



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

MgAlSi Üçlü Alaşımının Üretimi ve in-vitro biyo Uyumluluk İncelemesi

Yusuf SAĞIR ^a, Hanife ÇAKAL ^a, Esmâ ELMACI ^a, Bünyamin ÇİÇEK ^{b,*}

^a Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Hitit Üniversitesi, Çorum, TÜRKİYE

^b Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Hitit Üniversitesi, Çorum, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: * bunyamincicek@hitit.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1164231

ÖZ

Bu çalışmada biyo uyumlu Mg metali ile birlikte Al ve Si elementlerini içeren bir alaşım üretilmiştir. Üretim işlemi indüksiyon ocağında ergiterek yapılmıştır. MgAlSi üçlü alaşımı üretim sonrasında 350C/12 saat homojenleştirme ısıl işlemine alınmıştır. Elde edilen numunelere mikro yapı incelemesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Biyo uyumluluk incelemeleri için daldırma korozyon, potansiyodinamik korozyon ve sitotoksosite (MTT) olmak üzere 3 farklı test ile uygulanmıştır. Korozyon testleri Hank's solüsyonu içerisinde gerçekleştirilmiştir. pH dengesi ve % canlılık oranı analizleri ile temel biyoyuyluluk şartlarını taşıdığı sonucuna varılmıştır. Böylece yapının biyo malzeme olarak kullanımı tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mg alaşımı, Biyo uyumluluk, Sitotoksosite, Korozyon

Production of MgAlSi Ternary Alloy and in-vitro bio Compatibility Investigation

ABSTRACT

In this study, an alloy containing Al and Si elements together with biocompatible Mg metal was produced. The production process was made by melting in an induction furnace. MgAlSi ternary alloy was subjected to 350C/12h homogenization heat treatment after production. Scanning electron microscope (SEM) was used to examine the microstructure of the obtained samples. For biocompatibility studies, it was applied with three different tests: immersion corrosion, potentiodynamic corrosion and cytotoxicity (MTT). Corrosion tests were carried out in Hank's solution. It has been concluded that it meets the basic biocompatibility conditions with pH balance and % vitality analysis. Thus, the use of the structure as a biomaterial is discussed.

Keywords: Mg alloy, Biocompatibility, Cytotoxicity, Corrosion

I. GİRİŞ

Magnezyum (Mg) hafifliğin önem arz ettiği çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu yanı sıra diğer elementlerle alaşım yapıldığında Mg mekanik, korozif ve termal deneylerde başarılı sonuçlar vermektedir. Mg ayrıca vücutta ise bir enzim üretimi tetikleyicisi ve kuvvetli bir mineraldir. Bu yüzden son yıllarda biyoçözünebilir biyo-malzeme çalışmalarında çok sık kullanılmaktadır [1]-[4].

Alaşımın belli kurallara göre üretilmekte ve bu aşamada faz denge diyagramları dikkate alınmaktadır. İkili alaşımlar çok yaygın olmasına rağmen üç ve daha fazla bileşenli alaşımlarda literatürde yerini almaktadır. Katı çözümlerde birbiri içerisinde çözünen elementler yeni fazlar ve bileşikler ortaya çıkarmaktadır. Bu yeni fazlar intermetalikler olarak isimlendirilmektedir. İntermetalikler ana elementin birçok özelliğine katkıda bulunmaktadır [5]-[9].

Mg elementi ile faz oluşturduğunda yeni bir bileşik ortaya çıkaran başta Alüminyum (Al) ve diğer elementler önceki özelliklerini kaybetmektedir. Ana element olan Mg etkisiyle Al bulunan bileşikler ve fazlar da toksin etkiye sebep olmamaktadır. Bu yüzden toksin olarak raporlanan Al ve Silisyum (Si) gibi elementler bu aşamalarda kullanılmaktadır. Örneğin Mg-Al arasında oluşan $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ve Mg-Si arasında meydana gelen Mg_2Si partikülü bunlara başlıca örneklerdir. Böylece Mg alaşımlarının kullanım alanları genişlemektedir [9]-[13].

Korozyon deneyleri malzemelerin ömürlerini tayin etmek amacıyla hızlandırılmış süreçlerden oluşmaktadır. Uygulanabilir birçok yöntemi olsa da en çok kullanılanlar arasında daldırma ve elektrokimyasal korozyon yöntemleri bulunmaktadır. Daldırma korozyon testinde belirli bir solüsyon içerisinde bir süre bekletilen numunelerin ağırlık kaybı ve yüzey durumu incelenmektedir. Elektrokimyasal korozyon yöntemlerinde ise üzerinden bir elektrik akımı geçirilen numuneden ayrılan iyonlar bir referans elektrot ile toplanmaktadır. İyon yoğunluğu, akım farkı vb. gibi değerlerin analizi ile korozyon direnci hesaplanabilmektedir [1], [7], [13]-[16].

