



**ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME
ÖNCESİ VE SONRASI AŞINMA VE KOROZYON
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Sakine OBUZ

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç.Dr. Erkan KOÇ**

**ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCESİ VE SONRASI
AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Sakine OBUZ

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç.Dr. Erkan KOÇ**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Sakine OBUZ tarafından hazırlanan “ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCESİ VE SONRASI AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Erkan KOÇ

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet AKKAŞ (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Erkan KOÇ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Sakine OBUZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCESİ VE SONRASI AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sakine OBUZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Erkan KOÇ

Ocak 2022, 75 sayfa

Bu çalışmada; döküm yöntemiyle üretilen ZM21 magnezyum alaşımına 400⁰C'de 16 saat homojenizasyon ısı işleminden sonra 275⁰C, 325⁰C ve 375⁰C sıcaklıklarda %40 ve %80 oranlarında haddeleme işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra numunelerin haddeleme öncesi (döküm ve homojenleştirilmiş hali) ile haddeleme sonrası mikroyapı özellikleri ve yapay vücut sıvısı ortamında potansiyodinamik: korozyon testine tabi tutulmuştur. Ayrıca tüm numunelere iki farklı yük altında hem kuru ortamda hem de korozif ortamda (yapay vücut sıvısı içerisinde, kontrollü olarak) aşınma testleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; kuru ortamda en düşük ve en yüksek aşınma hızları sırasıyla 375⁰C % 80 hadde ve 375⁰C % 40 hadde oranlarında gözlenmiştir. Korozif ortamda ise en düşük aşınma hızı 275⁰C %40 hadde, en yüksek aşınma hızı 325⁰C %80 hadde oranlarında gözlenmiştir. Homojenizasyon sonrası korozyon hızlarında azalma belirlenmiş ve en düşük korozyon hızı 375⁰C sıcaklık. %40 oranında haddelenmiş numunelerde gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: ZM21 magnezyum alaşımı, haddeleme, korozyon, aşınma,
yapay vücut sıvısı.

Bilim Kodu : 91514

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AN INVESTIGATION ON WEAR AND COROSION BEHAVIOR OF AS-CAST AND HOT ROLLED ZM21 MAGNESIUM ALLOY

Sakine OBUZ

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical & Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Erkan KOÇ

January 2022, 75 pages

In this study; After homogenization heat treatment at 400⁰C for 16 hours, rolling processes of 40% and 80% were applied to the ZM21 magnesium alloy produced by casting method at temperatures of 275⁰C, 325⁰C and 375⁰C. Then, the microstructure properties of the samples before rolling (casting and homogenized form) and after rolling were subjected to potentiodynamic: corrosion test in artificial body fluid environment. In addition, wear tests were performed on all samples under two different loads, both in a dry environment and in a corrosive environment (in artificial body fluid, in a controlled manner). When the results are examined; The lowest and highest wear rates in dry conditions were observed at 375⁰C and 80% rolling and 375⁰C and 40% rolling rates, respectively. In the corrosive environment, the lowest wear rate was observed at 275⁰C and 40% rolling, and the highest at 325⁰C, 80% rolling rate. After homogenization, a decrease in corrosion rates was determined and the lowest corrosion rate was at 375⁰C and at a rate of 40% rolling.

Key Word : ZM21 magnesium alloy, rolling, corrosion, wear, artificial body fluid.

Science Code : 91514

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Erkan KOÇ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez alıőması, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL- 2020-2250 kodlu tez projesi kapsamında desteklenmiőtir. Bundan dolayı Karabük Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne ve Karabük Üniversitesine teşekkür ederim.

Çalıőmamızın her aőamasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen tüm bölüm hocalarıma ve üretimler ve haddeleme sırasında yardımlarından dolayı Ümit Özdemir'e sonsuz teşekkür ederim.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.2. MAGNEZYUM KULLANIM ALANLARI.....	5
2.2.1. Otomotiv Endüstrisi.....	5
2.2.2. Havacılık ve Savunma Sanayi	7
2.2.3. Biyomalzeme Sektörü.....	9
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIM STANDARDI	11
2.4. MAGNEZYUMA ALAŞIM ELEMENTLERİN ETKİSİ	13
2.4.1. Alüminyum.....	14
2.4.2. Çinko	14
2.4.3. Mangan	15
2.4.4. Demir	16
2.4.5. Bakır	17
2.4.6. Silisyum	18
2.4.7. Nikel	18

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	19
MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA VE KOROZYON	19
3.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KOROZYON	19
3.1.1. Korozyon	19
3.1.2. Kimyasal Korozyon	20
3.1.3. Korozyon Hızı Belirleme.....	22
3.1.3.1. Sabit Potansiyel Yöntemi.....	23
3.1.3.2. Sabit Akım Yöntemi	23
3.1.3.3. Kimyasal Yöntemler	24
3.1.3.4. Elektrokimyasal Yöntemler	24
3.1.4. Negatif Fark Etkisi (Negative Difference Effect- NDE)	26
3.1.5. Magnezyumda Meydana Gelen Korozyon Türleri.....	30
3.1.5.1. Galvanik Korozyon.....	30
3.1.5.2. Oyuklanma Korozyonu	31
3.1.5.3. Aralık ve Kurtçuk Korozyonu	32
3.1.5.4. Gerilmeli Korozyon Çatlaması	32
3.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA	33
3.2.1. Aşınma.....	33
3.2.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler.....	33
3.2.3. Aşınma Türleri.....	34
3.2.3.1. Adhesiv Aşınma.....	34
3.2.3.2. Abrasiv Aşınma	35
3.2.3.3. Yorulma Aşınması	35
3.2.3.4. Korozyon Aşınması	36
3.2.3.5. Erozyon Aşınması.....	36
3.2.4. Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri.....	37
3.2.4.1. Ağırlık Farkı Metodu	37
3.2.4.2. Kalınlık Farkı Metodu.....	38
3.2.4.3. İz Değişim Metodu	38
BÖLÜM 4	39
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
4.1. ZM21 ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ VE HADDELENMESİ.....	39

	<u>Sayfa</u>
4.1.1. ZM21 Magnezyum Alaşımı Dökümü.....	39
4.1.2. ZM21 Magnezyum Alaşımının Homojenizasyonu ve Haddelenmesi....	40
4.2. HADDELEME SONRASI NUMUNE HAZIRLAMA	44
4.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ.....	45
4.4. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DENEYLERİ.....	46
4.5. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ.....	48
BÖLÜM 5	49
DENEYSEL SONUÇLAR	49
5.1. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCESİ VE SONRASI OPTİK MİKROSKOP MİKROYAPI GÖRÜNTÜ SONUÇLARI.....	49
5.2. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCE VE SONRASI SEM ANALİZ SONUÇLARI.....	51
5.3. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ SONRASI GRAFİK SONUÇLARI	54
5.4. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ SONRASI SEM GÖRÜNTÜ SONUÇLARI	55
5.5. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON TESTİ GRAFİK ANALİZ SONUÇLARI	61
BÖLÜM 6	66
GENEL SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Magnezyumun yoğunluk olarak bazı metallerle kıyaslanması	3
Şekil 2.2. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum parçaları (Külekçi, M. K. (2008), Kainer, K. U. and Buch, F. V.	6
Şekil 2.3. Silah gövdesi.	8
Şekil 2.4. Northrop XP-56.....	9
Şekil 2.5. İnsan sol ve sağ ayak baş parmağında kullanılan Ti ve Mg civatalar.	10
Şekil 2.6. Mg-Al faz diyagramı.....	14
Şekil 2.7. Mg-Zn faz diyagramı	15
Şekil 2.8. Mg-Mn faz diyagramı.	16
Şekil 2.9. Mg-Fe faz diyagramı.....	17
Şekil 2.10. Mg-Cu faz diyagram.	17
Şekil 2.11. Silisyum-Magnezyum faz diyagramı	18
Şekil 3.1. Sulu ortamda magnezyum çözünmesi.....	21
Şekil 3.2. Mg(OH) ₂ potansiyel pH diyagramı	22
Şekil 3.3. Korozyon akım yoğunluğu ve potansiyeli	25
Şekil 3.4. Polarizasyon direncini bulmak için doğrusal polarizasyon yöntemi kullanımı.....	26
Şekil 3.5. NDE'nin polarizasyon eğrisi ile şematik olarak gösterilmesidir.	27
Şekil 3.6. Kısmi koruyucu yüzey film modeli.....	28
Şekil 3.7. Tek değerlikli magnezyum iyon modeli.....	28
Şekil 3.8. Düşen parçacık modeli.	29
Şekil 3.9. MgH ₂ modeli.	29
Şekil 3.10. Elektrokimyasal korozyon ve magnezyumun yüzeyinde gerçekleşen NDE.....	30
Şekil 3.11. a) Yüksek akım korozyonu, b) Alçak akım korozyonu.	31
Şekil 3.12. Adhesiv aşınma.....	34
Şekil 3.13. Abrasiv aşınma.....	35
Şekil 3.14. Yorulma aşınması.	36
Şekil 3.15. Korozyon aşınması.	36
Şekil 3.16. Erozyon aşınması türleri.	37

Şekil 4.1. İndüksiyon ocağı şeması.	39
Şekil 4.2. (a) Dökümlerin yapıldığı indüksiyon ocağı, (b) Y şeklinde kalıba dökülmüş ZM21 magnezyum alaşımı.	40
Şekil 4.3. Y bloktan parça çıkarım şeması.	41
Şekil 4.4. Frezeleme işlemine ait görüntü.	42
Şekil 4.5. Hadde öncesi yüzey işlemesi tamamlanmış plakalar.	42
Şekil 4.6. Laboratuvar tipi hadde makinesi.	43
Şekil 4.7. (a) Numune kesme cihazı ve (b) Zımpara ve parlatma cihazı.	44
Şekil 4.8. Dağlama işlemine tabi tutulan numuneler.	45
Şekil 4.9. (a) Optik ışık mikroskobu, (b) Taramalı elektron mikroskobu (SEM). ...	45
Şekil 4.10. Elektrokimyasal deneylerde kullanılan numuneler.	46
Şekil 4.11. Elektrokimyasal korozyon test cihazı.	47
Şekil 4.12. Korozyon deneyi sonrası test numuneleri.	47
Şekil 4.13. Aşınma test cihazı.	48
Şekil 5.1. ZM21 alaşımının döküm hali ve homojenizasyon sonrası mikroyapı görüntüleri.	49
Şekil 5.2. Farklı sıcaklık ve farklı hadde oranlarında numunelerin mikroyapı görüntüleri.	50
Şekil 5.3. Döküm hali ve homojenizasyon numunelerinin SEM analiz sonuçları. ...	52
Şekil 5.4. Sıcaklık ve Hadde değerleri verilen numunelerin SEM grafik analiz sonuçları.	54
Şekil 5.5. Kuru ve korozif ortamda 8N yük altında elde edilen aşınma hız grafikleri.	54
Şekil 5.6. Kuru ve korozif ortamda 16N yük altında elde edilen aşınma hız grafikleri.	55
Şekil 5.7. Kuru ortamda döküm ve homojenizasyon numunelerinin SEM görüntü analizleri.	56
Şekil 5.8. Kuru ortamda; sıcaklık ve hadde değerleri verilen numunelerin SEM görüntü analizleri.	58
Şekil 5.9. Korozif ortamda döküm ve homojenizasyon numunelerinin SEM görüntü analizleri.	59
Şekil 5.10. Korozif ortamda; sıcaklık ve hadde değerleri verilen numunelerin SEM görüntü analizleri.	61
Şekil 5.11. ZM21 alaşımının döküm ve homojenizasyon işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.	62

Sayfa

Şekil 5.12. ZM21 alaşımına farklı sıcaklıklarda ve %40 oranlarında uygulanan haddeleme işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.	63
Şekil 5.13. ZM21 alaşımına farklı sıcaklıklarda ve %80 oranlarında uygulanan haddeleme işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Magnezyumun sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar	4
Çizelge 2.2. Parça ağırlık değişiklerinin karşılaştırılması.....	7
Çizelge 2.3. Havacılık sektöründe Mg'nin diğer malzemelerle kıyaslanması.....	9
Çizelge 2.4. Çeşitli implant malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal kemikle karşılaştırması.	11
Çizelge 2.5. Mg alaşımındaki elementleri gösteren kod harfler.	12
Çizelge 2.6. Magnezyum alaşımlarının etkileri.	13
Çizelge 3.1. Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler.....	23
Çizelge 4.1. Y bloktan parça hazırlanma çizelgesi.	41
Çizelge 4.2. Hadde açıklıkları çizelgesi.	43
Çizelge 4.3. Yapay vücut sıvısı bileşenleri.	46
Çizelge 5.1. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen E_{CORR} , I_{CORR} ve CR değerleri.	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ag	: gümüş
Al	: alüminyum
Ar	: argon
Au	: altın
Ca	: kalsiyum
Cu	: bakır
Cl	: klor
H ₂	: hidrojen
He	: helium
K	: potasyum
Mo	: molibden
Mn	: mangan
Mg	: magnezyum
Na	: sodyum
Ni	: nikel
O	: oksijen
Sn	: kalay
Zn	: çinko

KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- TS : Türk Standardı
- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- EDS : Energy Dispersive Spectrometer (Enerji Dağılımlı Spektrometresi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insan ihtiyaçları artmış ve bu ihtiyaçların karşılanması giderek zorlaşmıştır. Bu sebeple bilim insanları ve araştırmacılar, havacılık endüstrisinden otomotiv endüstrisine, savunma endüstrisinden elektronik ve iletişime, yapısal malzeme teknolojilerinden nano malzemelere, tıbbi malzemelerden biyolojik malzemelere kadar geniş bir ürün yelpazesi üretmek ve geliştirmek için çok detaylı araştırmalar yapmışlardır. Tüm bu çalışmalar malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, mikroyapısının kullanım alanı ve amacına göre düzeltilmesine dayanmaktadır. Bu durumda malzemeye yeni alaşım elementleri ekleme ve yeni alaşımlar, kompozit malzemeler, yüzey özelliklerini iyileştiren kaplamalar üretme yöntemi olarak üretimin kolay ve yaygın olduğu ısıl işlem ve plastik şekil değiştirme yöntemiyle mikroyapı düzenleme işlemi kullanılmaktadır.

Ortam ve kullanım koşullarına bağlı olarak çeşitli uygulamalarda magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra korozyon direncinin iyileştirilmesi de önemlidir. Elektrokimyasal olarak aktif bir metal olan Mg, düşük korozyon direnci nedeniyle herhangi bir koruma olmaksızın Mg ve alaşımlarının kullanımını sınırlar (Gray and Luan, 2002; Hornberger, et al., 2012).

Mukavemet performansını artırmak için magnezyuma çeşitli ilaveler yapılabilmektedir. Magnezyum, altıgen ve kompakt bir ambalaj yapısına sahiptir ve düşük partikül boyutundan dolayı birçok elementi katı halde çözebilir. Yapısal malzeme olarak kullanıldığında, Al, Ca, Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn, Zr, ve Zn'den bir veya daha fazla elementin katılmasıyla yüksek bir mukavemet / ağırlık oranı elde edilebilir (Ünal, vd, 2009, Erçayhan, vd, 2011).

