri ilave edilerek elde edilen döküm alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve in vitro korozyon özellikleri incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalarda, Mg-Ag magnezyum alaşımlarının hazırlanmasında Bilginoğlu Endüstri firmasından temin edilen %99,9 saflıkta magnezyum ve 4D Makine ve Teknoloji firmasından temin edilen %99,9 saflıkta gümüş kullanılmıştır.

Alaşımların ergitme ve döküm proseslerinde atmosfer kontrollü indüksiyon döküm ocağı kullanılmıştır. Döküm sıcaklığı 750 °C ve kalıp sıcaklığı 250 °C olarak belirlenmiştir. Ergitme ve karıştırma işlemlerinin ardından döküm işlemi, kokil kalıp içerisine (CO₂+%1SF₆) gaz koruması altında yapılmıştır.

Mg-Ag alaşımlarının döküm sonrası kimyasal bileşimleri, Rigaku ZSX Primus II marka cihaz kullanılarak XRF (X-Işınları Floresans) yöntemi ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Alaşımların kimyasal analizleri.

Alaşım	Kod	Kimyasal Bileşim (ağ. %)							
		Ag	Zn	Nd	Al	Si	P	Mn	Mg
Mg-3Ag	Q	3,351	0,003	-	0,023	0,036	0,001	0,027	Kalan
Mg-3Ag-0,5Zn	QZ	3,061	0,576	-	0,019	0,035	0,003	0,035	Kalan
Mg-3Ag-0,5Nd	QE	3,173	0,006	0,558	0,034	0,029	0,001	0,033	Kalan

Metalografik incelemeler için numune yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1200 ve 2000 mesh zımparalar ile saf su kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra 1 µm alümina süspansiyon kullanılarak yüzeyler parlatılarak Nikon Epiphot marka optik mikroskopta mikroyapıları incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (Carl Zeiss Ultra Plus) ile SEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

Döküm sonrası 5 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin çekme testleri, Zwick/Roell Z600 çekme cihazında, $1,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin sertlikleri, Shimadzu marka HMV model Micro Hardness Tester cihazında Vickers sertlik testi ile belirlenmiştir. Sertlik deneyi 0,3 kg yük altında 15 s uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Döküm sonrası bütün numunelerin XRD profilleri Rigaku Ultima IV marka cihaz ile 10°-90° tarama açısı aralığında ve 3 °/min tarama hızında elde edilmiştir.

Döküm sonrası alaşımların korozyon testleri ~37 °C'de, 7.4 pH'a sahip ve kompozisyonu: NaCl 8.0 g/l, KCl 0.4 g/l, CaCl₂ 0.14 g/l, NaHCO₃ 0.35 g/l, C₆H₆O₆ (glucose) 1.0 g/l, MgCl₂·6H₂O 0.1 g/l, MgSO₄·7H₂O 0.06 g/l, KH₂PO₄ 0.06 g/l, Na₂HPO₄·12H₂O 0.06 g/l. bileşiminden oluşan Hank sıvısında yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler ~37 °C'de, 7.4 pH olan Hank sıvısında, bilgisayar kontrollü DC105 korozyon analizine sahip Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvanostat ile 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.

Daldırma testleri ~37 °C'de, 7.4 pH'a sahip Hank sıvısında yapılmıştır. Daldırma işlemi 24 ve 72 saat aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Daldırma sonrası ortalama korozyon hızı CR_m [11] hesaplanmıştır.

Ortalama korozyon hızı CR_m, aşağıdaki denklem kullanılarak belirlendi (Eşitlik 1):

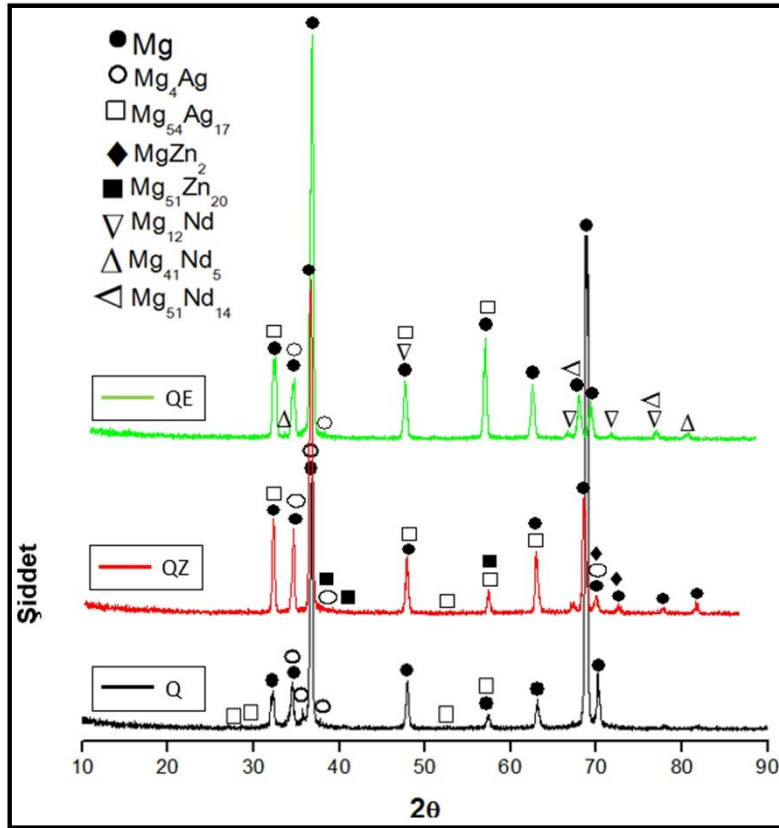
$$CR_m = \frac{8.76 \times 10^4 \times \Delta g}{A \times t \times \rho} \quad (1)$$