Bu çalışmada döküm yöntemi ile MgAlSi alaşımı üretilmiştir. Bu çalışmanın amacında standart dışındaki bir Mg alaşımının biyoçözünebilir biyo-malzeme olarak kullanılma düşüncesi vardır. Elde edilen numuneler alaşımın faz dağılımı için temel mikro yapı incelemesine alınmıştır. Çalışmanın amacını barındıran süreçte numuneler biyo-uyumluluk testlerine tabi tutulmuştur. Yapay vücut solüsyonu olan Hank's solüsyonunda 48 saat süren daldırma korozyon yapılmıştır ve ağırlık kaybına bağlı korozyon hızı elde edilmiştir. Aynı solüsyonda elektrokimyasal potansiyodinamik korozyon testi oda sıcaklığında uygulanmıştır. Son olarak numuneye ilgili standartlara uygun olarak akredite laboratuvarında sitotoksitesite testi uygulanmıştır. Sitotoksitesite testi sonucunda elde edilen % canlılık değeri ile in-vitro süreçte malzemenin biyoyuumluluk yorumları yapılmıştır. İncelemeler ve tartışmalar sonrasında MgAlSi alaşımının temel sonuçlarla bir biyo malzeme olarak kullanılabilmesi fikri elde edilmiştir.

II. MALZEME ÜRETİMİ VE DENEY YÖNTEMLERİ

A. MALZEME ÜRETİMİ

MgAlSi alaşımı atmosfer kontrollü bir fırında 750°C sıcaklıkta üretilmiştir. Mg elementi saf külçe olarak kullanılırken Al ve Si elementleri $Al_{12}Si$ ingot alaşımında kullanılmıştır. Alaşıma %90 Mg ve %10 $Al_{12}Si$ ingotu kullanılmıştır. Sıvı metal çelik kalıba dökülmüş ve oda sıcaklığına kadar katılaşması beklenmiştir. Döküm sırasında kalıp ani soğumanın önüne geçebilmek adına 300°C ön ısıya tabi tutulmuştur. Üretim sonrasında alaşım 350°C/12 saat şartlarında homojenleştirme tavlmasına alınmıştır. Sonrasında klasik metalografik hazırlıklar sonrasında numuneler Picral re-aktif ile dağlanmıştır. Mikro yapı incelemesi için Zeiss marka SEM mikroskobu kullanılmıştır. SEM analizinde ayrıca EDX incelemesi de uygulanmıştır. Mikro yapıda bulunan fazların daha anlaşılabilir takibi için

görüntü işleme yapılmış ve Image-J programı kullanılmıştır. Numuneye ayrıca elementel analiz için XRF (Rigaku) analizi uygulanmıştır.

B. BİYO KOROZYON UYGULAMALARI VE SİTOTOKSİSİTE TESTİ

MgAlSi alaşımı numune hazırlama işlemi sonrasında ilk olarak toplamda 48 saat süren bir daldırma korozyon testine alınmıştır. Deney sırasında Tablo 1’de içeriği verilen yapay vücut solüsyonu olan Hank’s sıvısı kullanılmıştır. Deneyde 48 saat içerisinde 5 kez (0-4-12-24-48) ağırlık ölçümü yapılmıştır. Ek olarak pH ölçümü de her aşamada yapılmıştır. Deneyde numuneler 20 mm çapta ve 10 mm kalınlıkta işleme alınmıştır. Solüsyon içerisinde askıda bırakabilmek adına numunelerin ortaları delinmiştir. Deney sonucunda ağırlık kaybına bağlı korozyon hızı rapor edilmiştir. Aynı zamanda deney sonrası numuneler makro fotoğraf çekimi ile incelenmiştir.

Tablo 1. Hank’s solüsyonu bileşenleri.

Hank’s Solüsyonu	gr / L
NaCl	8
KCl	0.4
CaCl ₂	0.14
Na ₂ HPO ₄ -7H ₂ O	0.09
MgSO ₄ -7H ₂ O	0.2
NaHCO ₃	0.35
KH ₂ PO ₄	0.06
C ₆ H ₁₂ O ₆	1
Distile su	Kalan

MgAlSi alaşımı için ikinci aşamada potansiyodinamik korozyon deneyi Hank’s solüsyonu (Tablo 1) içerisinde Gamry marka cihazda uygulanmıştır. Deneyde 1000mV/dakika tarama hızında -1500 mV seviyesine kadar analiz yapılmıştır. Deney sonucunda Tafel eğrisi, I_{CORR} ve E_{CORR} değerleri elde edilmiştir. Literatüre bağlı kalarak elektrokimyasal korozyon oranı hesaplanmıştır [9], [17], [18].