Alaşımlama ve yzzey işleme, Magnezyumun vucut sıvısında korozyon direncini artırmak için uygun seçeneklerdir. Birçok araştırmacı, alaşımlama yoluyla Mg'nin korozyon direncini iyileştirmenin yollarını araştırmıştır. Çinko, insan vucudunun vazgeçilmez bir unsuru olan bu alaşım elementlerinden biridir ve katı ozelti kuvvetlendirmesi sayesinde magnezyum alaşımlarına guc sağlar (C. Blawert, et al., (2010), Lisitsyn, et al., (2010) N.T. Kirkland, et al., (2010), Wei Zhou, et al., (2010), Wenjuan Liu, et al., (2010), Anna Chen, et al., (2010), Martin Jonsson, et al., (2010), C.J. Boehlert, et al., (2006)).

İnsan vucudu için oneme sahip olan bir diğer element ise Zn'ye benzer oranda manganezdır. Mn, magnezyum alaşımının tane boyutunu iyileştirmeye, suneqliği artırmaya ve çekme mukavemetini artırmaya yardımcı olur (S.A. Khan, et al.,2006). Metalik safsızlıkların etkilerinin azaltma ve magnezyumun korozyon direncini artırma konusunda kucuk mangan ilavelerinin etkili olduğu belirtilmiştir (Carlson, J.W. Jones (1993), I.J. Polmer (1992)). Sonuç olarak, alaşım elementleri olarak Mn ve Zn'ye sahip Mg alaşımları uzerinde yapılan araştırmalar onem kazanmaya devam etmektedir.

BÖLÜM 2

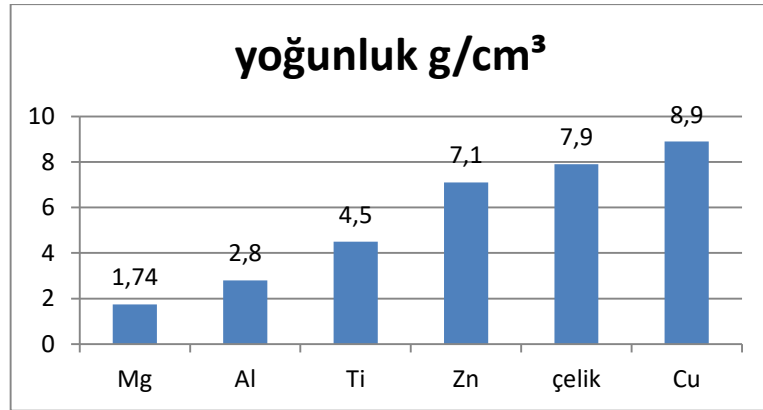
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Element olarak ilk kez 1755 yılında İskoç kimyager Joseph Black tarafından bulunan magnezyum, 1792’de Anton Rupprecht’in kömürle ısıtılması sonucuyla saf olmayan metal magnezyum elde edilmiştir. Magnezyum ticari olarak ilk kez 1852 yılında Almanya Hemelingen’deki bir alüminyum fabrikasında kullanılmıştır.

Magnezyum (Mg), periyodik sistemde IIA kategorisinde yer alan toprak alkali elementlerden biridir. Magnezyum, çağımızın en popüler metal malzemelerinden biri olan gümüş beyazlığında bir metaldir. Yer kabuğunun %2,7’sinde ve okyanusun %0,13’ünde bulunur.

Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi 1.74 cm³’lük yoğunluğu ile alüminyumdan %36 ve çelikten %78 daha hafif bir metal olduğu görülmektedir (Avedesian, et al., (1999), Emley, E. F. (1966), Beck, E. (1943), Kainer, K. U. and Buch, F. V. (2003), Polmear, I. J. (2006)).



Şekil 2.1. Magnezyumun yoğunluk olarak bazı metallerle kıyaslanması (Polmear, I. J. 2006).

Alüminyum ve demirden sonar doğadan en fazla bulunan element Magnezyumdur. Magnezyum sırasıyla MgCO formunda dolomit ve magnezit formunda, ancak deniz suyu, yeraltı suyu ve yer üstü tuz birikintilerinde klorür formunda bulunur. Şu anki kullanımına göre İsrail'deki Çlü Deniz'de yaklaşık 20.000 yıl yetecek kadar magnezyum bulunmaktadır (Gaines, et al., 1996). Çizelge 1.1'de magnezyum'un genel özellikleri verilmiştir (Avedesian and Baker, 1999; Smith, 2001; Kainer, 2003; Friedrich and Mordike, 2006).

Çizelge 2.1. Magnezyumun sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar (Ünal, M, vd, 2009).

Simgesi	Mg
Yoğunluğu	1.74 g/cm ³
700°C'ta özgül ağırlığı	1.5 kg/dm ³
Atom Çapı	3.20 Å°
Atom Ağırlığı	24.21
Kristal Şekli	Heksagonal sıkı paket
Ergime Noktası	650 °C
Kaynama Noktası	1107 °C
200°C'ta Isıl İletkenliği	140 kcal/m.sa. °C
Ergime Isısı	56 kcal/kg
Buharlaştırma Isısı	1400 kcal/kg
Uzama Katsayısı	2.73.10 ⁻⁵ mm/mm°C
Elektrik İletkenliği	22.2 m/ohm.K
Valans Durumu	Mg ⁺²
Viskozite	1.25 cp 650 °C'de
Sertlik	30-47 HB
Elastisite Modülü	44.5.10 ³ N/mm.mm
Akma Dayanımı	69-262 MPa
Çekme Dayanımı	175-318 MPa
Uzama (%)	2-20

Avantajları;

- Magnezyum tüm inşaat malzemeleri arasında yoğunluğu en düşük olandır
- Yüksek özgül dirence sahiptir
- İyi dökülebilirlik ve basınçlı döküm uygulanabilirliği
- Yüksek kesme hızında işlenmesinin kolay olması

- Doğada fazlaca bulunabilmesi
- Nadir gazlar altında iyi kaynak yapılabilirlik
- Büyük ölçüde geliştirilmiş korozyon direnci
- Plastiklere nazaran; daha iyi mekanik özellik, iyi yaşlanma direnci ve geri dönüştürülebilirlik

Dezavantajları;

- Yetersiz alaşımlama
- Oda sıcaklığında süneklik ve tokluğun düşük olması
- Isıl direnç ve sürünme direncinin sınırlı olması
- Yüksek kimyasal reaksiyon eğilimi
- Esneme oranının yüksekliği
- Geri dönüşüm konseptlerinin eksikliği
- Tutuşma ve korozyon davranışının anlaşılması
- Sınırlı sayıda üretici ve istikrarsız fiyat

2.2. MAGNEZYUM KULLANIM ALANLARI

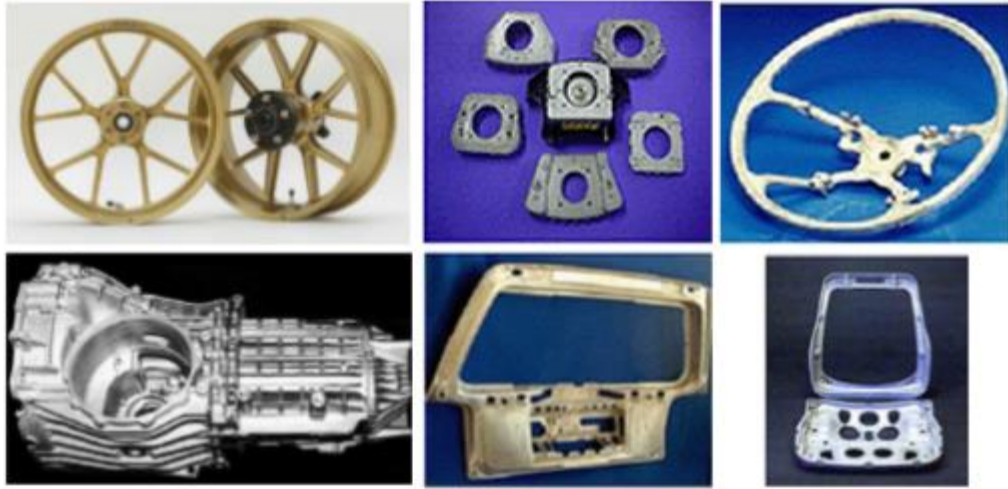
Teknolojinin gelişimi ile birlikte günümüzde artık, daha ekonomik ve insan sağlığına ve çevreye daha az zararlı, makineler ve aletler insanlar tarafından tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tür ekipmanların üretiminde ihtiyacı karşılayan malzemeler aranmaktadır. Magnezyum, avantajları ile dünyada bu tür işlemlerde kullanılabilen malzemelerden biridir. Sahip olduğu en önemli özelliği olan hafiflik sayesinde otomotiv, havacılık, uzay ve biyomedikal alanlarında oldukça tercih edilmekte ve sürekli geliştirilmektedir (Mordike, B.L., Ebert, T.2001).

2.2.1. Otomotiv Endüstrisi

Günümüzde magnezyum alaşımlarına en büyük ilgi otomotiv endüstrisinden geliyor. Bu ilgiye cevaben magnezyum alaşımlı otomobil parçalarının artmasının temel nedeni, hafif magnezyum alaşımları kullanılarak araçların ağırlığının azaltılmasının yakıt

ekonomisine katkı sağlaması ve bunun sonucunda araçlarda gaz emisyonlarını azaltabilmesidir (TMMOB, Otomotiv Sempozyumu, (2009). Otomotiv endüstrisinde magnezyumun ilk kullanımı 1920'li yıllara dayanmaktadır. Otomotiv tarihindeki en önemli magnezyum örneği, Volkswagen'in Beetle modelinde (hava soğutmalı motor, dişli kutusu, motor karteri) 17 kg magnezyum alaşımının kullanılmasıdır. Bugün pek çok Volkswagen aracı magnezyum parçalarla donatılmıştır (Czerwinski, F. (2008), Friedrich, et al., (2006)).

Yaygın olarak magnezyum alaşımlarını kullanan otomobil parçalarının örnekleri arasında koltuk çerçeveleri, tekerlekler, gösterge panelleri, direksiyonlar, motor valf kapakları, emme manifoldları, dişli kutuları, kapı kolları pedallar ve yağ tavaları bulunur (Şekil 2.2). Mangan içerikli AM serisi alaşımlar, yüksek tokluk ve enerji soğurma özelliklerinden dolayı koltuk çerçevesi, tekerlek ve direksiyon üretiminde kullanılmaktadır ((Külekçi, M. K. (2008), Czerwinski, F. (2008), Ghali, E. (2010), Friedrich, H. E. and Mordike, B. L. (2006)).



Şekil 2.2. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum parçaları (Külekçi, M. K. (2008), Kainer, K. U. and Buch, F. V. (2003), Url-1).

Bir otomobildeki yakıt tüketiminin %60'ı otomobilin ağırlığından geldiğinden, ağırlık azaltımı doğrudan yakıt tüketimini azaltarak CO2 emisyonlarını azaltır. Magnezyum alaşımlı ürünlerin önemi, araçtaki diğer unsurların (ışık, ses, güvenlik, konfor, eğlence donanımı gibi) neden olduğu ağırlık artışını ortadan kaldırmak ve büyük ölçüde gaz emisyonlarını azaltmak ve sınırlı yakıtı korumaktır. Bu durumda rezervleri gittikçe

daha önemli hale getirir (Mert, F., et al., 2010). Magnezyum ve alaşımları yüksek özgül mukavemeti sayesinde, otomotiv endüstrisindeki geleneksel uygulamalara kıyasla ağırlığı yaklaşık %30 azaltabilir. Geri dönüştürülebilirlik, yüksek şekillendirilebilirlik, iyi absorpsiyon ve iyi ısı dağılımı nedeniyle magnezyumun otomotiv endüstrisindeki çekiciliği artış göstermiştir. (TMMOB Makine Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu, 2009).

Otomobillerde magnezyum alaşımlarının gelecekteki kullanımı sürekli olarak incelenmektedir. Çizelge 1.2’de, Mg alaşımlarının otomobillerin farklı bölümlerinde kullanılmasının neden olduğu parça ağırlık değişiklikleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.2de gösterildiği gibi ağırlık, Mg alaşımı kullanılarak her birimde düşürülür. Bu kayıplar nedeniyle araç hareketi için gerekli itme kuvvetinin harcadığı enerji dolaylı olarak azaltılır (Aghion, et al., 2001; Kandemir ve Can, 2003).

Çizelge 2.2. Parça ağırlık değişikliklerinin karşılaştırılması

	Motor Bloğu		Dişli Kutusu + Debriyaj	Karter	Dört Tekerlek (jant)		Motor Kızağı	
	Dökme Demir	Al Alaşımı			Çelik	Al Alaşımı	Çelik	Al Alaşımı
Geleneksel çözüm (kg)	32	23.5	21.5 + 5	3	36	23	25	17.5
Magnezyum alaşımı (kg)	19	19	15 + 3	2	18	18	15	15
Azalan ağırlık (kg)	13	4.5	6.5	1	18	5	10	2.5
Azalma (%)	40	19	30	33	50	22.5	40	30

2.2.2. Havacılık ve Savunma Sanayi

1930’lu yıllardan itibaren uçak yapımında kullanılan magnezyum, 1950’li yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda magnezyumun askeri uçak ve hava taşıtlarında kullanımı oldukça önem göstermiştir. 1990’lı yıllardan itibaren uçak endüstrisinde magnezyum kullanım oranı düşmektedir. Magnezyum, helikopter endüstrisinde dişli kutusu ve şanzıman gibi parçalarda kullanılmaktadır (Yavuz, H.G., 2011).

Uçak yapı parçalarının üretiminde kullanılan metalin en temel özellikleri; hafiflik, dayanıklılık ve korozyon direnci özelliklerine sahip olmasıdır. Günümüz araştırma ve geliştirmesinin temeli; daha kullanışlı malzemeler elde etmek için yeni ve denenmemiş alaşımların geliştirilmesidir. Havacılık sektöründeki magnezyum alaşımlarının durumu aşağıdaki gibidir;

- Mukavemet ve hafiflik
- Şok ve titreşim dirençleri
- Aynı hacimdeki alüminyum ve demire karşı tercih edilme sebebi ise alüminyumun üçte ikisi, demirin beşte biri kadar ağırlığa sahip olmasıdır.

Sektörün, iyileştirme çalışmaları olarak yoğun şekilde üzerinde durduğu konular ise;

- Yanıcı olmaları
- Yüzeyine koruyucu kaplama uygulanmazsa, aşındırıcı bir ortamda beyaz topraklar veya noktalar halinde paslanması
- Korozif olmayan ortamlarda bile alaşım yüzeyinde oluşan karbonat oksit filmi yeterli korozyon koruması sağlayamaz. Uygun bir koruyucu kaplama kullanmak korozyonu önemli ölçüde azaltabilir.