Formülde, Δg gram cinsinden ağırlık değişimi (daldırma öncesi ve sonrası fark), A cm^2 cinsinden numunenin yüzey alanı, t saat cinsinden daldırma süresi ve ρ g/cm^3 cinsinden yoğunluktur.

III. SONUÇ VE TARTIŞMA

A. XRD SONUÇLARI

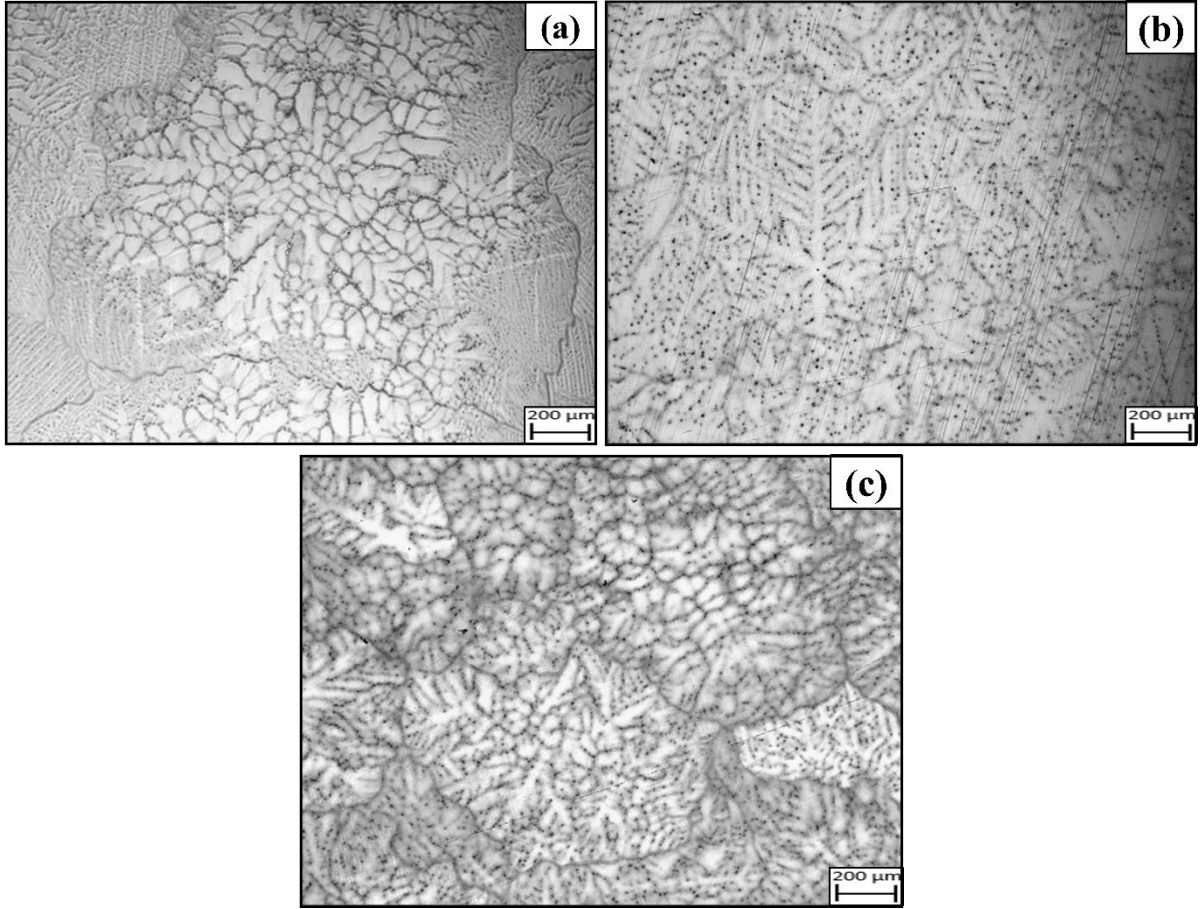
Alaşımın XRD faz analiz sonuçları Şekil 1.'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Q alaşımında Mg (JCPDS kart no 01-089-5003), Mg_4Ag (JCPDS kart no 00-045-1020), $\text{Mg}_{54}\text{Ag}_{17}$ (JCPDS 03-065-8314) fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Bu fazların yanısıra, QZ alaşımında MgZn_2 (JCPDS kart no 03-065-0120), $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$ (JCPDS kart no 03-065-4290) fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Ancak MgZn_2 fazı zayıf pikler oluşturmuştur. (Ben-Hamu vd.) yapmış oldukları çalışmada, Ag miktarının %3'ün altında olması halinde MgZn_2 fazının daha belirgin hale geldiğini ve bunun yanı sıra Ag miktarı %3'e kadar çıktığında $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$ fazının belirginleştiği rapor edilmiştir [12]. Ayrıca (Feng vd.) yapmış oldukları çalışmada MgZn_2 fazının varlığını tespit etmiştir [13]. QE alaşımında ise Mg_{12}Nd (JCPDS kart no 03-065-2772), $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ (JCPDS kart no 00-045-1031), $\text{Ag}_{51}\text{Nd}_{14}$ (JCPDS kart no 00-023-0641) kırınım tepeleri gözlenmiştir. (Zhang vd.) yapmış oldukları çalışmada Mg_{12}Nd fazının Mg ana matrisi etrafında dağılmış olarak tespit ettiklerini rapor etmiş ve XRD analizlerinde dikkate değer pikler oluşturduğunu gözlemlemiştir [14]. (Feng vd.) $\text{Ag}_{51}\text{Nd}_{14}$ fazları, farklı Ag içeriğine sahip tüm alaşımlarda tanımlanabilir olduğunu vurgulamıştır [13]. Ayrıca (Zhang vd.) yapmış oldukları çalışmada α -Mg'un yanısıra yapıda hem Mg_{12}Nd hem de $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ fazının varlığını tespit etmiştir [15].