Sitotoksosite testi malzemelerin çözündürülme ve özütleme işlemleri sonucunda % canlılık oranı üzerinden uygulanmaktadır. Böylece % canlılık oranına göre malzemenin biyo uyumluluğu elde edilmektedir. Bu çalışmada sitotoksosite testi için TS EN ISO 10993-12 standardı çerçevesinde [19] akredite deney yapabilen Hitit Üniversitesi HÜBTUAM laboratuvarları kullanılmıştır. Deney sonucunda % canlılık değerleri ve preparat görüntüleri sunulmuştur. Deney detayları aşağıda listelenmiştir [16].

Kullanılan Kimyasallar: L929 fibroblast hücresi kullanılmıştır. Hücrelerin komplet (tam) kültür ortamı olarak %89 DMEM (Biological Industries), %10 Fetal Bovin Serum (FBS; Biological Industries), %1 L-glutamin (Biological Industries), %1 Penisilin/Streptomisin (Capricorn) antibiyotiği kullanılmıştır. Hücrelerin bulunduğu kültür flasklarından uzaklaştırılması için %0,05 Tripsin-EDTA solüsyonu (Tripsin-Etilendiamin tetraasetik asit), yıkama ve temizleme işlemleri için konsantrasyonu 1X olan Kalsiyum/Magnezyum içermeyen fosfat tamponu (PBS) kullanılmıştır. Hücre sayımı için tripan mavisi kullanılmıştır (1/1 oranında). Sitotoksosite testinde tetrazolyum tuzu olan MTT (serva, israel) kimyasalından yararlanılarak hücre canlılığı tespit edilmiştir. Hücre kültür çalışmalarının tamamı; serolojik pipetler, kültür kapları ve çoklu kuyucuklu plakalar (Corning, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hücre Kültürü: Donmuş haldeki hücreler 37°C’de kısa sürede çözüldü. Steril Class II Laminar flow kabin içerisinde çözülen hücreler 15 mL’lik falkon tüpe aktarıldı. Falkon 250 G’de 5 dakika santrifüj işlemi yapıldı. Falkona 3 mL komplet kültür ortamı konuldu ve homojen hale getirildikten sonra 25cm²’lik flaslara ekim yapıldı. Flasklar 37°C’de % 5 CO²’li inkübatörde inkübasyona bırakıldı. Dondurucudan alınan hücrelerin hücre çoğalma döngüsü sabitlenene kadar pasajlandı.

Numunelerin Hazırlanması: Biyomalzeme ve tıbbi cihazların doğrudan uygulanması mümkün olmadığı durumlarda malzeme özütü hazırlamak gerekmektedir. TS EN ISO 10993-12:2021 “Biological evaluation of medical devices-Part 12:Sample preparation and reference materials” de belirtilen şekilde numuneden özütleri hazırlandı. Hazırlanan özütler uygun şekilde steril edildikten sonra uygulama işlemine alındı.

Sitotoksosite Testi (MTT) : Malzemelerin hücre canlılıkları üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu deney yöntemi için tıbbi malzemelere referans olan (EN ISO 10993-5: Biological evaluation of medical devices - Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity) standartta geçen MTT yöntemi standartta belirtilen şekilde uygulandı. Bu test yönteminde 96 kuyucuklu plakalar kullanıldı. Hücre sayımından sonra canlı hücre sayısına göre her kuyucukta 10x10³ hücre olacak şekilde hesaplama yapıldı. Plakada her kuyucuğa 100µl tam besi yeri içerisinde hücre koyuldu ve 24 saat süre ile inkübasyona bırakıldı. 24 saat sonunda hücrelerin plaka yüzeyine tutunup tutunmadığı, morfolojik görüntüleri ve canlılık durumları kontrol edildi. İncelenen kriterlere uygunluk sağladığı tespit edilen kuyucuklardaki medyum boşaltıldı. Hazırlanan numune özütleri tam konsantrasyondan (1/1) başlayarak ve seri dilüsyon yapılarak 5 farklı konsantrasyonda uygulandı (1/1-1/16). Negatif kontrol grubuna sadece kültür ortamı konuldu. Hücreler üzerine uygulaması gerçekleştirilen malzemeler ile 24 saat inkübe edildi. İnkübasyon sonunda plakalardaki medyum ortamdan uzaklaştırıldı ve MTT (1mg/mL) solüsyonu 50 µl olacak şekilde kuyucuklara eklendi. 37°C’de 2-2,5 saat inkübe edilmesini takiben kuyucuklardaki MTT solüsyonu boşaltıldı ve üzerine 100 µl MTT çözücüsü (izopropanol) eklendi. Hücre canlılığının tespiti için 96 kuyucuklu plakanın absorban yoğunluk değerleri multiplaka plate okuyucuda 570 nm’de okundu. Her grubun hücre canlılığı yüzdesi, kontrol hücresi canlılığı %100 kabul edilerek aşağıdaki denkleme göre yapıldı.