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve dayanımları sayesinde savunma sanayi olarak silah gövdelerinde ve uzun mesafeli balistik füzelerde çokça kullanılmaktadır. Genellikle Mg alaşımı kullanılarak gövdenin ağırlığı azaltılıp kullanım kolaylığı sağlanmak istenmiştir. Şekil 1.3 – 1.4’de Mg alaşımından imal edilen silah ve uçak gövdesi bulunmaktadır.



Şekil 2.3. Silah gövdesi.



Şekil 2.4. Northrop XP-56.

Çizelge 2.3. Havacılık sektöründe Mg'nin diğer malzemelerle kıyaslanması.

Malzeme	ρ [kg/m ³]	σ^{**} [MPa]	Mukavemet Yogunluk [Pa/kg/m ³]	E [GPa]	R [GPa]	Term. Gen.Kat [10 ³ °C]	50 mm δ_s %	Sertlik	Standart Elektrot Pot.		Fiyat*	
									Reaksiyon	[V]		
MAGNEZYUM	AZ80	1800	345	191666,7	45	16	25,2	6	BS : 70	Mg ²⁺ +2e ⁻ →Mg	-2,37	1200
	AZ31	1770	255	144067,8	45	16	25,2	12	BS : 55			
	AZ91D	1810	240	132596,7	45	16	26	5	BS : 70			
	AM50A	1770	230	129943,5	45	16	26	10	BS : 60			
	AM60B	1780	235	132022,5	45	16	25,6	8	BS : 65			
	WE54	1850	320	172973,0	45	16	24,6	8	BS : 85			
	ZK60A	1830	310	169398,9	45	16	27,1	13	Re : 85			
ALÜMİNYUM	100-1114	2710	110	40590,4	70	26	23,6	9		Al ³⁺ +3e ⁻ →Al	-1,71	1486
	2014-T6	2800	455	162500,0	75	27	23,0	13	BS : 135			
	2024-T4	2800	470	167857,1	73	30	23,2	19	BS : 120			
	5456-H116	2630	320	121673,0	72	30	23,9	16	BS : 90			
	6061-T6	2710	260	95941,0	70	26	23,6	17	BS : 95			
	7075-T6	2800	570	203571,4	72	28	23,6	11	BS : 150			
Ti-6Al-4V İslah edilmiş	4730	900	190274,8	120	235	9,5	10	BS : 334	Ti ²⁺ +2e ⁻ →Ti	-1,63	5845	
Cu Tavlınmış	8910	220	24691,4	120	44	16,9	45	BS : 50	Cu ²⁺ +2e ⁻ →Cu	0,334	2323	
Cu Sert çekilmiş	8910	390	43771,1	120	44	16,9	4	BS : 90				
Fe	7860	400	50890,6	208	77	11,7	23	BS : 146	Fe ²⁺ +2e ⁻ →Fe	0,771	900	
PLASTİKLER	Naylon 6/6	1140	75	65789,5	2,8	-	144	50	BS : 95			320
	Polikarbonat	1200	65	54166,7	2,4	-	122	110	BS : 115			400
	Polyester, PBT	1340	55	41044,8	2,4	-	135	150	Shore D : 65	Korozyona en az dır.		380
	Polyester elastomer	1200	45	37500,0	0,2	-	130	500	Shore D : 30-82	Magnezyum		520
	Yapıştırıcı	1030	55	53398,1	3,1	-	125	2	--	Çinko		250
	Lastik, sert PVC	1440	40	27777,8	3,1	-	135	40	Shore D : 74-88	Galvanize		120
	Lastik	910	15	16483,6	0,5	-	162	600	Shore A : 30-90	Çelik		130
	Epoxy/Glass SMC	1600	260	162500,0	--	--	3,65	--	--	Çelik		--
	H254 Polyester Laminate	1600	41	25625,0	--	--	0,29	--	Barcol:30	Dökme demir		--
	Thermoset Polyester	1820	55	30219,8	--	--	1,2	--	Barcol:32	P.Çelik-Aktif		--

2.2.3. Biyomalzeme Sektörü

Magnezyum alaşımlarının tercih edilmesinin sebeplerinden biri de biyolojik malzeme olarak dokularla uyumlu olmasıdır. Tıbbi cihazlarda, implant uygulamalarında pim ve vida olarak kullanılabilen bazı kullanım örnekleri bulunmaktadır. (Mochizuki and Kaneda, 2015; Agarwal, et al., 2016). Bu tür uygulamalar için Mg, paslanmaz çelik, Ti ve Ti alaşımlarının yanı sıra CoCr alaşımları da kullanılmaktadır. Daha da önemlisi bu maddeler vücutta çözünmeyeceğinden cerrahi işlemle alınması gerekir. (Li, et al., 2016). Ancak bu uygulamada magnezyum alaşımları vücut sıvılarında Mg²⁺ iyonları

şeklinde çözülebilir ve zamanla yok olabilir. Ayrıca Mg^{2+} iyonları da insan vücudu için gerekli minerallerdir. Başka bir deyişle, Mg metalinin çözünmesi insan vücudu için toksik değildir. (Herring, 32 et al., 1960; Wolf and Cittadini, 2003). Bununla birlikte günde 300-400 mg Mg^{24} alınması yetişkinler için uygun olduğu ve fazlasının idrar yoluyla vücuttan atıldığı bilinmektedir (Saris, et al., 2000). Şekil 1.5’de bir insanın ayak baş parmağında oluşan hasar sonunda, titanyum ve magnezyum vidaların uygulandığı örnek gösterilmektedir. Altı aylık döngünün sonunda her iki malzemenin de etkili sonuçlar verebildiği ancak Mg civatasının vücutta çözülebildiği görülebilmektedir (Windhagen, et al., 2013).



Şekil 2.5. İnsan sol ve sağ ayak baş parmağında kullanılan Ti ve Mg civatalar (Windhagen, et al., 2013).

Çizelge 2.4, çeşitli implant materyallerin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğal kemikle karşılaştırmaktadır. Çizelgede de görüleceği gibi magnezyum diğer seramik biyomalzemelere göre daha yüksek kırılma tokluğuna ve daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülebilir. Magnezyum elastik modülü ve akma dayanımı, diğer metal implant malzemelerine göre kemiğe daha yakındır.

Çizelge 2.4. Çeşitli implant malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğal kemikle karşılaştırması (Yavuz, H.G., 2011).

Özellikler	Kemik	Magnezyum	Titanyum alaşımları	Cr-Co alaşımları	Paslanmaz çelik	Sentetik Hidroksiapatit
Yoğunluk, g/cm ³	1.8-2.1	1.74-2.0	4.4-4.5	8.3-9.2	7.9-8.1	3.1
Elastisite modülü, GPa	3-20	41-45	110-117	230	189-205	73-117
Akma dayanımı, MPa	130-180	65-100	758-1117	450-1000	170-310	600
Kırılma tokluğu, MPa.m ^{1/2}	3-6	15-40	55-115	-	50-200	0.7

Magnezyum toksik madde değildir, çözünür ve çözülmüş magnezyum vücuttan atılır. Magnezyum ve alaşımları kemiklerin gelişimini hızlandırabilir, vücutta yerleştirildikten sonra 3-12 hafta içinde yeni doku oluşturmaya yardımcı olabilir ve doku bölgesi iyileştikten sonra eriyip vücuttan atılacağı için ikinci bir ameliyata gerek kalmaz (Aghion, E., Eliezer, D., (2004)). Bir biyometaryal olarak magnezyumun en göze çarpan özelliklerinden biri, kemik dokusunun hidroksiapatit kristallerindeki kalsiyum yerini alabilmesi ve böylece kemik büyümesini teşvik etmesidir. İmplant materyali olarak magnezyum kullanmanın en önemli avantajlarından biri, elastik modülünün, günümüzde kullanılan metalik biyomalzemelere göre kemiğin elastik modülüne daha yakın olmasıdır (Witte, F, et al. (2005)).

Bu uygulamalarda magnezyumun ana dezavantajı, korozyona karşı düşük direncidir. Sonuç olarak saf magnezyum insan vücudunda hızla korozyona uğrar ve dokular iyileşmeden önce mekanik özelliklerini kaybeder. Korozyon sırasında gazlar hızla çıkar ve dokulara zarar verir. Bir yüzey koruyucu bir kaplama ile kaplanarak korozyon direnci artırılırsa, biyomalze olarak kullanım için daha uygun olabilir.

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIM STANDARDI

Ticari olarak kullanılan magnezyumun saflık değeri %99,8'i geçmesine rağmen genellikle mühendislik uygulamalarında alüminyum, çinko, manganez, nadir toprak, zirkonyum veya gümüş gibi metallerle alaşım yapılarak kullanılmaktadır (Biol, Y.

(2009), Polmear, I. J. (2006)). Magnezyum alaşımları temelde üç kısıma ayrılır. Az miktarda alaşım elementleri içeren neredeyse saf Mg alaşımları, Al içeren alaşımlar (AZ,AS,AM vb. serisi) ve Al içermeyen alaşımlardır.

Magnezyum alaşımları için uluslararası bir kodlama sistemi yoktur. Ancak genellikle ASTM (American Society for Testing Materials) B275-94 standardı kullanılmaktadır. Bu sistemde ilk iki harf magnezyum alaşımlarında en çok bulunan elementleri gösterir (Ghali, E. 2010). Çizelge 1.5’de magnezyum alaşımlarındaki elementleri gösteren kod harfler verilmiştir.

Çizelge 2.5. Mg alaşımındaki elementleri gösteren kod harfler.

Harf	Alaşım Elementi	Harf	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	M	Mangan
B	Bizmut	N	Nikel
C	Bakır	P	Kurşun
D	Kadmiyum	Q	Gümüş
E	Nadir Toprak Elementleri	R	Krom
F	Demir	S	Silisyum
H	Toryum	T	Kalay
J	Stronsiyum	W	İtriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimon
L	Lityum	Z	Çinko

Ana alaşım elementlerinin içeriği eşitse, alfabetik sıraya göre düzenlenir. İkinci harf alaşımdaki az miktarda elementi ifade eder. Harften sonraki ilk rakam, ana alaşım elementlerinin katkı yüzdesini, ikincisi ise diğer alaşım elementlerinin yüzdesini gösterir. Örneğin; ZM21 alaşımında; Z çinkoyu, M manganı ve %2 Zn , %1 Mn bulunduğunu göstermektedir.

Magnezyum alaşımları isimlendirilirken, harfler malzemeye uygulanan işlemleri belirtmek için kullanılmaktadır. F; malzemenin üretildiği halde olduğu, O; tavlama işlemleri uygulandığını, H; deformasyon sertleşmesini, W; çözündürme ısıl işlemlerini ve T; ısıl işlem yapıldığını belirtmektedir (Fleming, 2012).

Mg-Al-Zn-Mn, Mg-Mn, Mg-Al-Mn, Mg-Zr, Mg-Zn-Zr, Mg-RE-Zr, Mg-Ag-RE-Zr, Mg-Y-RE-Zr ticari olarak üretilen magnezyum alaşım gruplarıdır. Mg-Al-Zn alaşım

sistemi en yaygın kullanılan magnezyum alaşımıdır. Mg-Al-Zn alaşımli dökümlerin nemli ortam koşullarında korozyona uğraması nedeniyle, alaşıma 1925 yılında az miktarda manganez (ağırlıkça % 0,2) eklenmiş ve magnezyum alaşımının korozyon artışlarına direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Manganez, bazıları eritme işlemi sırasında ayrılan metaller arası bileşikler (Al-Mn-Fe) oluşturarak demir ve diğer ağır metal safsızlıklarını giderir. (Ghali, E. (2010), Polmear, I. J. (2006)) Çeşitli magnezyum alaşımları ve özellikleri Çizelge 1.6'da gösterilmektedir. Çizelgeden her alaşım elemanın eklenen malzeme için farklı işlevler sağladığı görülebilir.

Çizelge 2.6. Magnezyum alaşımlarının etkileri.

AZ63	Oda sıcaklığında iyi mukavemet ve dökülebilirlik.
AZ91	Kum kalıba ve metal kalıba döküm.
AM50	Yüksek basınçta metal kalıba döküm.
AS21	150°C iyi sürünme özelliği.
AE42	150°C iyi sürünme özelliği.
ZK51	Kum kalıba döküm, oda sıcaklığında iyi mukavemet ve dökülebilirlik.
ZC63	Basınçlı döküm, iyi yüksek sıcaklık mukavemeti ve kaynaklanabilirlik.
WE43	Yüksek sıcaklıkta sürünme direnci.

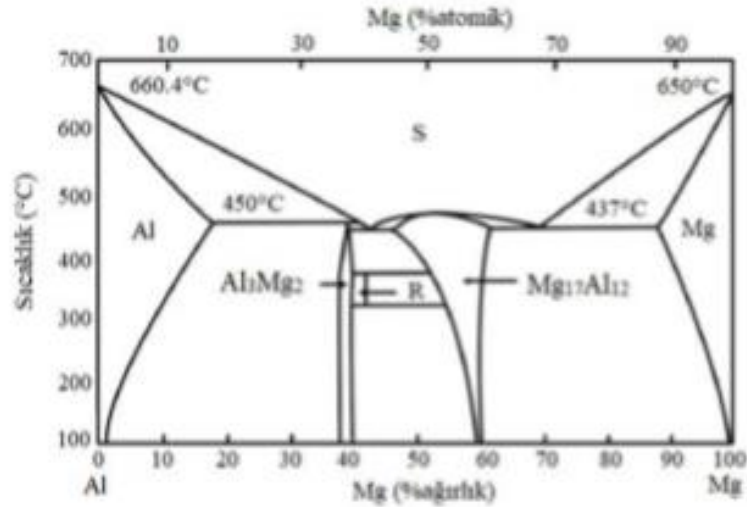
2.4. MAGNEZYUMA ALAŞIM ELEMENTLERİN ETKİSİ

Çoğu diğer metallerde olduğu gibi magnezyum metalinin de saf halde kullanılması, dayanımının düşük olması sebebiyle mümkün değildir. Malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için, Mg'ye alaşım elementleri eklenerek döküm veya dövme ürünler elde edilir. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, berilyum (Be), kalsiyum (Ca), bakır (Cu), Fe, mangan (Mn), Ni, silisyum (Si), gümüş (Ag), kalay (Sn), Zn ve zirkonyum (Zr) gibi ana elementler ile sodyum (Na), potasyum (K), Li alkali ve seryum (Ce), lantan (Ln), yitriyum (Y), neodim (Nd) gibi toprak elementleri ile alaşımlandırılabilir. Genel olarak bu elementler ile alaşımlandığında, malzemenin gerekli özelliklerinde iyileştirmeler elde edilir (Zhang, et al.,2000; Barber, 2004; Ünal, 2008). Örneğin; Mg biyomalzeme olarak kullanılmak istendiğinde içerisine Ca, biyomalzemenin yanı sıra sertlik özelliği de istenirse Ag eklenir. Ek

olarak, Li ilavesi, malzemenin yoğunluğunu ve sertliğini azaltırken dökülebilirliği artırır. Magnezyum'a katılan alaşım elementlerinin etkisi aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

2.4.1. Alüminyum

Magnezyum ve alaşımlarında kullanımı en çok tercih edilen elementtir, magnezyum içerisinde en yüksek çözünürlüğü ağırlıkça %12,7'dir. Alüminyum, mukavemet, sertlik, dökülebilirlik ve korozyon direncini artırır. Erimiş magnezyum alaşımının oksidasyon hızını azaltır. Alüminyum içeriğindeki artışla süneklikte azalma görülür. Magnezyum alaşımı ağırlıkça %6 alüminyum içerdiğinde, en iyi mukavemet ve süneklik kombinasyonu elde edilir (Czerwinski, F. (2008), Friedrich, et al., (2006)). Şekil 1.6'da Mg-Al faz diyagramındaki çözülmüş elementlerin miktarını göstermektedir.