Şekil 1. Alaşımların XRD faz analizleri.

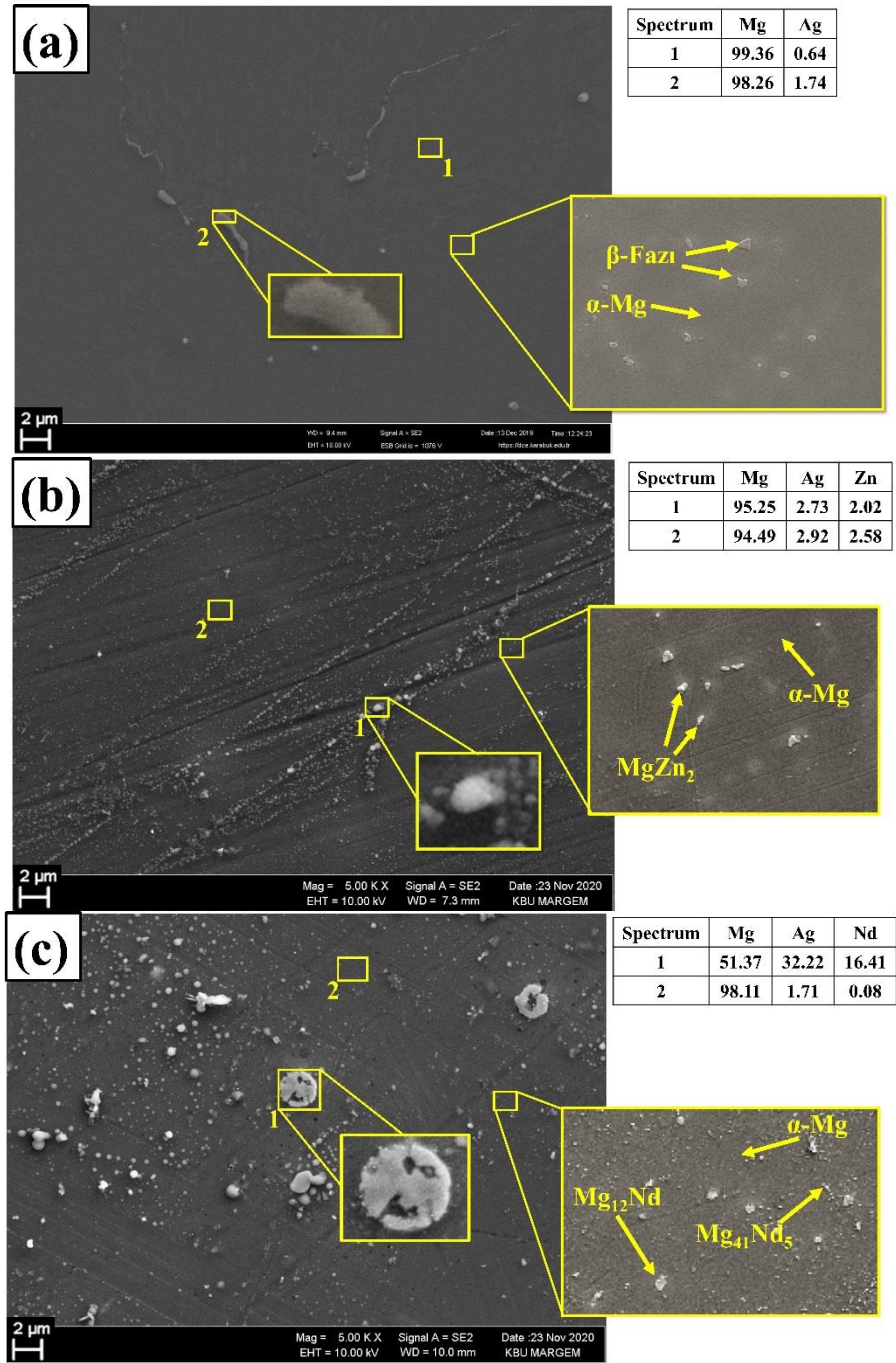
B. MİKROYAPI SONUÇLARI

Alaşımlara ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. Mg-Ag alaşımlarının yapısı üzerindeki dendritik segregasyonun etkisi, (Podosek vd.) tarafından yapılan çalışma ile ikili Mg-Ag alaşımlarının denge dışı katılaşmasının teorik ve deneysel olarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir [16]. Yapılan çalışma sonucunda ise, denge dışı ötektiklerin mümkün olan en düşük miktarlarını elde etmek için ve alaşımların, yapı mekanik özellikler açısından daha uygun hale gelebilmesi için, daha yüksek hızlarda katılaşması gerektiğini rapor etmiştir [16]. Bu bilgiler doğrultusunda alaşımların mikroyapısı incelendiğinde, genel olarak dendritik yapıdan meydana geldiği görülmektedir. Mg-%3Ag (Q) alaşımına ilave edilen (Zn ve Nd) elementlerin mikroyapıya etkisi incelendiğinde (Şekil 2), QZ döküm alaşımında Q alaşımına kıyasla, ikincil faz partiküllerinin daha incelmış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2. Alaşımların optik mikroskop görüntüleri (a) Q, (b) QZ, (c) QE.

Alaşımlara ait SEM görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 3’te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ötektik büyük β -Mg₄Ag /Mg₅₄Ag₁₇ faz partiküllerinden ve α -Mg fazından oluştuğu tespit edilmiştir. QZ alaşımında çinkoca ve gümüşçe zengin bir alaşım oluşturulmuştur. Aynı şekilde QE alaşımında da ilave elementlerce zengin partiküllerin varlığı tespit edilmiştir.



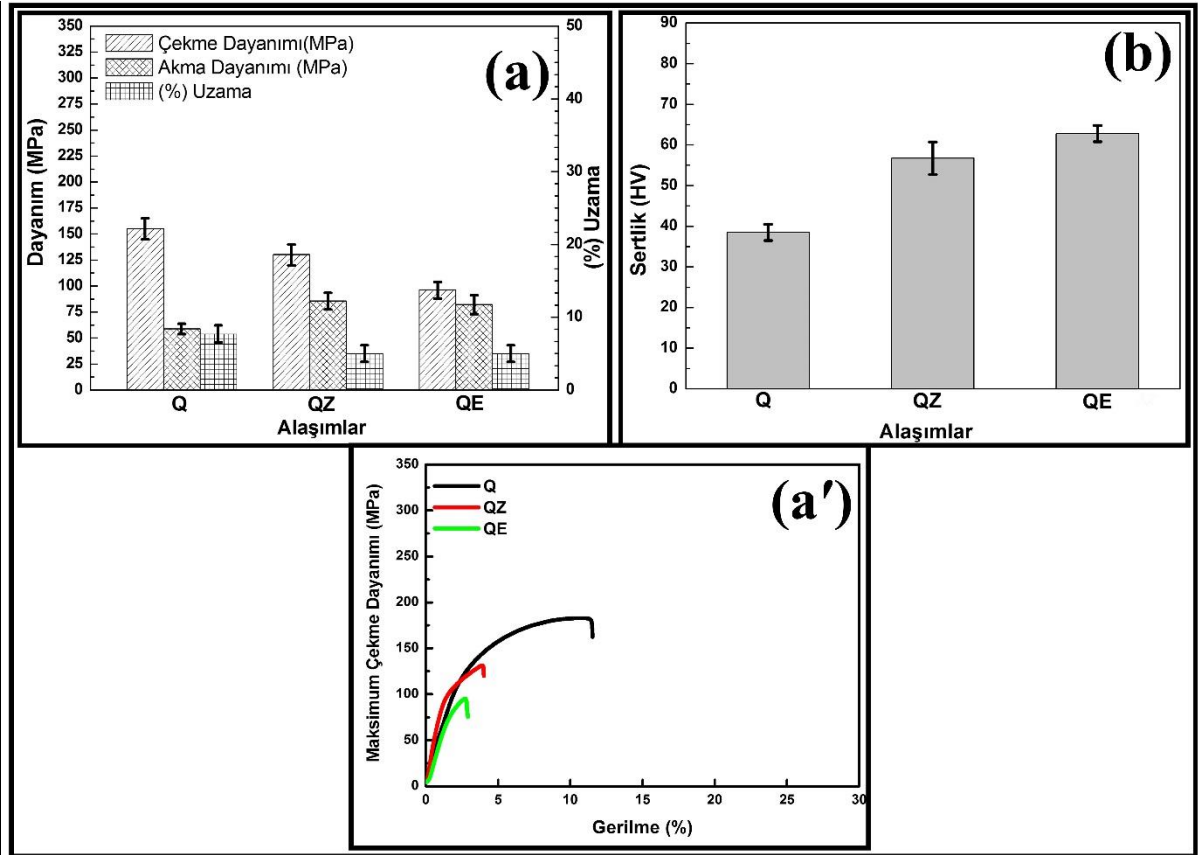
Şekil 3. Alaşımların SEM görüntüleri ve EDX analizleri (a) Q, (b) QZ, (c) QE.