Hücre canlılığı % = Optik Yoğunluk, OD570 (numune) / Optik Yoğunluk, OD570 (kontrol) x 100

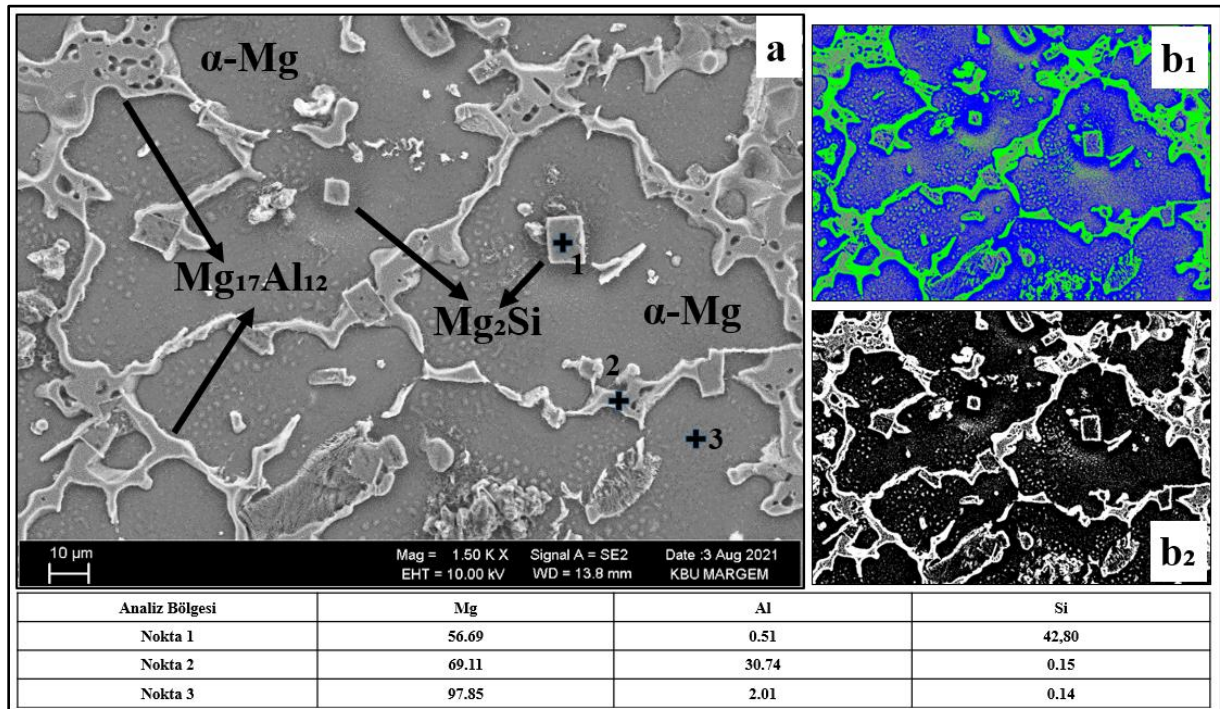
III. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Döküm yöntemiyle üretilen alaşımın elementel analizi için uygulanan XRF sonuçları Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. MgAlSi alaşımı XRF analizi.

Elementler	Ağırlıkça %
Al	9,85
Si	1,21
Pb	0.04
Ag	0.06
Au	0.01
P	0.10
Ca	0.12
Diğer	0,19
Mg	Kalan

Alaşıma uygulanan XRF analizinde planlanan elementel oranlar sağlanmıştır. MgAlSi alaşımı ile oluşturulan numune ilk olarak SEM ortamında incelenmiştir. Numuneden elde edilen SEM görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir. SEM mikro yapısının görüntü işleme analizi sonucunda oluşan veriler resimde belirtilmiştir. Ayrıca farklı yapılardan elde edilen EDX analizleri resimde listelenmiştir.