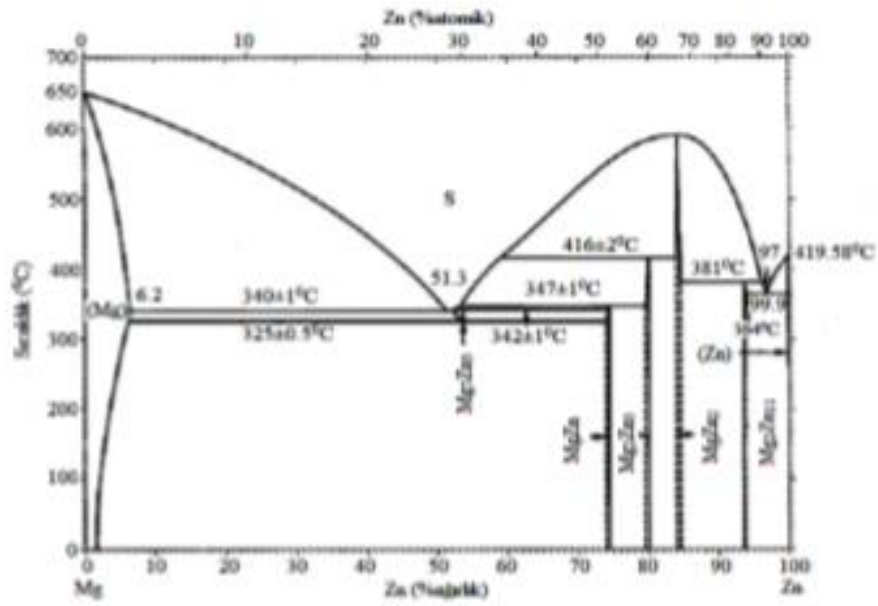


Şekil 2.6. Mg-Al faz diyagramı (Friedrich, vd, 2006).

2.4.2. Çinko

Oda sıcaklığında daha fazla mukavemet için genellikle alüminyum ile birlikte kullanılır. Magnezyum alaşımlarındaki demir ve nikel safsızlıklarının aşındırıcı etkisinin azaltır. Ayrıca erimiş metalin akışkanlığını artırır. Ancak magnezyum alaşımındaki çinko içeriği ağırlıkça %2'yi aştığında uzama azalır ve kırılma meydana

gelir. Süneklikteki azalma, $Mg_{17}Al_{12}$ fazında çinkonun tercihli birikimi ile açıklanabilir. Çinko ayrıca zirkonyum, nadir toprak ve toryum ile magnezyum alaşımının mukavemetini arttırmak için kullanılır (Biol, Y. (2009), Czerwinski, F. (2008)). Ek olarak, mükemmel katı çözünebilirliğe ve yaşlanma sertleşmesinde iyileştirici etkiye sahiptir. Fe ve Ni' in, magnezyum alaşımlarının korozyon direnci üzerindeki olumsuz etkilerini de azaltıcı özelliğe sahip olmaktadır (Friedrich, Mordike, 2006; Xu, et al., 2007; Gu, et al., 2009; Zhang, et al., 2009; Zhang, et al., 2010; Cai, et al., 2012; Ding, et al., 2014).

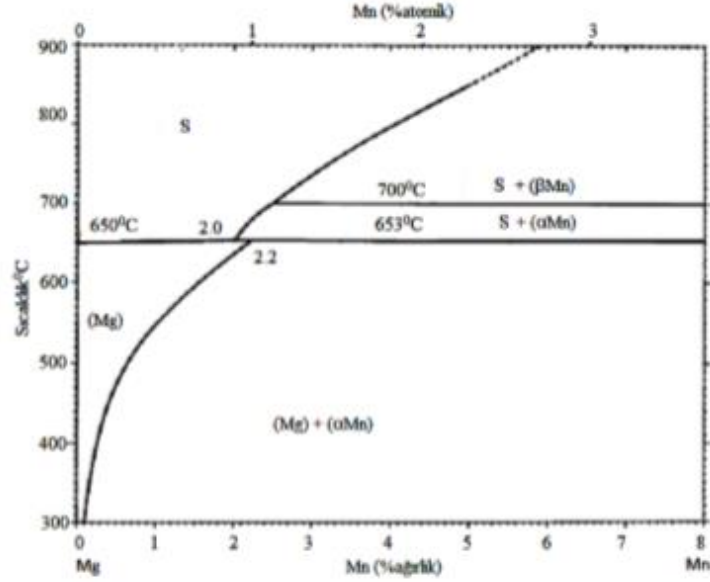


Şekil 2.7. Mg-Zn faz diyagramı (Friedrich, et al., 2006).

2.4.3. Mangan

Magnezyum alaşımlarına mangan eklemenin ana nedeni, Fe-Mn çökeltileri oluşturarak demir içeriğini kontrol etmesidir (Czerwinski, F. (2008), Polmear, I. J. (2006), Friedrich, et al., 2006). Mangan düşük konsantrasyonda (%1,5) kullanıldığında, Mg-Al alaşımlarında önemli bir tane inceltici etkiye sahiptir. Demir ve diğer ağır metallere yeni yapılar oluşturularak saflık yok edilir. Alaşımın akma dayanımını ve kaynaklanabilirliğini iyileştirir. İkili Mg-Mn alaşımının gerilme mukavemetini ve uzamasını azaltır. Düşük konsantrasyonlarda saflığı bozarak magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırır. Şekil 2.8'de Mg-Mn faz

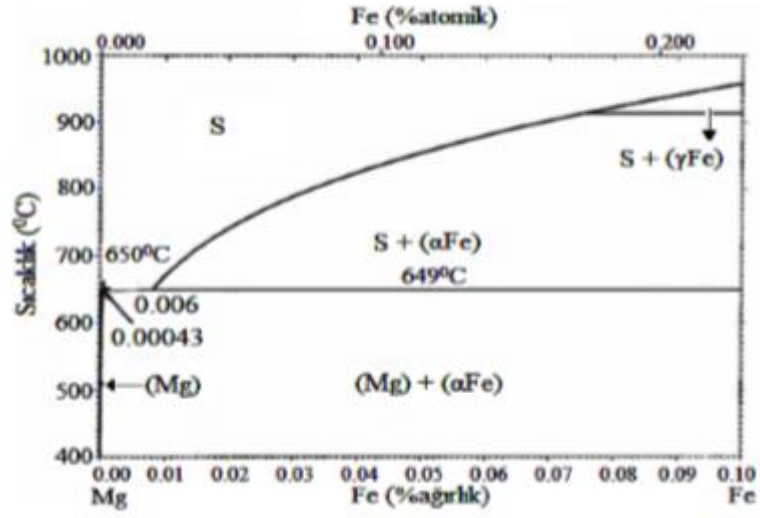
diyagramında Mn'nin farklı sıcaklık değerlerinde çözünürlüğünü göstermektedir (Baker, 1998; Xu, et al., 2007; Gu, et al., 2009; Ding, et al., 2014).



Şekil 2.8. Mg-Mn faz diyagramı.

2.4.4. Demir

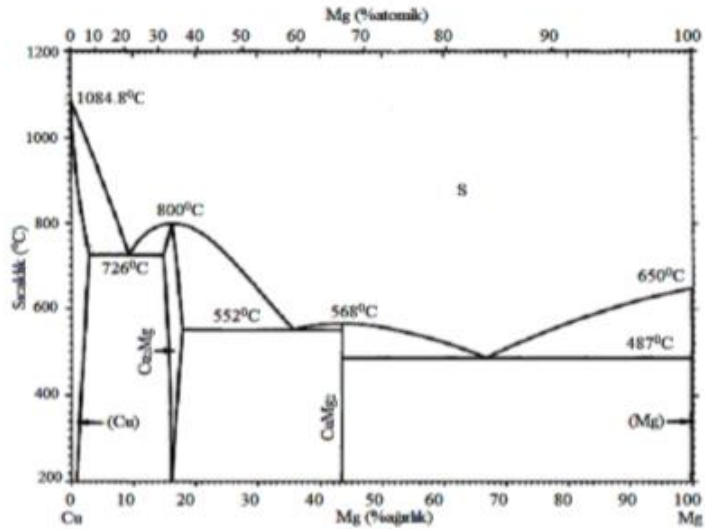
Fe, Mg'nin korozyon direncini büyük ölçüde azaltır. (Kainer, et al., 2003) Ek olarak, Mg ve çelik kalıp arasındaki oluşan reaksiyonları artırıcı etkisi vardır. Ancak magnezyum alaşımındaki demir içeriği ağırlıkça %0.03'ü geçmemelidir. Alaşımdaki büyük miktarda demir, malzemenin sünekliğini ve korozyon direncini azaltır. (Ji, et al., 2013). Alaşımın korozyon direncini yüksek hale getirmek için demir içeriği ağırlıkça %0.005'i geçmemelidir (ASTM B 94) (Czerwinski, F. 2008) Şekil2.9'da Mg-demir faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.9. Mg-Fe faz diyagramı (Baker, 1998).

2.4.5. Bakır

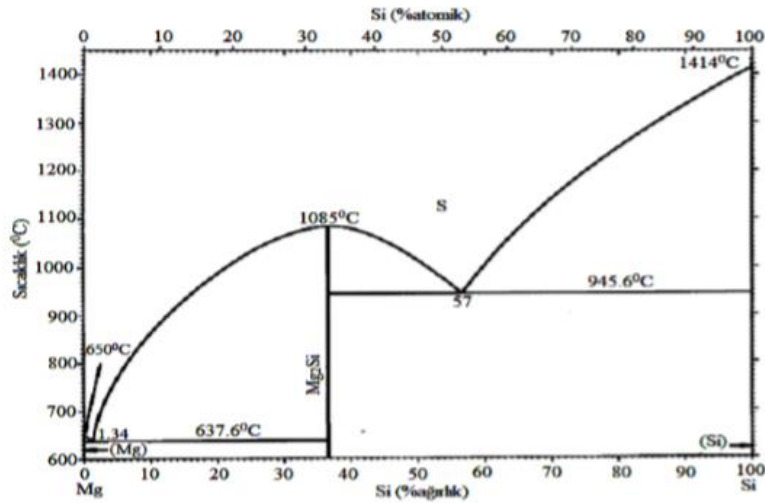
Cu, magnezyum alaşımının dökülebilirliği üzerinde iyileştirici bir etkiye sahiptir. Mg alaşımına eklendiğinde Mg_2Cu bileşiği oluşur. Konsantrasyonu ağırlıkça %0.05'i aştığında korozyon direncini olumsuz etkiler ancak yüksek sıcaklıklarda mukavemetini artıracak ve sünekliğini azaltacaktır (Kainer, 2003). Şekil2.10'da Mg-Cu faz diyagramından malzemenin fazının görülebildiği sıcaklık değerleri görülebilmektedir (Barber, 2004; Friedrich, Mordike, 2006; Kapinos, et al., 2014).



Şekil 2.10. Mg-Cu faz diyagramı.

2.4.6. Silisyum

Si, yaygın olarak Al, Zn ve Mn ile kullanılan bir alaşım elementidir ve yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artıran bir elementtir. Magnezyum alaşımındaki silisyum içeriği %1,5'i geçmez. Si ve Fe birlikte kullanıldığında malzemenin korozyon direncinin azaldığı görülmüştür (Zhang, 2000; Vogel, et al.,2002). Si, magnezyumda Mg_2Si intermetalik fazı oluşturarak malzemenin sürünme direncini ve döküm performansını iyileştirir (Aizawa,et al., 2006; Freidrich, et al., 2006; Ünal, 2008; Gupta, et al., 2011; Dobrzanski, 2012). Mg_2Si çökeltme fazı zayıf bir katot olduğundan, silisyumun magnezyum alaşımlarının korozyon hızı üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. pH 10,5 te %5 NaCl çözeltisi içinde Mg_2Si 'nin çökeltme fazının korozyon potansiyeli -1,65V / SCE'dir bu da saf magnezyum -1,66 V'nin korozyon potansiyeline çok yakındır (Ghali, E. 2010). Magnezyum silisyum faz diyagramı şekil2.11'de gösterilmektedir (Baker, 1998).



Şekil 2.11. Silisyum-Magnezyum faz diyagramı (Baker, 1998).

2.4.7. Nikel

Demir gibi nikel de magnezyum alaşımları için zararlı elementtir. Korozyon direncini düşürücü etkisi vardır. Nikel içeriği, ortalama %0,01 ila %0,03 miktarda kullanılması gerekir. %0,005 ile en yüksek korozyon direncine sahiptir (Barber, 2004; Kapinos, et al., 2014).

BÖLÜM 3

MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA VE KOROZYON

3.1. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA KOROZYON

3.1.1. Korozyon

Korozyon, malzemelerin birbirleriyle temas etmesi veya malzemelerin bulunduğu ortamla reaksiyona girmesi sonucunda oluşan ve malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişikliklere neden olan bir olaydır (Doruk, 1982). Korozyon, metal malzemelerin bulunduğu ortamla reaksiyona girmesi sonucu oluşan ve dışarıdan enerji gerektirmeyen doğal olarak oluşan bir olaydır. Çoğu metaller suya ve atmosferik etkilere karşı dirençli değildir ve normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilir. Korozyon, reaksiyon ortamına göre iki kısma ayrılır bunlar, kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyondur. Elektrokimyasal korozyon su ortamında meydana gelirken, kimyasal korozyon gaz ortamında oluşan korozyon çeşididir. Korozyon oluşumundaki parametreleri; sistemdeki stres, ortamın pH değeri, kimyasal koşullar ve kullanılan malzemenin özellikleri belirler (Doruk, 1982).

Magnezyum, metal yüzeyde oluşan gri oksit film koruyucu özelliklerinden dolayı yüksek atmosferik korozyon direncine sahiptir. Korozyon, koruyucu film hasar gördüğünde ve metal aşındığında meydana gelir. Nem nedeniyle magnezyum alaşımlarının korozyonu artar. Kırsal ve endüstriyel ortamlarda magnezyumun yüzeyindeki oksit filmi, metali büyük ölçüde korur (Ghali, E. (2010), Friedrich (2006)).