Literatürde Mg-Nd sistemi hakkında belirgin bir deneysel veri eksikliği mevcuttur ve var olanlar tam manasıyla tutarlı değildir [17]. Bununla birlikte, en son sonuçlar, Mg-Nd sisteminin sıvıdan, uç katı çözeltilerden: Hegzagona sıkı paketli (hsp) (Mg katı çözeltisi), hacim merkezli kübik (hmk) ve çift hezagonal sıkıpaket (çhsp) (sırasıyla yüksek ve düşük sıcaklıkta Nd katı çözeltisi) ve metallere arası bileşikler $Mg_{41}Nd_5$ ve $Mg_{12}Nd$ 'den oluştuğu konusunda hemfikirlerdir [17]. Mg-Nd sisteminde bulunan intermetalik fazlardan $Mg_{41}Nd_5$ fazı Mg açısından en zengin olanıdır [17]. 560 °C'de peritektik olarak sıvı ve Mg_3Nd fazlarına ayrışır ve ayrıca Mg açısından zengin uç katı çözelti ve 545 °C'de sıvı faz ile ötektik reaksiyona girer (at. %92,5 Mg) [18]. Diğer $Mg_{41}RE_5$ fazları (tI92-Ce₅Mg₄₁ tipi) gibi tetragonal bir yapıya sahiptir [18].

C. ÇEKME VE SERTLİK TESTLERİ SONUÇLARI

Alaşımın çekme dayanımları Şekil 4(a) incelendiğinde Q alaşımına ilave edilen elementlerin akma dayanımına olumlu bir etki sergilediği, çekme dayanımlarında olumlu bir etki ortaya çıkarmadığı tespit edilmiştir. Genel olarak Ag elementinin Mg alaşımlarında güçlü katı eriyik etkisine sahip olması ve bu sayede ince dendritik yapının yanısıra tek düze mikroyapı oluşumunu [13] desteklemesinden dolayı çekme dayanımlarında çok fazla bir artış sergilemesi beklenemez. Bununla birlikte Hem Mg-Ag hem de Mg-Zn ikili sistemlerinde bulunan HMK katı çözeltileri de QZ (Mg-Ag-Zn üçlü sistem) alaşımlarında meydana geldiği [19] için çekme dayanımının düşmesine fakat akma dayanımının artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