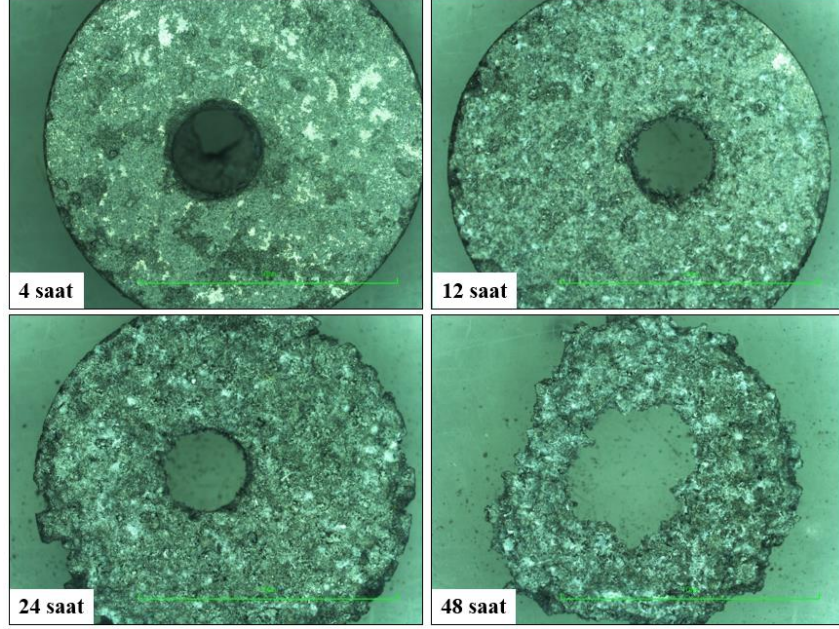


Şekil 1. (a) Temel mikro yapı, (b₁₋₂) Görüntü işleme analizi ve EDX sonuçları.

Temel SEM görüntüsü (a) incelendiğinde 3 temel faz formasyonu izlenmektedir. Bunlar; ana matris yapıyı oluşturan α -Mg, Mg-Si arasında oluşan Mg_2Si seramik partikülü ve bir Mg-Al bileşiği olan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik yapısıdır. Faz yapıları EDX analizleri ile desteklenmiş ve alaşım kimyasal oranları tespit edilmiştir. Mg-Al-Si alaşımında oluşan fazlar literatürle tutarlılık göstermiştir [9], [11], [13], [15].

Mikro yapı ise Image-J görüntü işleme sonuçlarına (10 farklı resim) göre ortalama %30 kadar intermetalik yapı içermektedir.

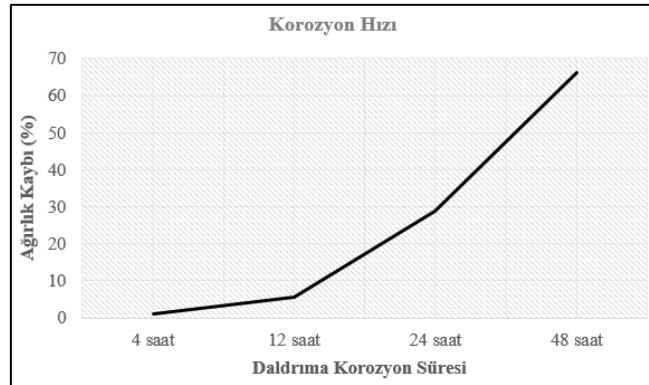
Daldırma korozyon sonucunda elde edilen numunelere ait makro görüntüler Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca deney sırasında ölçülen ağırlık kayıplarına bağlı olarak çizilen korozyon hızı grafiği Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 2. Daldırma korozyon sonrası numunelerin makro resimleri.

Daldırma korozyon sonrası elde edilen numuneler Şekil 2’de izlenmektedir. 4 saat numunesinde yer yer korozif bölgeler oluşsa da geometrik formunu korumuştur. Ancak daldırma süresi arttıkça malzemede korozif bölgeler artarak parça kopmalara uğramıştır. 48 saat ürününde ise numune parçalanarak ilk ağırlığının yaklaşık %67’sini kaybetmiştir. Hank’s solüsyonunda belirlenen daldırma süreleri sonrasında numunelerde korozif deformasyonlar oluşmuştur. Literatürde takip edilen çalışmalara göre MgAlSi alaşımının bu süreci tutarlılık göstermiştir [9], [11], [13]-[15].