Korozyonun metal malzemeler üzerinde birçok zararı vardır. Malzemelerin bozulmasından dolayı parçaların boyutlarının küçülmesiyle kırılabilmekte, çeşitli depolarda veya iletim boru hatlarında meydana geldiği için depodaki malzemeler dış

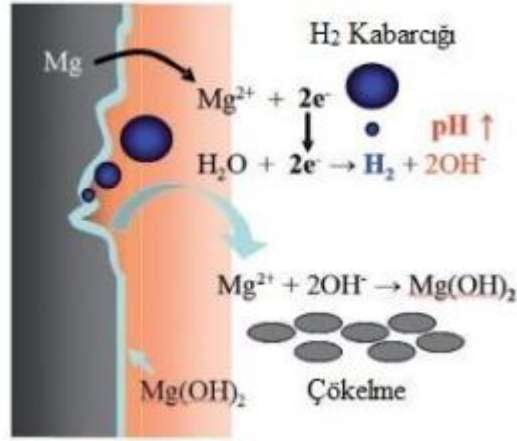
ortamla temas edebilmekte, makine parçalarında görüldüğü için operasyonun durmasına hatta ölümcül kazalara neden olabilir. Ayrıca bu nedenlerden dolayı insanlar ekonomik kayıplara düşmektedir. Makinenin sürekli bakımı, aşınmış parçaların yeni parçalar ile değiştirilmesi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu tür sorunların önüne geçmek için en uygun malzemeyi bulmak malzemeyi farklı elementlerle alaşımlandırmak ve korozyonu önlemeye çalışmak için araştırmalar yapılmıştır (Nüumberger, et al., 1995; Zhang, 1996; Kaesche, 2003; Kreysa, et al., 2004; Roberge, 2012).

3.1.2. Kimyasal Korozyon

Bilinen yapı metalleri doğada bileşik haldedir. Bu nedenle, metaller sürekli olarak kararlı yapılar oluşturma eğilimindedir ve fazla enerjiyi serbest bırakarak bileşik bir duruma geri dönmeye çalışır. Elektrolit sıvı ile oksijen ve metal malzemeler bu ortamı oluşturmak için yeterlidir.

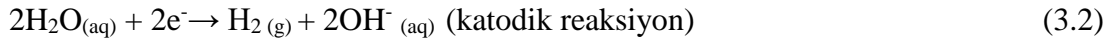
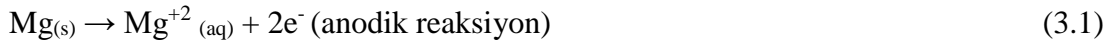
Metal malzemelerde bozunma ve elektron kaybı ile korozyon gerçekleşmekte, sistem temelde bir anot, bir katot ve bu elektron hareketlerinin gerçekleşeceği bir elektrolit sıvısından oluşmaktadır. Elektronların kaybolduğu metal kısma anot denir. Anottaki elektron kaybından dolayı oksidasyon reaksiyonu meydana gelir. Sistemin elektronları alan kısmına indirgenme reaksiyonunun gerçekleştiği katot denir (Nüumberger, et al., (1995), Zhang, (1996) Kaesche, (2003) Kreysa, et al., (2004) Roberge, 2012).

Mg aktif bir metal olduğu için elektron verme ve kararlı bir yapıya geri dönme eğilimindedir.

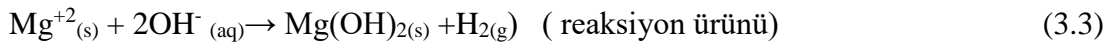


Şekil 3.1. Sulu ortamda magnezyum çözünmesi.

Şekil 3.1’de magnezyumun korozyon oluşum mekanizmasının gerçekleşmesi görülmektedir. Magnezyum ortamdaki su ile etkileşime girerek Mg^{+2} iyonları şeklinde çözünür.

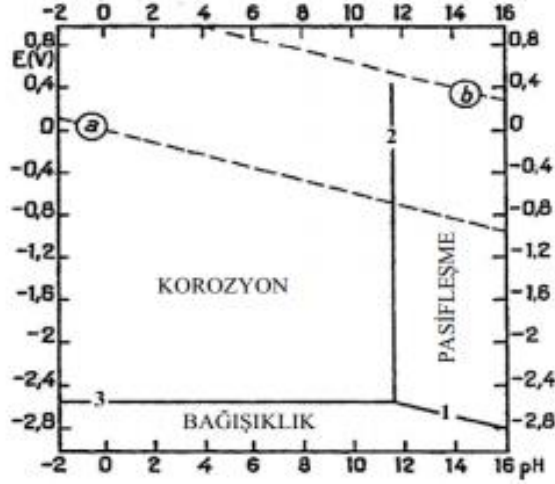


Tepkime sırasında H_2O elektron kaybeder ve bu da H_2 kabarcıklarının ve OH^{-} iyonlarının oluşumuna neden olur. Ayrıca OH^{-} iyonlarının sayısı arttıkça, ortamın pH yükselmesine neden olur. Ortamdaki Mg^{+2} ve OH^{-} iyonları reaksiyonunun bir sonucu olarak, $Mg(OH)_2$ çökeltisi oluşur (Yun, et al., 2009).



Metal malzemenin bulunduğu ortamın pH değeri malzemede oluşan korozyon mekanizmasını etkiler, bu nedenle kullanılan potansiyel pH diyagramı oluşturulur. Bazı metal malzemelerin sulu çözelti içerisinde çözünebildiğinden dolayı korozyon olayının yavaşlaması veya durması görülmemektedir. Ancak benzer bir ortamda az miktarda çözünmeyen metal malzeme korozyon ürünleri metal yüzeyi kaplar ve koruyucu bir tabaka görevi görür, bu durma pasifleşme denir. Ek olarak, metalik durumun korunabildiği alan da ‘bağışıklık’ olarak adlandırılır. Bu bölgede korozyon

olayı meydana gelmez, malzemenin potansiyel değerini bu alana taşıyarak korozyona karşı koruma oluşturulabilmektedir. Şekil3.2’de $Mg(OH)_2$ ’nin termodinamik stabiliteye sahip olduğu alan gösterilir.



Şekil 3.2. $Mg(OH)_2$ potansiyel pH diyagramı (Song ve Atrens, 1999).

1. Eksen: $Mg + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$
2. Eksen: $Mg^+ + H_2O \rightarrow MgO + 2H^+$
3. Eksen: $Mg \rightarrow Mg^{+2} + 2e^- + H_{2(g)}$

3.1.3. Korozyon Hızı Belirleme

Metallerin ve alaşımların korozyon direncini belirlemek için, korozyon oranını (birim zamanda çözünen metal miktarı olarak tanımlanır) belirlemek önemlidir.

Temel olarak metal malzemelerin korozyon eğilimini belirlemede EMF serisindeki konumlarına bakılır. Farklı metal malzemeler birlikte kullanıldığında veya hidrojen ile reaksiyona girdiğinde, serideki konumlarına bağlı olarak, bir anot veya katot reaksiyonu meydana gelir.

İlk korozyon çalışmasında, korozyon hızı kütle kaybına göre hesaplanırdı. Ancak bu yöntem uzun vadeli sonuçlar sağlayacağından yeni yöntemler de geliştirilmiştir. Elektrokimyasal tekniklerin gelişimi ile birlikte, metallerin korozyon oranını

belirlemek için polarizasyon eğrileri kullanılmıştır. Bu sayede kısa sürede etkili sonuçlar elde etmek mümkün olmuştur. Metalik malzemelerin polarizasyon eğrisini çizerken, sabit potansiyel yöntemi ve sabit akım yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır (Doruk, 1982).

3.1.3.1. Sabit Potansiyel Yöntemi

Bu yöntemde elektrotlar ve potansiyometre bir süre sabit bir potansiyel değerinde tutulur ve ardından karşılık gelen akım değeri ölçülür. Potansiyelde küçük değişiklik yapılarak gerçekleştirilen ölçüm yöntemi de potansiyodinamik yöntem olarak adlandırılır.

3.1.3.2. Sabit Akım Yöntemi

Sabit akım yöntemi elektrotlara hem anot hem de katot yönlerinde uygulanır. Bu, sabit akım altında elektrot potansiyelini ölçme işlemidir. İşlem sırasında meydana gelen gerilimler grafiğe geçirilir. Kullanılan elektrot sayısına göre bu yöntem için 3'lü ve 2'li yöntem bulunmaktadır. Üç elektrotlu yöntem, çalışma elektrodu, yardımcı elektrot ve referans elektrotu içerir. Kontrol edilecek elektrot, yardımcı elektrodun anot ve katot yönlerinde belirli bir süre sabit bir harici akım uygulayarak, referans elektroda göre elektrot potansiyeli ölçülebilir. Yer değiştirme reometresi tarafından kullanılan akım yoğunluğunu değiştirerek elektrot potansiyeli yeniden ölçülür. İki elektrotlu yöntemde, referans elektrot kullanılmaz, ancak iki özdeş çalışma elektrotu kullanılır. Elde edilen polarizasyon eğrisi, korozyon oranını iki farklı şekilde hesaplamak için kullanılır; kimyasal ve elektrokimyasal (Çizelge 2.1).

Çizelge 3.1. Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler.

Kimyasal Yöntemler	Elektrokimyasal Yöntemler
Kütle Kaybı	Tafel Ekstrapolasyon
	Lineer Polarizasyon

3.1.3.3. Kimyasal Yöntemler

Kütle Kaybı

Malzemenin kütle kaybına bağlı olarak korozyon oranını hesaplamanın bir yöntemidir.

Korozyon hızı: $\Delta W / A \cdot T$

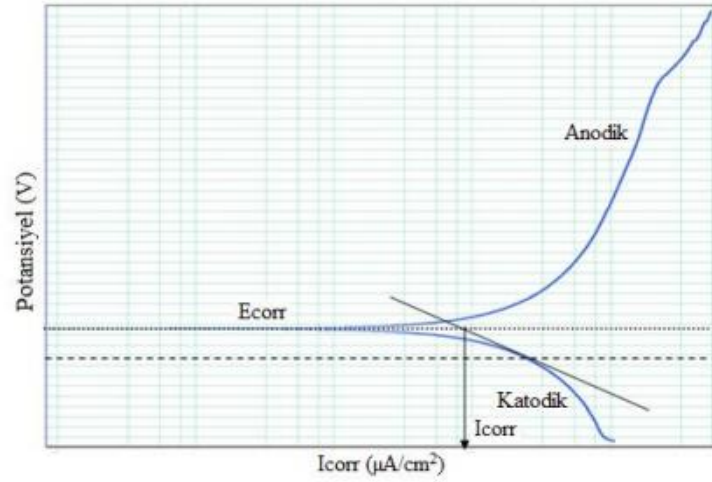
Korozyon hızı denklem'deki gibi hesaplanmaktadır. ΔW : kütle kaybı (mg), A: Yüzey alanı (cm)² ve T: zaman (saat) olmaktadır.

3.1.3.4. Elektrokimyasal Yöntemler

Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Korozyon potansiyelinin net bir akım değeri vardır. Ancak toplam anot akımı değeri ile toplam katot akımı birbirine eşit olduğu için akım değeri okunamaz. Akım değeri korozyon akımı (I_{kor} ($\mu A/cm^2$)) olarak adlandırılır. Bir metalin korozyon hızı belirlenirken, korozyon akımının elektrot yüzey alanına bölünmesi ile bulunur (Altun, 2004).

Korozyon potansiyelinden anot veya katot yönünde yarım çekilmiş Log akım potansiyel eğrisine doğrusal Tafel eğrisi denir. Parçaları geriye doğru ekstrapole edildiğinde, korozyon potansiyelinde kesişirler ve kesişme noktasındaki potansiyel korozyon potansiyeli (E_{kor}) karşılık gelen akımda korozyon akım yoğunluğudur (I_{kor}). (Şekil2.3) (Doruk,1982).



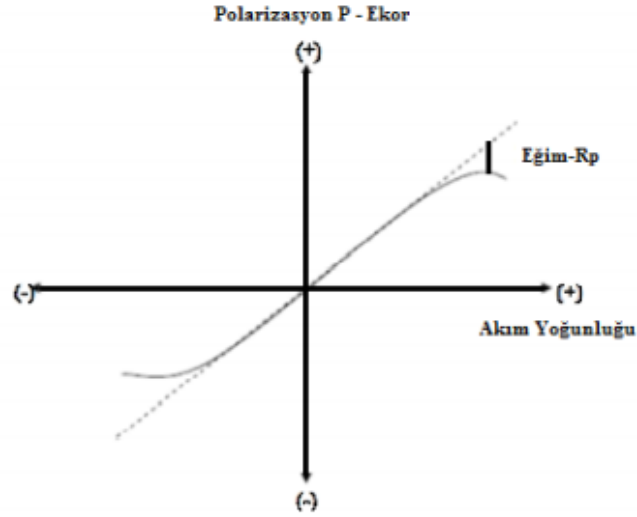
Şekil 3.3. Korozyon akım yoğunluğu ve potansiyeli (Badea, vd, 2010).

Lineer Polarizasyon Yöntemi

Polarizasyon eğrisi, ± 10 mV civarında harici korozyon potansiyeline uygulanır. Akım yoğunluğu ile aşırı gerilim arasındaki doğrusal değişimi gösterir. Korozyon potansiyeline yakın doğrusal bölgede polarizasyon eğrisinin eğim polarizasyonu, polarizasyon direnci (R_p) olarak adlandırılır. Deney ile elde edilen direnç korozyon oranı hesaplamalar için kullanılabilir.

$$\dot{I}_{kor} = (\beta a \cdot \beta k / 2,303 \cdot (\beta a + \beta b)) * 1 R_p \quad (3.4)$$

Stern-Geary tarafından geliştirilen bu denklem kullanılarak korozyon akımı ve korozyon hızı belirlenebilir. βa , anot tafel katsayısı, βk , katot tafel katsayısı, i_{kor} , korozyon akım yoğunluğunu ifade etmektedir (Üneri, 1998).

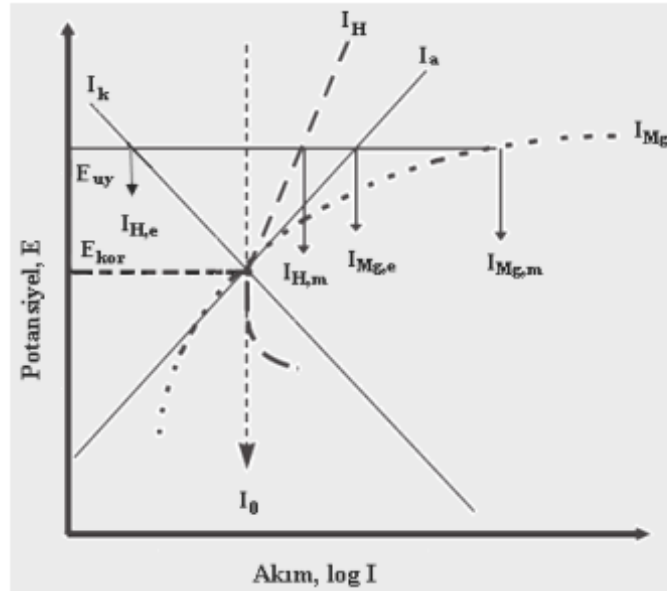


Şekil 3.4. Polarizasyon direncini bulmak için doğrusal polarizasyon yöntemi kullanımı.