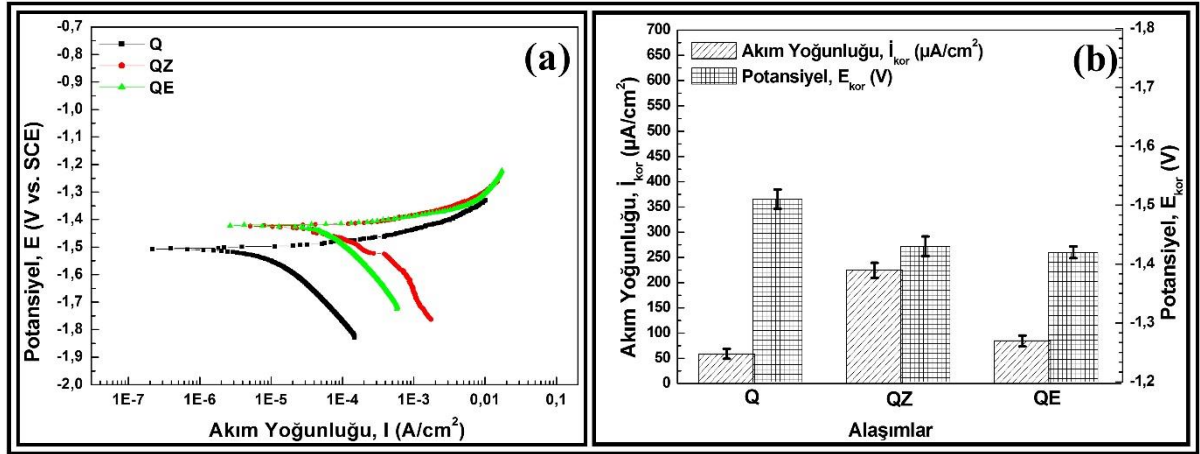
Nd elementinin Mg içerisinde maksimum katı çözünürlüğü Mg-Nd faz diyagramına [18] göre 552 °C'de en fazla %3,6 kadardır. Ancak sıcaklığın azalmasıyla birlikte çözünürlük miktarı da azalma gösterir. Bu sebeple ortam sıcaklığında Nd'nin Mg içerisindeki çözünürlüğü göz ardı edilebilir seviyededir. Ayrıca denge dışı katılaşma nedeniyle, α -Mg aşırı doymuştur ve Nd'nin bir kısmı, döküm alaşımlarında çökeltiler yerine boşanmış ötektik $Mg_{12}Nd$ oluşturur [20]. Bu sebeple Nd ilave edilmiş QE döküm alaşımlarının (Şekil 4(a)) mekanik özelliklerinde bir iyileşme olmadığı düşünülmektedir. Alaşım elementi ilavesi ile sertlik değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca QE alaşımının sertlik değeri Şekil 4(b) incelendiğinde, tüm alaşımlara kıyasla en yüksek değere ulaşmıştır. Nd ilaveli döküm Mg alaşımlarının sertlik değişimini açıklamak için üç faktör vardır. İlk olarak, ortalama tane boyutunun azalması, yani tane sınırının hacim oranı artar, bu da tane sınırının güçlenmesine yol açar [21]. İkinci olarak, katı çözeltiler güçlendirme etkisini üreten matriste giderek daha fazla Nd atomu çözülür [21]. Üçüncüsü, alaşımlardaki Nd içeriği miktarı, matristeki Nd elementinin maksimum katı çözünürlüğünü aştığında, ötektik reaksiyon nedeniyle daha sert ikinci faz oluşur ve bu da ikinci fazın güçlenmesine neden olur [21]. QE alaşımının sertlik değerindeki artış bu nedenlerle açıklanabilir.



Şekil 4. Alaşımların (a) çekme-akma dayanımları ve % uzama, (b) sertlik değerleri.

D. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

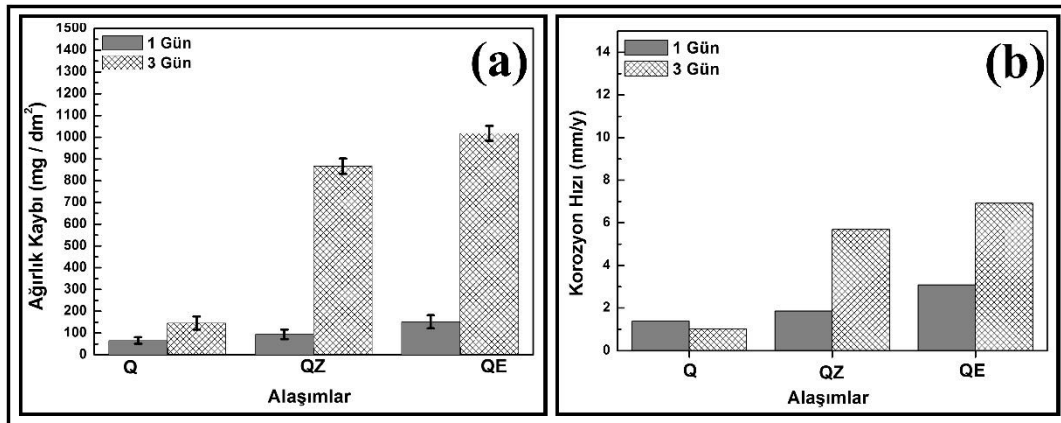
Şekil 5'te alaşımlara ait potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Q alaşımının diğer alaşımlara kıyasla korozyon potansiyelinin daha negatif değerde olduğu tespit edilmiştir. Galvanik korozyonun oluşum prensibine bağlı olarak, anot faz olan α -Mg oranının katot faz olan intermetalikler oranından büyük olması durumu galvanik korozyonu hızlandırıcı rol oynamaktadır [22]. Bununla birlikte döküm halinde malzemelerde genel olarak çökelmeler ve segregasyonlar meydana gelebilmektedir. Meydana gelen çökelmeler ve segregasyonlar ise daha çok tane sınırlarında olmaktadır. Dolayısıyla da yapı içerisinde meydana gelen ikincil fazların öncelikle ve büyük miktarlarda tane sınırları boyunca çökmesi ve (ağ. %3) Ag'ün varlığı ile intermetalik fazların çoğalmasından neticesinde (Şekil 5(b)) farklı korozyon oranlarının ortaya çıkardığı düşünülmektedir.



Şekil 5. Alaşımların (a) potansiyodinamik polarizasyon test sonuçları (b) korozyon akım yoğunluğu ve potansiyel değerleri.

Alaşımlara ait 72 saat (3 günlük) daldırma korozyon testi sonrası ortaya çıkan sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.