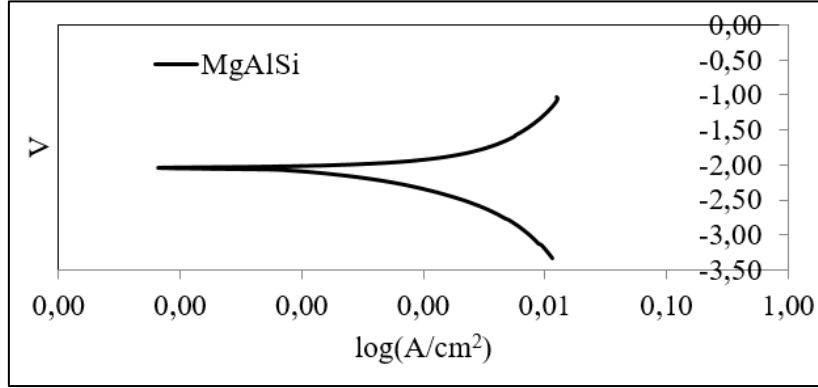
Bu çalışmada pH dengesi Hank’s solüsyonunda deney öncesinde ortalama 7,1-7,8 aralığında ölçülmüştür. Bu seviye ile temiz su veya kan pH denge aralığına yakındır. 4 saat, 12 saat, 24 saat ve 48 saat süre sonucunda pH seviyeleri sırasıyla 10,1-10,2-10,8 ve 11,9 olarak ölçülmüştür. pH ölçüm sonuçlarına göre solüsyon yaklaşık nötr ($H^+=OH^-$) denge aralığından alkali ($H^+<OH^-$) bölgesine geçiş yapmıştır. Alkali bölgede H^+ iyonlarının daha düşük seviyede olması MgAlSi alaşımının Mg-O(H) bileşiğinde çözüldüğünü göstermektedir. Böylelikle Hank’s solüsyonunun bu değişimi biyo uyumlu bir sürecin oluştuğunu gösterebilmektedir [20], [21].



Şekil 3. Ağırlık kaybına bağlı korozyon hızı grafiği.

Ağırlık kaybına bağlı olarak oluşturulan “Korozyon Hızı” grafiğine göre ilk 12 saatte hız düşük izlemiştir. 24 ve 48 saat daldırma sürelerinde kopan parça miktarına göre hız artış göstermiştir. Makro görüntülere (Şekil 2) göre hız-ağırlık kaybı süreci açıklanabilir sonuç vermiştir.

Potansiyodinamik korozyon sonucunda elde edilen Tafel eğrisi Şekil 4’te gösterilmiştir.



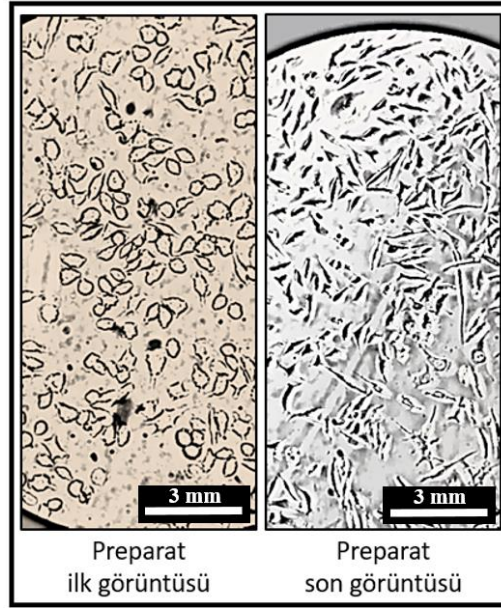
Şekil 4. Tafel eğrisi.

Tafel eğrisi grafiği incelendiğinde ve cihaz verilerine göre E_{corr} değeri -1972 mV olarak rapor edilmiştir. I_{corr} değeri ise 0,148 mA/cm² olarak hesaplanmıştır. Literatüre göre ($22.85 \times I_{corr}$) bu değer üzerinden hesaplanan korozyon hızı ise yaklaşık 3,4 mm/gün olarak elde edilmiştir [15], [17], [18]. Bu sonuçla beraber makro görüntülerdeki parçalanma, pH seviyesinin değişimi, daldırma korozyon hızı ve mm/gün sonuçları tutarlı sonuçlar vermiştir.