3.1.4. Negatif Fark Etkisi (Negative Difference Effect- NDE)

Normal koşullar altında, uygulanan potansiyel arttıkça, anot reaksiyon hızı artar ve katot reaksiyon hızı azalır. Bununla birlikte, magnezyum için durumun aksine, potansiyel arttıkça, reaksiyonun hidrojen oluşturma hızı, magnezyumun korozyon hızı ile artar. Magnezyumda gözlenen bu elektrokimyasal olay, negatif diferansiyel etki (NDE) olarak bilinir. Sonuç olarak, korozyon potansiyelindeki hidrojen oluşum akımı yoğunluğu ile anot polarizasyonu nedeniyle elde edilen hidrojen oluşum akımı yoğunluğu arasındaki fark negatif olur (Song, et al., 1999, Song, et al.,2003, Thomaz, et al., 2010).

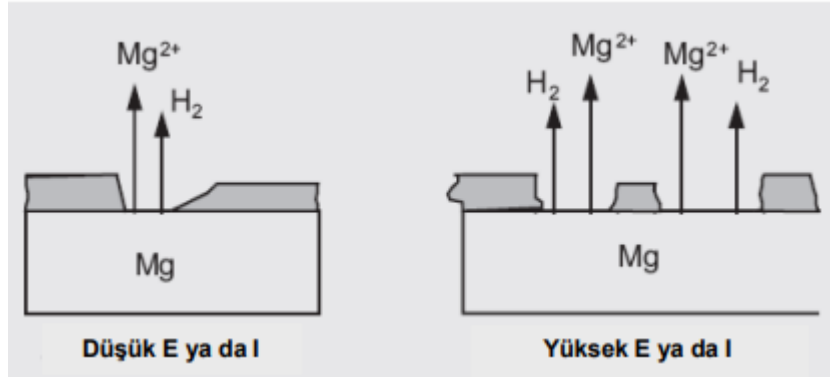
Şekil 2,5'te normal polarizasyon eğrisi NDE ile karşılaştırılır. Normal anot ve katot reaksiyonları, I_a ve I_k çizgileriyle temsil edilir. Bu reaksiyonların hızı korozyon potansiyelindeki (E_{kor}) I_0 değeridir.



Şekil 3.5. NDE'nin polarizasyon eğrisi ile şematik olarak gösterilmesidir.

Çoğu metalde meydana gelen elektrokimyasal polarizasyon davranışı elektrik potansiyeline bağlıdır. Daha büyük bir pozitif değer (E_{uy}) verildiğinde, normal anot reaksiyon hızı I_a eğrisi boyunca $I_{Mg,e}$ 'ye yükselirken, katot reaksiyon hızı I_k eğrisi boyunca $I_{H,e}$ 'ye düşer. Bununla birlikte, potansiyel arttıkça, magnezyumun korozyon hızı ve hidrojen oluşturma reaksiyonunun hızı, kesikli çizgiler I_{Mg} ve I_H ile gösterilen şekilde artar. Bu nedenle, uygulanan E_{uy} potansiyelinin hidrojen oluşum hızı $I_{H,m}$ değeridir ve NDE bu değer I_0 'dan büyük olduğu için oluşur. Ek olarak, uygulanan E_{uy} potansiyeli için, anot çözünme hızı, $I_{Mg,m}$ değeridir ve bu değer, korozyon akımı $I_{Mg,e}$ 'den daha büyük olduğu görülebilir (Song, et al., 1999, Song, et al., 2003).

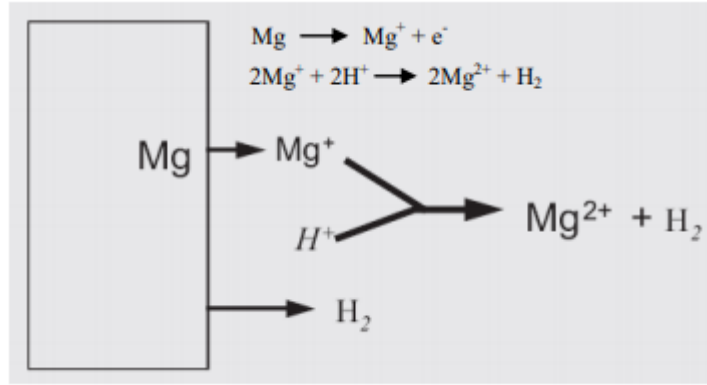
Bilim insanları, magnezyum ve alaşımlarında meydana gelen olumsuz etkinin dört farklı mekanizmadan kaynaklandığına inanıyor. Mekanizma 1'de NDE, magnezyum yüzeyinde oluşan kısmi bir koruyucu film anot çözülmesi sırasındaki hasara bağlanır (şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kısmi koruyucu yüzey film modeli.

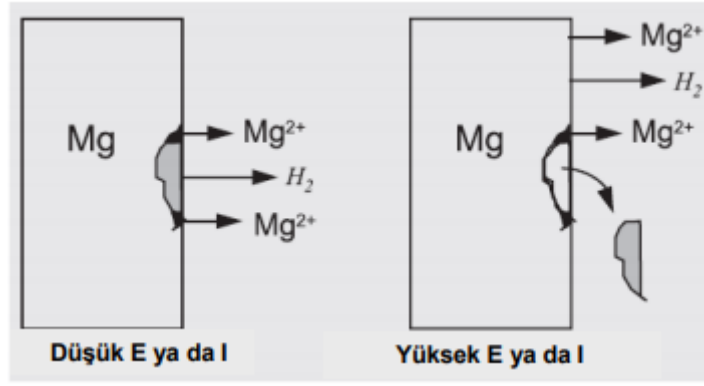
Potansiyel dayatılmış akım yoğunluğu arttıkça, filmin koruyucu işlevi azalacaktır (Song, et al., 1999, Song, et al., 2003).

Mekanizma 2’de elektrokimya, anot çözünme işlemi sırasında gerçekleştirilir. Oluşan Mg^+ tek değerlikli iyonun kimyasal reaksiyonu nedeniyle hidrojen açığa çıkar (şekil 2,7) (Song, et al., 1999).



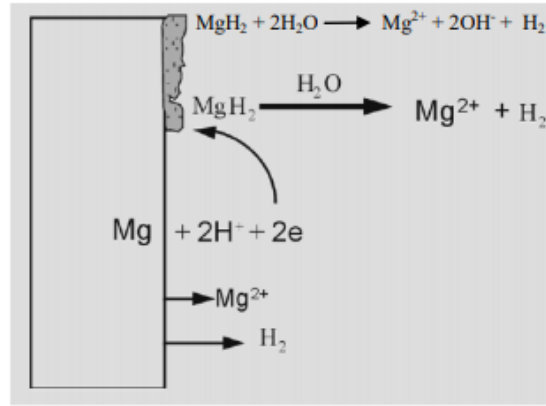
Şekil 3.7. Tek değerlikli magnezyum iyon modeli.

Mekanizma 3’te NDE, korozyon sürecindeki ikincil faz parçacıklarını önlemek için kullanılır (özellikle yüksek anot akım yoğunluğu ve potansiyel değeri). Local elektrokimyasal korozyon nedeniyle genellikle magnezyumdan daha fazla katot olan ikincil faz parçacıklarının düşmesinden kaynaklanan ağırlık kaybı, elektrokimyasal çözünmeden kaynaklanan ağırlık kaybından daha fazladır. Şekil2.8’de gösterildiği gibi, daha yüksek akım yoğunluklarında, magnezyumdan çıkan partiküllerin sayısında artış görülecektir (Song, et al., 1999).



Şekil 3.8. Düşen parçacık modeli.

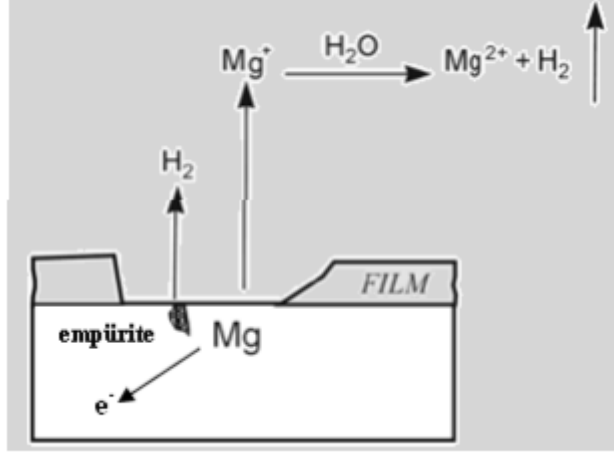
Mekanizma 4'te NDE, magnezyum yüzeyinde oluşan MgH_2 ile açıklanır. MgH_2 su içinde yüksek reaktiviteye sahiptir ve Mg^{+2} ile H_2 'ye ayrışır (Şekil 2,9) (Song, et al., 1999).



Şekil 3.9. MgH_2 modeli.

Song, Atrens ve arkadaşlarının NDE'nin oluşumunun elektrokimyasal mekanizmaya bağlı olduğuna öne sürdükleri şematik diyagram Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Bu mekanizmaya göre uygulanan gerilim veya akım yoğunluğu arttıkça magnezyum yüzeyindeki film olmayan alan da artar. Film olmayan alanda tek değerlikli magnezyum iyonları ve hidrojen oluşumuyla korozyon meydana gelir. Uygulanan potansiyel veya akım yoğunluğu negatif olduğunda yüzey filmi hasar görmez. Bu nedenle magnezyumun anodik çözünürlüğü çok düşüktür. Ancak yüzey filminde hidrojen oluşmaya devam eder ve potansiyel çukurlaşma potansiyeline kadar arttıkça hidrojen oluşum hızı azalır. Oyuklanma potansiyelinde ise yüzey filmi parçalanmaya başlar. Bu nedenle yüzey filmi olmayan alanlarda hidrojen oluşumu ve magnezyum

çözünmesi daha kolaydır. Potansiyel veya akım yoğunluğu arttıkça, film olmayan bölgenin genişlemesi nedeniyle anotun hidrojen oluşumu ve çözünme hızı artar (Song, et al., 1999, Song, et al., 2003).



Şekil 3.10. Elektrokimyasal korozyon ve magnezyumun yüzeyinde gerçekleşen NDE.

3.1.5. Magnezyumda Meydana Gelen Korozyon Türleri

Magnezyum, doğal bir yapıya sahip bir pasivasyon metali olmasına rağmen, ortama bağlı olarak, korozyon her zaman kullanımı için sınırlayıcı faktördür. Magnezyum alaşımlarındaki korozyon, esas olarak klorür (Cl^-) içeren %3,5 NaCl çözeltisinde gerçekleşir. İçerdiği tuz miktarının %3,5 olmasının sebebi, günlük yaşamda karşılaşılan korozyon olaylarının deniz suyu gibi tuzlu suların etrafında bulunmasından kaynaklanır (ASM Handbook, 1987; Song, et al., 1999).

Magnezyum ve alaşımları arasındaki ilişki ve kullanılan farklı metal malzemeler, atmosferik kirlilik veya çevresel tuzluluk nedeniyle, Mg ve alaşımlarında farklı korozyon türleri gözlemlenir.

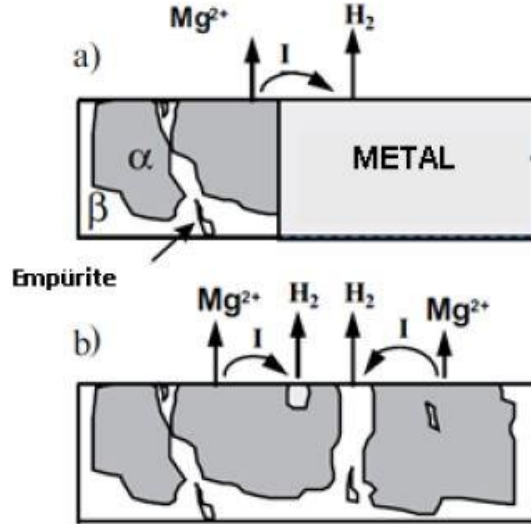
3.1.5.1. Galvanik Korozyon

Mühendislik metallerindeki düşük negatif magnezyum potansiyeli nedeniyle, magnezyumda galvanik korozyon meydana gelir. Magnezyumun makro galvanik korozyona uğrama sebebi diğer metallerle temas ettiğinde kurban anot görevi görerek

aşınmasıdır (Şekil 3.11a). Elektriksel korozyon oranını artıran faktörler Anot-katot mesafesi küçük, iletkenlik orta, katot / anot alanı oranı ve anot-katot potansiyel farkı büyüklüğüdür.

Fe, Ni ve Cu gibi daha yüksek potansiyele ve düşük hidrojen aşırı gerilimine sahip magnezyum alaşımlarındaki katot safsızlıkları veya fazları, metal içinde mikro galvanik hücreler oluşturabilir ve korozyona neden olabilir (Şekil 3.11b).

Aktif korozyon potansiyeli ve yüksek hidrojen aşırı gerilimine sahip metaller (Al, Zn, Cd ve Sn gibi) magnezyuma daha az zarar verir (Zeng, et al.,2006, Czerwinski, F.2008, Song, et al., 1999).



Şekil 3.11. a) Yüksek akim korozyonu, b) Alçak akim korozyonu.

3.1.5.2. Oyuklanma Korozyonu

Magnezyum alaşımlarının oyuklanma korozyonunun, pasivasyon filmindeki kusurlu bölgelere korozif iyonların (Cl⁻ ve SO₄²⁻ gibi) adsorpsiyonu ve lokal penetrasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Magnezyum ve magnezyum alaşımlarının oyuklanma korozyonu hakkında çok az sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, çukur direnci gösteren pasif akım yoğunluğu (ip) ve çukurlaşma potansiyeli (E_{oy}) parametreleri ölçülmüştür. Pasif akım yoğunluğu, pasif film korumasının kalitesini belirleyen bir ölçüdür. Oyuklanma saldırısı

neticesinde ise pasif filmde alana gelen zarara karşı filmin mukavemetini oyuklanma potansiyeli belirlemektedir. Metal yüzeyinde bulunan filmin koruyuculuğunu ise oyuklanma potansiyelinin yüksekliği belirler (Zeng, et al., 2006, Ghali, E. 2010, Ghali, et al., 2004).

3.1.5.3. Aralık ve Kurtçuk Korozyonu

Magnezyum alaşımlarında korozyonun oksijen konsantrasyonu farkından etkilenmemesi nedeni ile aralık korozyonuna manezyum alaşımlarında rastlanmamaktadır. Metalin çatlak boyunca korozyona uğramasının nedeni, oksijenin boşluğa girememesiyle oluşan anodik bölge ve aralığın dışındaki yüksek oksijen konsantrasyonu ile oluşan katot bölgesidir. (Zeng, et al., 2006, Ghali, E. 2010, Song, et al., 1999).