Bozunma hızı, artan miktarda çökelti ile doğrusal olarak artar ve çökeltiler, lokal bozunma durumuna neden olabilir [23]. Dolayısıyla çökeltilerin hem miktarı hem de dağılımı, mikrogalvanik korozyon prensibine bağlı olarak bozunma davranışını etkileyebilir [24], [25].



Şekil 6. Alaşımların 1 ve 3 günlük daldırma korozyon testi sonrası, (a) ağırlık kaybı, (b) korozyon hızı.

Sonuçlar incelendiğinde, ağırlık kaybı oranları alaşımların genelinde (Şekil 6(a)) ilk 24 saat içerisinde stabil iken daha sonra artış gösterdiği tespit edilmiştir. Korozyon hızı (Şekil 6(b)), artan miktarda

çökelti ile doğrusal olarak artma eğiliminde olması ve çökeltilerin lokal bozunmaya neden olabilmesi gibi durumlar neticesinde Zn ve Nd içeren (QZ ve QE) döküm alaşımlarının Q alaşımına kıyasla artan bir korozyon hızı sergilediği tespit edilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucunda;

1- Mg'a Ag ilavesi ile yapıda Mg₄Ag ve Mg₅₄Ag₁₇ fazlarının varlığı tespit edilmiştir. Diğer alaşım elementleri (Zn ve Nd) ilavesi ile yapıda MgZn₂, Mg₅₁Zn₂₀, Mg₁₂Nd, Mg₄₁Nd₅, Ag₅₁Nd₁₄ fazlarının varlığı tespit edilmiştir.

2- Alaşımların mekanik özellikleri element ilavesi ile farklılık göstermiş ve buna göre; Q alaşımının çekme dayanımı 155 MPa iken QZ ve QE alaşımlarında sırası ile 130 ve 96 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Q alaşımının akma dayanımı 58,8 MPa iken QZ ve QE alaşımlarında sırası ile 85,5 ve 82 MPa olduğu gözlenmiştir. Ayrıca alaşımların sertlik değerlerinin, Q alaşımında 38,5 HV, QZ alaşımında 56,7 ve QE alaşımında 62,8 HV olduğu gözlenmiştir.

3- Potansiyodinamik polarizasyon testleri sonucunda, en düşük akım yoğunluğu değeri Q ve QE alaşımında, en yüksek akım yoğunluğu ise QZ alaşımında gözlenmiştir. Bununla birlikte Q alaşımının potansiyel değeri QZ ve QE alaşımına kıyasla daha negatif değer sergilediği tespit edilmiştir.

4- Daldırma korozyon testleri sonrası (1 ve 3 günlük) en fazla ağırlık kaybı (1 günlük: 151, 3 günlük: 1017 mg/dm²) QE alaşımında gözlenmiştir. En düşük ağırlık kaybı (1 günlük: 65,5, 3 günlük: 145,2 mg/dm²) Q alaşımında tespit edilmiştir. QZ alaşımında ise ağırlık kaybı (1 günlük: 94, 3 günlük: 866 mg/dm²) QE alaşımına yakın bir değer sergilediği gözlenmiştir. Korozyon hızlarında da en düşük (1 günlük: 1,3 mm/y, 3 günlük: 1,0 mm/y) Q alaşımında gözlenirken en yüksek değer ise gene (1 günlük: 3,0 mm/y, 3 günlük: 6,9 mm/y) QE alaşımında gözlenmiştir. QZ alaşımının korozyon hızı (1 günlük: 1,8 mm/y, 3 günlük: 5,6 mm/y) QE alaşımına yakın değer sergilemiştir.

5- Biyobozunur Mg alaşımları genel olarak düz kemikler için implant malzemesi olarak tasarlanmaktadır. Dolayısıyla alaşım modifikasyonu ile üretilmiş Mg-Ag alaşımları da küçük düz kemikler için ideal bir biyomalzemedir denilebilir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1002 no'lu ve 119M645 kodlu Hızlı Destek Projesi ile desteklenmiştir.

V. KAYNAKLAR

[1] M. Vogel, "Mikrostruktur Und Kriechverhalten Von Magnesium-Druckgusslegierungen Im System Mg-Zn-Al-Ca," Ph.D. Thesis, Universität Stuttgart, 2002.

[2] L. Elen, "AZ91 Magnezyum alaşımına farklı oranlarda Bi ve Sb ilavesi ile katılma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi," Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2012.

[3] L. Elen, Y. Türen and E. Koç, "Effects of solidification rate on microstructure and mechanical properties with Sb at Different Ratio of AZ91 Quality Mg Alloy," *Int. J. Eng. Res. Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 451–463, 2019.