Üçlü bir element kombinasyonu ile dökümü yapılan malzeme yapısında Mg-Al-Si üçlü faz diyagramında oluşan bileşiklerin korozyon hızını yavaşlattığını ve hatta durdurduğu bilinen bir sonuçtur [15]. Buradan yola çıkarak elde edilecek alaşımın intermetalik yapı yoğunlukları (%30) korozyon sürecinin nerede yavaşlayacağı ve/veya duracağını göstermektedir. Bu aşamaya kadar beklenen sonuçla çözünen yapının korozyon çözültüsü içerisindeki oranı korozyon hızı hakkında sonuçlar vermiştir. Yapıda kullanılan Mg, Al ve Si elementlerinin biyo-çözünme oranının miktarı ile de biyo-uyumluluk yorumlamaları yapılmıştır. MgAlSi yapısı üzerine yapılan çalışmada görülmektedir ki bu alaşım üçlünün biyo-uyumlu sonuç verebileceği öngörülmüştür.

Tıbbi cihazların biyo uyumluluklarının in-vitro değerlendirilmesinde EN ISO 10993-5 dikkate alınmaktadır. Yapılan çalışmada hücre canlılıkları hiç uygulama yapılmayan grubun absorbans değeri kontrol grubu olarak seçilmesini takiben uygulama yapılan grupların absorbans değerlerinin kontrol grubu ile karşılaştırılmasıyla yorumlanmaktadır. Kontrol grubunda canlılık %100 kabul edilir ve test materyalinin de % canlılığının %70’den yüksek olması in-vitro biyo uyumlu olarak kabul edilir. Absorbans ölçümüyle nicel sonuç verilirken, hücreler mikroskop altında incelenerek nitel olarak da değerlendirilir. İki sonucun bir biri ile uyumlu olması (collaboration) test sonucunun güvenilirliğini arttırmaktadır. Yaptığımız çalışmada Mg alaşımı numune uygulamaları sonrasında 1/1 (malzemenin tam konsantrasyonu) hücre canlılık oranı %144,40±1,05 olarak bulunmuştur. Malzeme konsantrasyonunun %50 azaltılması (1/2 konsantrasyonda uygulanması) ile % canlılık sonuçları %110,10 ± 2,14 olarak belirlenmiştir. Malzemenin tam konsantrasyonu (1/1) canlılık artırıcı etki gösterirken konsantrasyonun azalmasına bağlı olarak canlılığın azaldığı yine de toksin olmadığı gözlemlenmiştir. Uygulanan Mg alaşımı her konsantrasyonunda in-vitro biyo uyumlu olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmadaki MgAlSi alaşımı Mg alaşımlarının % canlılık değerleri ile benzer sonuçlar göstermiştir [9], [16].

Sitotoksosite testi sırasında elde edilen preparat görüntüleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Resimlerde izlendiğine göre hücre koloni sayısı ciddi bir artışa uğramıştır. Özütleme sonucunda oluşan bu % canlılık seviyesi malzemenin biyo uyumlu olduğunun başka bir yorumudur [16].



Şekil 5. Sitotoksosite testi sırasındaki ilk ve son hücre koloni görüntüleri.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada MgAlSi alaşımı üretimi yapılmış ve malzemenin biyo uyumluluk süreci 3 farklı biyo korozyon deneyi incelenmiştir. İn-vitro olarak uygulanan deneyler sonucunda aşağıdaki temel sonuçlar elde edilmiştir.

- MgAlSi alaşımı atmosfer kontrollü olarak metalik bir yapıda üretilmiş ve SEM incelemesi ile uygun mikro yapının oluştuğu izlenmiştir.
- Daldırma korozyon sonucunda pH ve ağırlık kaybı (korozyon hızı) değerleri tutarlı sonuç göstermiştir. Deneyin uygulandığı Hank's solüsyonu deney öncesinde nötr aralıkta iken (7,1-7,8) deney sonrasında alkali bölgeye (~11.0) kadar pH değişikliğine uğramıştır.
- Elektrokimyasal korozyon sürecinde elde edilen mm/gün sonucu daldırma korozyona eş değer sonuçlar vererek yaklaşık 3,4 mm/gün olarak hesaplanmıştır.
- Sitotoksosite deneyi sonuçlarına göre alaşımın özütlenmesi ile elde edilen solüsyon oda sıcaklığında uygun besi yeri şartlarında % 144 kadar (1/1 konsantrasyon) % canlılık oranı göstermiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A projeleri kapsamında 2020-2 döneminde desteklenmiştir. (Proje no: 1919B012003943). Ayrıca çalışma Hitit Üniversitesi 8. Öğrenci Kongresi kapsamında özet bildiri olarak sunulmuştur.