Koruyucu kaplamaların ve anodizasyon tabakalarının altında meydana gelen kurtçuk korozyonu ise aralık korozyonunun özel bir şeklidir (Ghali, E. 2010).

Çukurlaşmanın başlamasından sonra, boşluklardan uzanan dar, yarı silindirik dağlama lifleri olarak kurtçuk korozyonu meydana gelir.

3.1.5.4. Gerilmeli Korozyon Çatlama

Magnezyumda meydana gelen gerilme korozyonu çatlama genellikle taneler boyunca meydana gelir. Bazı durumlarda tane sınırı boyunca $Mg_{17}Al_{12}$ fazı nedeniyle, Mg-Al-Zn alaşımında taneler arası gerilme korozyonu çatlama gözlemlenmiştir.

Alüminyum ve çinko gibi alaşım elementlerinin eklenmesi, gerilme korozyonu çatlama gelişmesine yol açabilir. Çalışmalar, magnezyum alaşımlarının pH değeri 10,2'den büyük alkali çözeltilerde gerilme korozyonu çatlama karşı yüksek dirence sahip olduğunu, klorür ve saf su içeren nötr çözeltilerde ise alaşımlardaki gerilme korozyonu çatlama arttığını göstermiştir (Song, et al., 1999).

3.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINDA AŞINMA

3.2.1. Aşınma

Malzemelerin bir yüzeyden diğer bir yüzeye taşınması ya da aşınma parçalarının oluşumu sonucu ortaya çıkan kayba aşınma denir. Aşınma sisteminde; temel malzeme (aşınan) karşı malzeme (aşındırıcı), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın temel unsurlarını oluşturmaktadır. Tüm bu unsurların oluşturduğu sistemi teknik olarak 'tribolojik sistem' denir.

Aşınma genellikle önceden bilinen bir hasar türüdür. Birbirleriyle temas halinde olan malzemelerin yüzeyleri bir oksit film veya yağlayıcı ile korunsa bile, oksit tabakasının bozulması veya mekanik yük altında yağlayıcının hasar alması yüzeylerin doğrudan birbirleri ile temas halinde olmasına neden olacaktır. Bu temastan kaynaklanan sürtünme çalışma koşullarında malzemelerin ömrünü ve performansını sınırlayarak aşınmaya neden olacaktır. Doğru yağlama, filtrasyon, doğru malzeme seçimi ve doğru tasarım gibi faktörlerle bu hasar en aza indirilebilir ancak önlenemez (H. Czichos, 1997).

3.2.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmaya etki eden faktörler dört ana grup halinde toplamak mümkündür.

Ana Malzemeye Bağlı Etkenler

- Malzemelerin Kristal yapısı
- Malzemenin sertliği
- Elastisite modülü
- Deformasyon davranışı
- Yüzey pürüzlülüğü
- Malzemenin boyutu

Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler Ve Aşındırıcı Etkisi

Ortam Şartları

- Sıcaklık
- Nem
- Atmosfer

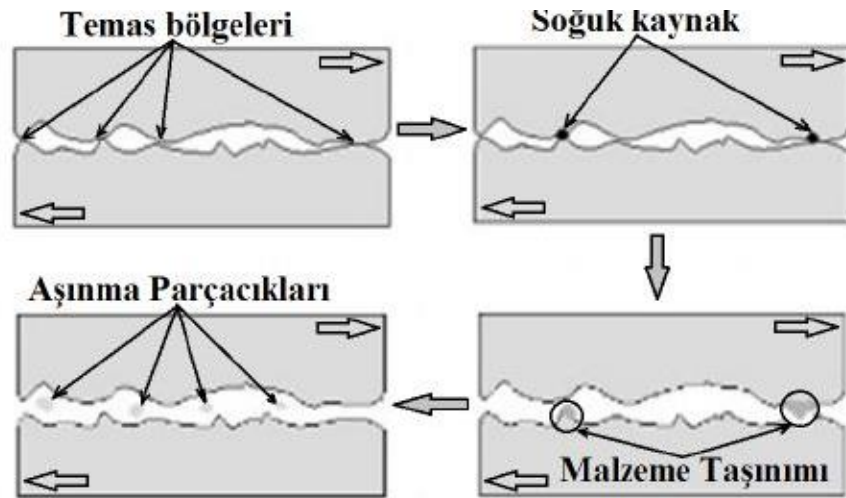
Servis Şartları

- Basınç
- Hız
- Kayma yolu (Y.C. Chiou, vd, 1985).

3.2.3. Aşınma Türleri

3.2.3.1. Adhesiv Aşınma

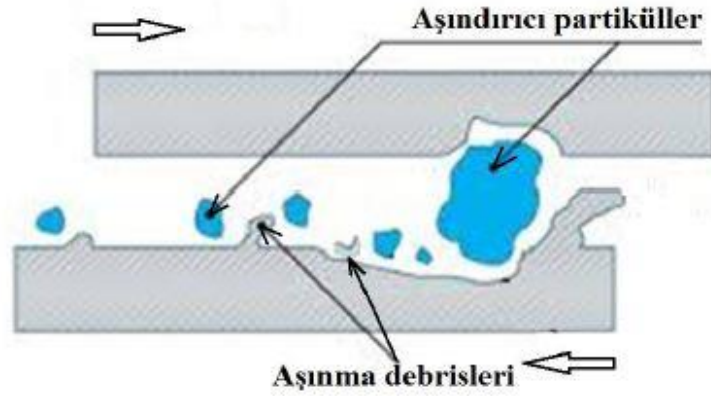
Adhesiv aşınma, aralarında kayma sürtünmesi olan yüzelerde soğuk kaynak veya lokal yapışma sonucu bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve ardından kayma hareketinden dolayı malzeme kaybı şeklinde meydana gelir (T. Varol, 2016).



Şekil 3.12. Adhesiv aşınma.

3.2.3.2. Abrasiv Aşınma

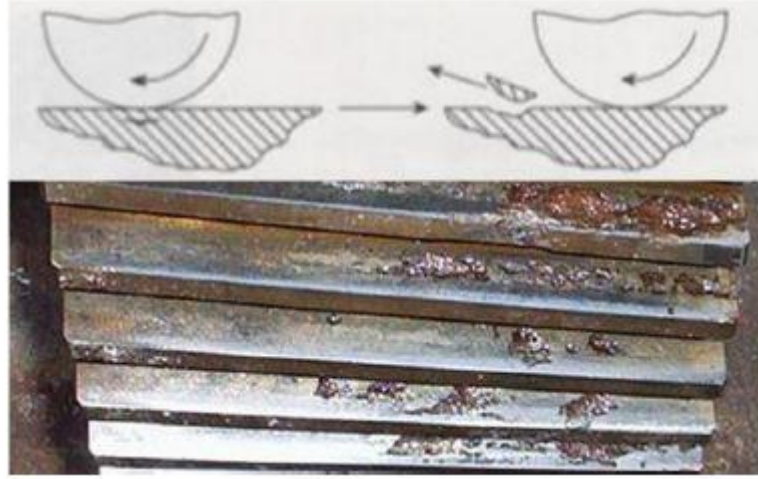
Çizilme veya yırtılma olarak da adlandırılabilen Abrasive aşınma türünde birbirleri ile eş çalışan malzeme çiftinde hızlı ve önemli ölçüde hasar oluşabilmektedir. Bu tür kendisinden daha sert parçacıklara maruz kalmış malzeme yüzelerinin basınç altında etkileşmesi sonucu sert parçacıkların yüzeyden parçacık kaldırması şeklinde de tanımlanabilir (T. Varol, 2016).



Şekil 3.13. Abrasiv aşınma.

3.2.3.3. Yorulma Aşınması

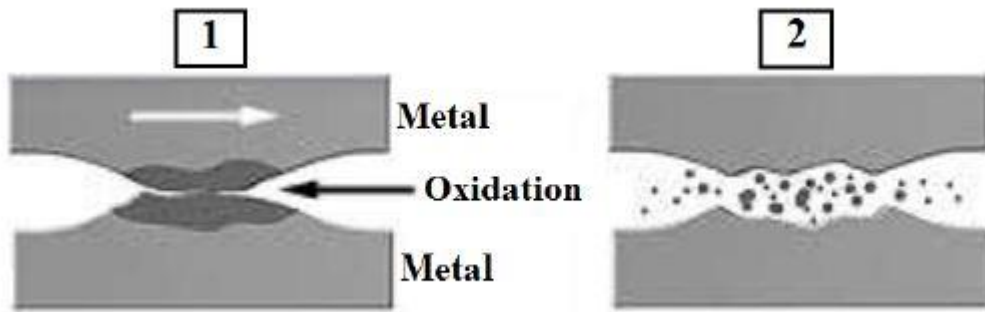
Yorulma aşınması, daima temas halinde bulunan (dişli çarklar, kam mekanizmaları, rulmanlı yataklar) yüzeyler arasında yaygın olarak görülmektedir. Temas mesafeleri çok küçük olan bu tarz makine sistemlerinde yüzeylerde Hertz basınçları oluşmaktadır. Yüzeyin hemen altında bu basınç nedeni ile kayma gerilmeleri oluşmakta ve bu gerilmelerin en yüksek olduğu noktada plastic deformasyon meydana gelmektedir. Bu deformasyon yüzeye ilerleyerek çukurcuklar oluşturur (K. Kato, et al., 2001).



Şekil 3.14. Yorulma aşınması.

3.2.3.4. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınmasının oluşma nedeni aşınan yüzeylerin, aynı zamanda korozif etkilere maruz kalmasıdır. Bu tür aşınma kendi başına meydana gelebileceği gibi diğer aşınma türleri ile de meydana gelebilir. Birbirleri ile temas halinde bulunan yüzeylerde görülen, yüzey filmi tarafınca açılan kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasını önlemektedir. Ama oluşan yüzey filmi hassas ve arayüzey bağı zayıf ise sürtünme sırasında filmler çatlayarak yüzeyden ayrılır ve aşınma hızı artar (K. Kato, et al., 2001).

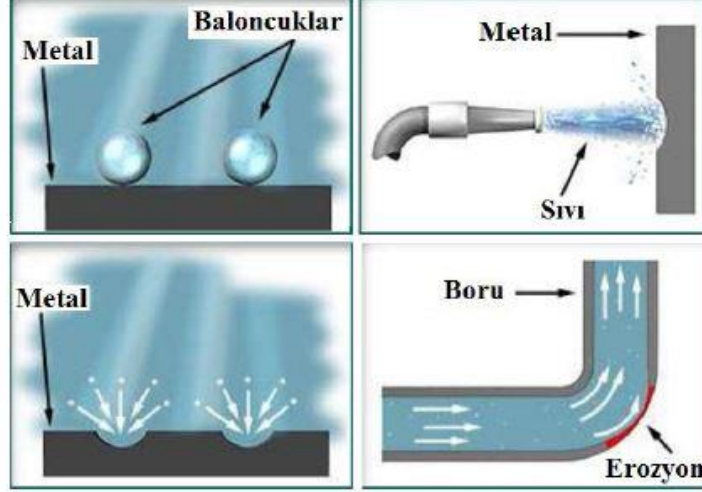


Şekil 3.15. Korozyon aşınması.

3.2.3.5. Erozyon Aşınması

Akışkan içinde bulunan aşındırıcı parçacıkların yüksek hızla hareket eden sıvı damlacıkları ve yüksek hızdaki gaz kabarcıkları tarafınca açılmasıyla oluşan aşınmaya

erozyon aşınması denir. Sıvılar ve gazların akış esnasında temasda bulunduğu parça yüzeyine çarpması ile yüzeyden kopardıkları partiküller ve girdap etkisiyle meydana getirdiği dalgali yüzey aşınmayı daha da hızlandırır (K. Kato, et al., 2001, T. Yıldız, et al.,2006).



Şekil 3.16. Erozyon aşınması türleri.

3.2.4. Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri

3.2.4.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ağırlık farkı yöntemi aşınma ölçüm yönteminde en ekonomik yöntemdir. Sonucun doğruluğunun yüksek olması nedeniyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybı genellikle 10^{-3} veya 10^{-4} hassasiyete sahip terazi ile ölçülmektedir. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinden karşılık gelen sürtünme mesafesi gr/km veya mgr/km olarak; birim alan ile hesaplanıyorsa gr/cm^2 olarak ifade edilir. Aşınma miktarının hacme göre hesaplanması gerektiğinde malzemenin yoğunluğu ve numuneye uygulanan yük dikkate alınarak birim yol ve birim yük ağırlığına karşılık gelen hacim kaybı kullanılarak ağırlık kaybı belirlenebilir. Spesifik aşınma miktarı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir (M. Karabaşoğlu (2008)).

$$W_s = \frac{\Delta m}{dFnS} = \frac{\Delta v}{FnS}$$

W_s = Özgül aşınma miktarı

d= yoğunluk

Δm = Ağırlık kaybı

F_n = Uygulanan normal kuvvet

S= Aşınma mesafesi

3.2.4.2. Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde, aşınmanın neden olduğu boyutsal değişim ölçülerek ve başlangıç değeri ile karşılaştırılarak aşınma miktarı belirlenir elde edilen kalınlık farkı değeri kullanılarak acim kaybı değeri bulunabilir, böylece birim hacim başına düşen aşınma miktarı bulunur. Bu yöntemde, hassas bir kalınlık ölçer kullanmak (1 μ hassasiyet) ölçüm doğruluğunu artırmak için oldukça önemlidir (M. Karabaşoğlu (2008).

3.2.4.3. İz Değişim Metodu

Bu yöntemde aşınmış üzey üzerinde belirli bir geometric yörünge oluşturmak için plastic deformasyon kullanılır. Brinell sertliği veya Vickers sertlik ölçüm kafası yörüngeyi oluşturmak için kullanılır. Deney sırasında üretilen izlerin boyutundaki değişiklikler mikroskobik ölçümle değerlendirilir (M. Karabaşoğlu (2008).