- [4] L. Elen, B. Cicek, E. Koc, Y. Turen, Y. Sun and H. Ahlatci, "Effects of alloying element and cooling rate on properties of AM60 Mg alloy," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 9, 2019.
- [5] M. P. Staiger, A. M. Pietak, J. Huadmai, and G. Dias, "Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review," *Biomaterials*, vol. 27, no. 9, pp. 1728–1734, 2006.
- [6] F. Witte, V. Kaese, H. Haferkamp, E. Switzer, A. Meyer-Lindenberg, C. J. Wirth, H. Windhagen, "In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response," *Biomaterials*, vol. 26, no. 17, pp. 3557–3563, 2005.
- [7] G. Song and S. Song, "A Possible Biodegradable Magnesium Implant Material," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 9, no. 4, pp. 298–302, 2007.
- [8] Y. Zheng, *Magnesium alloys as degradable biomaterials*. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- [9] D. Tie, F. Feyerabend, W. D. Müller, R. Schade, K. Liefeth, K. Kainer, R. Willumeit, "Antibacterial biodegradable Mg-Ag alloys," *Eur. Cell. Mater.*, vol. 25, pp. 284–298, 2013.
- [10] K. Nagata, N. Nakashima-Kamimura, T. Mikami, I. Ohsawa, and S. Ohta, "Consumption of molecular hydrogen prevents the stress-induced impairments in hippocampus-dependent learning tasks during chronic physical restraint in mice," *Neuropsychopharmacol. Off. Publ. Am. Coll. Neuropsychopharmacol.*, vol. 34, no. 2, pp. 501–508, 2009.
- [11] P. Maier, N. Lauth, C. L. Mendis, M. Bechly, and N. Hort, "Mechanical and corrosion properties of two precipitation-hardened Mg-Y-Nd-Gd-Dy alloys with small changes in chemical composition," *JOM*, vol. 71, no. 4, pp. 1426–1435, 2019.
- [12] G. Ben-Hamu, D. Eliezer, A. Kaya, Y. G. Na, and K. S. Shin, "Microstructure and corrosion behavior of Mg-Zn-Ag alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 435–436, pp. 579–587, 2006.
- [13] Y. Feng, S. Zhu, L. Wang, L. Chang, Y. Hou, and S. Guan, "Fabrication and characterization of biodegradable Mg-Zn-Y-Nd-Ag alloy: Microstructure, mechanical properties, corrosion behavior and antibacterial activities," *Bioact. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 225–235, 2018.
- [14] X. Zhang, Z. Ba, Z. Wang, X. He, C. Shen, and Q. Wang, "Influence of silver addition on microstructure and corrosion behavior of Mg-Nd-Zn-Zr alloys for biomedical application," *Mater. Lett.*, vol. 100, pp. 188–191, 2013.
- [15] J. Zhang, B. Jiang, Q. Yang, D. Huang, A. Tang, F. Pan, Q. Han, "Role of second phases on the corrosion resistance of Mg-Nd-Zr alloys," *J. Alloys Compd.*, vol. 849, pp. 156619, 2020.
- [16] M., Podosek, A. Rakowska, R. Ciach, "The Influence of Dendrite Segregation on Structure of Mg-Ag Alloys", in *Proceedings of the Third International Magnesium Conference*, Manchester, England, 1996, pp. 545–555.
- [17] S. Gorsse, C. R. Hutchinson, B. Chevalier, and J.-F. Nie, "A thermodynamic assessment of the Mg-Nd binary system using random solution and associate models for the liquid phase," *J. Alloys Compd.*, vol. 392, no. 1, pp. 253–262, 2005.
- [18] S. Delfino, A. Saccone, and R. Ferro, "Phase relationships in the neodymium-magnesium alloy system," *Metall. Trans. A*, vol. 21, no. 8, pp. 2109–2114, 1990.

- [19] J. Wang, Y.-N. Zhang, P. Hudon, I.-H. Jung, M. Medraj, and P. Chartrand, "Experimental study of the phase equilibria in the Mg–Zn–Ag ternary system at 300°C," *J. Alloys Compd.*, vol. 639, pp. 593–601, 2015.
- [20] J. Yan, Y. Sun, F. Xue, S. Xue, and W. Tao, "Microstructure and mechanical properties in cast magnesium–neodymium binary alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 476, no. 1, pp. 366–371, 2008.
- [21] C. Su, D. Li, T. Ying, L. Zhou, L. Li, and X. Zeng, "Effect of Nd content and heat treatment on the thermal conductivity of MgNd alloys," *J. Alloys Compd.*, vol. 685, pp. 114–121, 2016.
- [22] G. L. Song and A. Atrens, "Corrosion mechanisms of magnesium alloys," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–33, 1999.
- [23] E. Ghali, W. Dietzel, and K.-U. Kainer, "General and localized corrosion of magnesium alloys: A critical review," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 13, no. 1, pp. 7–23, 2004.
- [24] G. Song and A. Atrens, "Understanding Magnesium Corrosion—A Framework for Improved Alloy Performance," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 5, no. 12, pp. 837–858, 2003.
- [25] F. Witte, N. Hort, C. Vogt, S. Cohen, K. U. Kainer, R. Willumeit, F. Feyerabend, "Degradable biomaterials based on magnesium corrosion," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 63–72, 2008.