V. KAYNAKLAR

- [1] MÖ, P., "Magnesium Alloying, Some Potentials for Alloy Development," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 42, no. 12, pp. 679-686, 1992.
- [2] Polmear, I., "Recent Developments in Light Alloys," *Materials Transactions*, vol. 37, no. 1, pp. 12-31, 1996.
- [3] Lee, Y., Dahle, A., St John, D., "The Role of Solute in Grain Refinement of Magnesium," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 31A, no. 11, pp. 2895-2906, 2000.
- [4] Levent, E., "Biyobozunur Mg-Ag Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik Ve Korozyon Özelliklerine Zn Ve Nd Elementlerinin Etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 1372-1382, 2022.
- [5] Froes, F., Eliezer, D., Aghion, E., "The Science, Technology, and Applications of Magnesium," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 50, no. 9, pp. 30-34, 1998.
- [6] Furuya, H., Kogiso, N., Matunaga, S., Senda, K., Applications of Magnesium Alloys for Aerospace Structure Systems, Materials Science Forum, Trans Tech Publ, (2000) 341-348.
- [7] Bamberger, M., Dehm, G., "Trends in the Development of New Mg Alloys," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 38, no. pp. 505-533, 2008.
- [8] Witte, F., "The History of Biodegradable Magnesium Implants: A Review," *Acta Biomaterialia*, vol. 6, no. 5, pp. 1680-1692, 2010.
- [9] Kannan, M. B., Koc, E., Unal, M., "Biodegradability of B-Mg17a12 Phase in Simulated Body Fluid," *Materials letters*, vol. 82, no. pp. 54-56, 2012.
- [10] Wang, Q., Davidson, C., "Solidification and Precipitation Behaviour of Al-Si-Mg Casting Alloys," *Journal of materials science*, vol. 36, no. 3, pp. 739-750, 2001.
- [11] Çiçek, B., Ahlatçı, H., Sun, Y., "Wear Behaviours of Pb Added Mg-Al-Si Composites Reinforced with in Situ Mg₂Si Particles," *Materials & Design*, vol. 50, no. pp. 929-935, 2013.
- [12] Korgiopoulos, K., Langelier, B., Pekguleryuz, M., "Mg17a12 Phase Refinement and the Improved Mechanical Performance of Mg-6al Alloy with Trace Erbium Addition," *Materials Science and Engineering: A*, vol. no. pp. 141075, 2021.
- [13] Zhu, L., Qiu, F., Zou, Q., Han, X., Shu, S.-L., Yang, H.-Y., Jiang, Q.-C., "Multiscale Design of A-Al, Eutectic Silicon and Mg₂Si Phases in Al-Si-Mg Alloy Manipulated by in Situ Nanosized Crystals," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 802, no. pp. 140627, 2021.
- [14] Gu, X.-N., Zheng, Y.-F., "A Review on Magnesium Alloys as Biodegradable Materials," *Front. Mater. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 111-115, 2010.
- [15] Çiçek, B., Sun, Y., "A Study on the Mechanical and Corrosion Properties of Lead Added Magnesium Alloys," *Mater Design*, vol. 37, no. pp. 369-372, 2012.
- [16] Comba, A., Cicek, B., Comba, B., Sancak, T., Arslan Akveran, G., Sun, Y., Elen, L., Torkamanian Afshar, M., "Investigation of in-Vitro Biocompatibility and in-Vivo Biodegradability of Am Series Mg Alloys," *Materials Technology*, vol. no. pp. 1-13, 2022.

- [17] Shi, Z., Liu, M., Atrens, A., "Measurement of the Corrosion Rate of Magnesium Alloys Using Tafel Extrapolation," *Corros Sci*, vol. 52, no. 2, pp. 579-588, 2010.
- [18] Atrens, A., Shi, Z., Mehreen, S. U., Johnston, S., Song, G.-L., Chen, X., Pan, F., "Review of Mg Alloy Corrosion Rates," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. no. pp. 2020.
- [19] ISO, *10993-12: 2008–Biological Evaluation of Medical Devices–Part 12: Sample Preparation and Reference Materials*, in *International Organization for Standardization, Geneva*. 2008.
- [20] Alodan, M. A., "Modeling of Ph Distribution over Corrosion Sites," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 2003.
- [21] Lu, P., Cao, L., Liu, Y., Xu, X., Wu, X., "Evaluation of Magnesium Ions Release, Biocorrosion, and Hemocompatibility of Mao/Plla-Modified Magnesium Alloy We42," *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 96, no. 1, pp. 101-109, 2011.