BÖLÜM 4

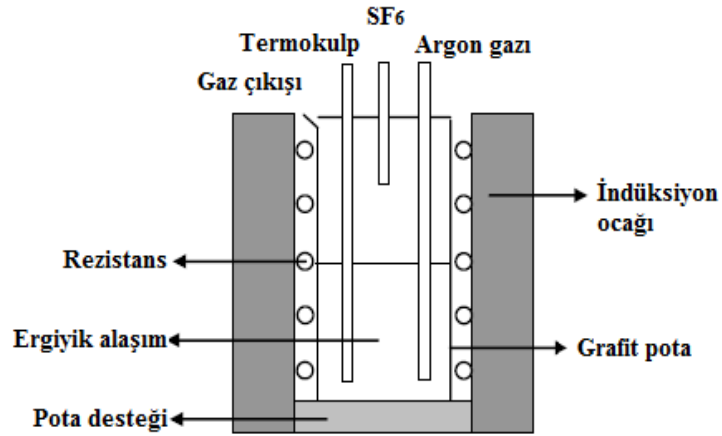
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, ZM21 magnezyum levha, farklı sıcaklık ve haddeleme oranlarında haddelenmesi ve aynı kalınlıklara indirilmesiyle elde edilmiştir. Üretilen levhaların mikroyapı, aşınma ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

4.1. ZM21 ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ VE HADDELENMESİ

4.1.1. ZM21 Magnezyum Alaşımı Dökümü

ZM21 alaşımı, Şekil 3.1’de görülen ve içerisinde seramik ve iç kısmı grafiten yapılmış potaya sahip indüksiyon ocağında döküm yöntemi ile atmosfer kontrollü şekilde ($\text{CO}_2 + \%0.8 \text{SF}_6$ gazı kullanarak) kalıplara dökülerek elde edilmiştir.



Şekil 4.1. İndüksiyon ocağı şeması.

ZM21 alaşımı üretiminde kullanmak üzere saf Mg, saf Zn ve Mg-%15 Mn içeren master alaşımı kullanılmıştır. Yaklaşık 750 °C döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra alaşımlama işlemi yapılmış ve karıştırma çubuğu yardımıyla yaklaşık 5 dk. boyunca homojen bir karışım için karıştırılmış daha sonrasında döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi paslanmaz çelikten yapılmış ve üzerinde yolluk sistemi olan Y biçimindeki kalıba (Şekil 4.2) CO₂+%0.8 SF₆ gazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ü. Özdemir, 2020).



(b)

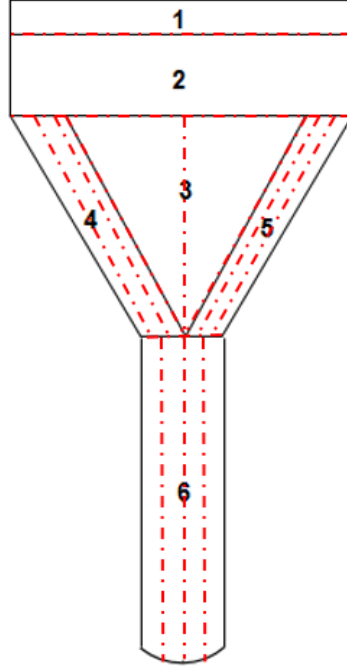
Şekil 4.2. (a) Dökümlerin yapıldığı indüksiyon ocağı, (b) Y şeklinde kalıba dökülmüş ZM21 magnezyum alaşımı.

4.1.2. ZM21 Magnezyum Alaşımının Homojenizasyonu ve Haddelenmesi

Döküm sonrası numuneler ince silis kumu (SiO₂) ve yağlı grafit tozu içerisine gömülerek 16 saat boyunca 400°C’de homojenleştirme ısı işlemine maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler alüminyum folyaya sarılı halde çıkartılarak su içerisinde soğutulmuştur. Son olarak hadde öncesi istenilen kalınlıklara ulaşıncaya kadar numune hazırlama işlemine tabi tutulmuştur.

Y şeklindeki kalıptan çıkartılan ZM21 magnezyum alaşımının yolluk, besleyici ve havayla temas edilen çekinti boşlukları kesilerek hurdaya ayrılmıştır. Y blokta soğutma suyu olarak saf su kullanılan kesme işlemi uygulanan kısımlar Şekil 3.3’de

kırmızı kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Aşağıdaki şekilde Y bloktan uygun numune çıkarımı ve ebatları yer almaktadır.



Şekil 4.3. Y bloktan parça çıkarım şeması.

Çizelge 4.1. Y bloktan parça hazırlanma çizelgesi.

Hadde Sıcaklığı	Hadde Oranı	Y bloktan Alınan Bölge	Kaba Boyut	Hadde Öncesi İstenilen Boyut
275 °C	%40	5	20*38*128	3.3*37*115
	%80	5	15*44*128	10*43*58
325 °C	%40	5	20*38*128	3.3*37*115
	%80	5	15*44*128	10*43*58
375 °C	%40	5	20*38*128	3.3*37*115
	%80	5	15*44*128	10*43*58

Döküm sonrası Şekil 4.3.'de gösterilen Y bloktaki 1 ve 3 numaralı bölgeler hurdaya ayrılmıştır. 4 ve 5 numaralı bölgelerden döküm hali ve homojenizasyon sonrası işlemler için aşınma ve korozyon incelemeleri için uygun ebatta numuneler tel erozyon yöntemi ile çıkartılmıştır. Homojenizasyon işlemi gerçekleştirilern parçalardan %80

ve %40 haddelenecek numunelerin kalınlıkları freze yardımıyla sırasıyla 10,5 mm, 3,5 mm' ye indirilmiştir (Şekil 3.4).



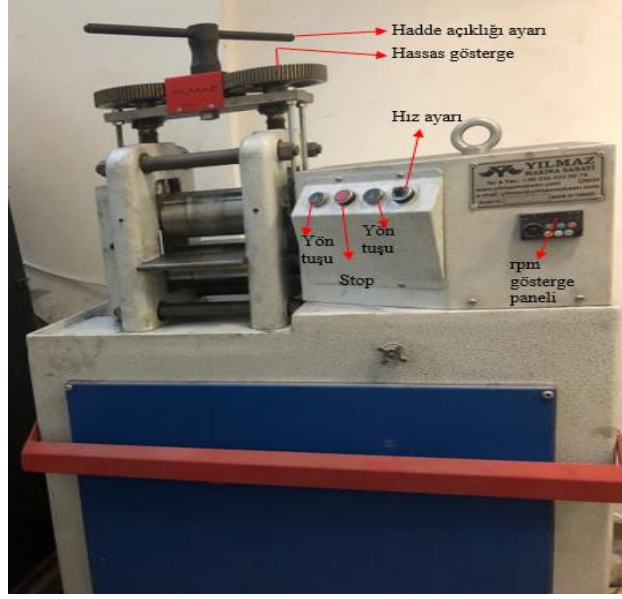
Şekil 4.4. Frezeleme işlemeine ait görüntü.

400-800-1200-2000 meshlik zımparalar kullanılarak haddeleme işlemini görecek tüm numuneler 10 mm ve 3,3 mm kalınlıklara indirilmiş ve aynı zamanda freze izleri de yok edilmiştir. Şekil 3.6'da hadde öncesi yüzey işleme tamamlanmış plakalar görülmektedir.



Şekil 4.5. Hadde öncesi yüzey işleme tamamlanmış plakalar.

Haddeleme işlemini Teknoloji Fakültesi laboratuvarlarında yer alan laboratuvar tipi hadde cihazında (Şekil 4.6.) gerçekleştirilmiş olup, hadde merdanelerindeki olası yağ ve hadde kalıntıları etanolla yıkanarak temizlenmiştir.



Şekil 4.6. Laboratuvar tipi hadde makinesi.

Hadde işlemi sırasında numunelere geçiş başına yaklaşık olarak $\phi = 0.2$ 'lik sabit bir deformasyon derecesi uygulanmıştır: $\phi = -\ln(h_{n+1} / h_n)$ burada h_n geçişten sonra numune kalınlığı, n ise hadde geçişinin sayısıdır. Çizelge 4.2'de haddeleme için uygulanan hadde açıklıkları yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Hadde açıklıkları çizelgesi.

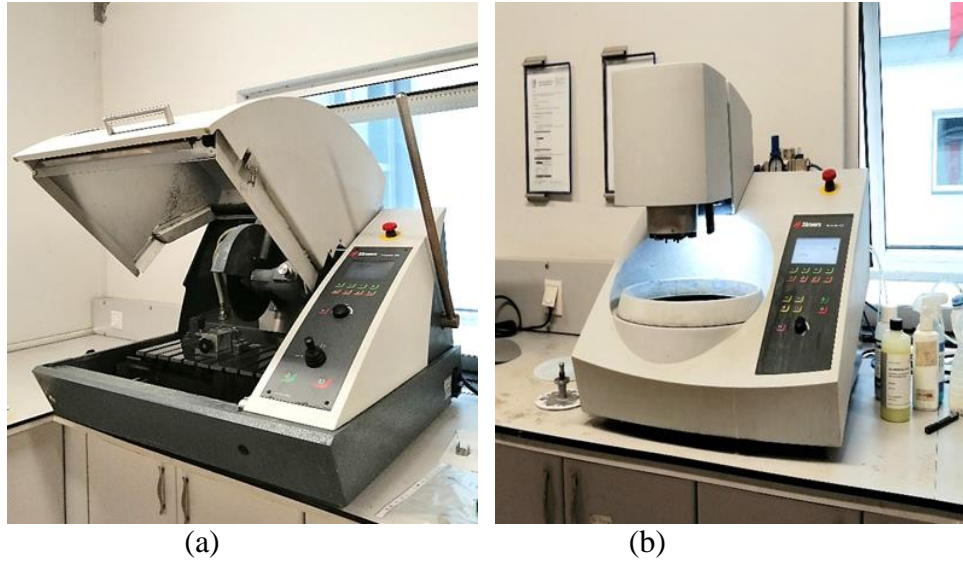
Paso sayısı	10 mm'den 2mm'ye (% 80 hadde oranı) inerken ki kalınlık (mm)	3,33 mm'den 2mm'ye (% 40 hadde oranı) inerken ki kalınlık (mm)
1	8,187	2,701
2	6,702	2,211
3	5,487	2
4	4,492	
5	3,677	
6	3,010	
7	2,464	
8	2	

Uygulanacak hadde devir hızı olarak 4,7 m/dk seçilip, bu değer rpm değerine eşdeğeri $v = w \times r$ formülünden çıkartılmıştır. Burada silindirin yarıçapı olan r değeri 55 mm olup dönme hızı yaklaşık 13.7 rpm olarak bulunmuştur. Haddeleme öncesi tüm

numuneler MAGMATHERM marka ve MT 1205-B2 tipi ısıtma fırınında 1 saat ilgili hadde sıcaklığında tutulmuştur. Her geçişten sonra, sonraki haddeleme geçişine başlamadan önce sıcaklık kaybını önlemek için numune 10 dk haddeleme sıcaklığına ısıtılmıştır.

4.2. HADDELEME SONRASI NUMUNE HAZIRLAMA

Metalografik işlemler için yaklaşık olarak 10x15mm boyutlarında olacak şekilde Şekil 4.7'de verilen diskatom yardımı ile kesilen numunelerin, mikro yapı inceleme öncesi tüm yüzeyleri 600, 800, 1200, 2000 Mesh ile zımparalanıp yüzey pürüzlükleri giderildikten sonra 1µ'luk alümina ile parlatılıp saf su ortamında 5 dakika süre ile ultrasonik olarak temizlenip ardından alkol ile durularak kurutulmuş ve deneylere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.7. (a) Numune kesme cihazı ve (b) Zımpara ve parlatma cihazı.

Optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleri alınmadan önce dağlama işlemine tabi tutulan magnezyum alaşımlarını dağlamak için; 6 gr pikrik asit, 10 ml su, 5 ml asetik asit ve 100 ml etanol karışımından oluşan pikrik asit solüsyonu kullanılmıştır. Alaşımlar haddeleme sıcaklıklarının yüksekliğine göre pikrik asit sıvısı içerisinde 3-10 sn. aralığında bekletilmiştir (Şekil 4.8).

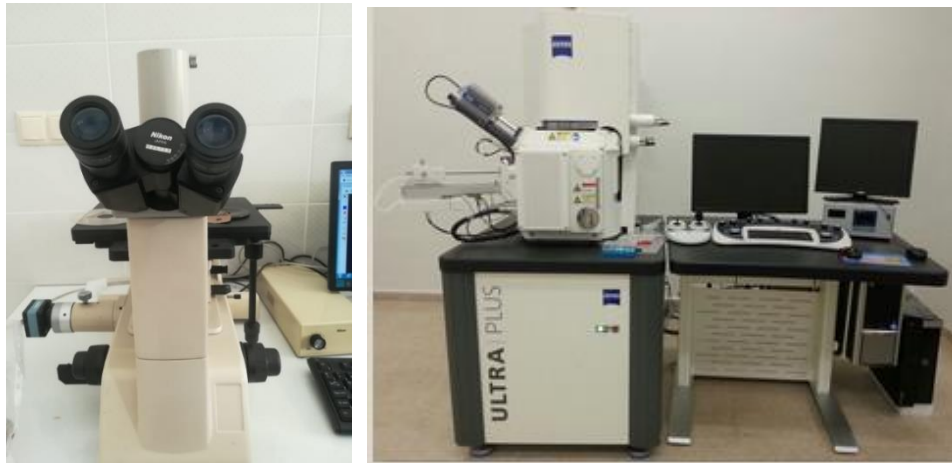


Şekil 4.8. Dağlama işlemine tabi tutulan numuneler.

Dağlama işlemi sonrası mikro yapı incelemesi için hazır olan her bir numunenin optik ışık mikroskobu cihazında aşınma ve korozyon deneyi öncesi yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ

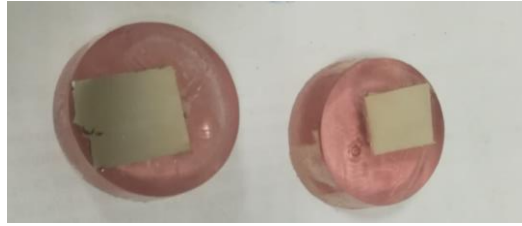
Mikro yapı incelemesi için hazır olan her bir numunenin Nikon Epiphot marka optik ışık mikroskobu cihazında aşınma ve korozyon deneyi öncesi mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Görüntü alma işlemi sırasında Şekil 3.9’da verilen optik mikroskop cihazı kullanılmıştır. Korozyon ve aşınma testlerine tabi tutulan numunelerin Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka Sem görüntü analizi cihazı ile görüntüleri alınmıştır.



Şekil 4.9. (a) Optik ışık mikroskobu, (b) Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

4.4. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DENEYLERİ

Korozyon deneyleri için 16 x 11 mm ölçülerinde olan numuneler epoksi reçine ile soğuk bakalite alındıktan sonra yüzeyleri 600, 800, 1000, 1200 Mesh zımpara ile saf su kullanılarak zımparalandıktan sonra 1µ'luk alümina kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi sonrası yüzeyindeki alümina izlerinin giderilmesi için saf su ve alkol ile temizlenip kurutulmuştur. Parlatma sonrası numuneler potansiyodinamik polarizasyon deneyi için hazır hale gelmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 4.10. Elektrokimyasal deneylerde kullanılan numuneler.

Deney sırasında elektrolit olarak yapay vücut sıvısı (c-SBF) kullanılmış olup solüsyon vücut sıcaklığı olan 37 °C kalabilmesi için beher sıcaklık kontrollü bir ısıtıcı üzerine yerleştirilmiştir. Yapay vücut sıvısının bileşenleri çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yapay vücut sıvısı bileşenleri.

Kimyasal	Konsantrasyon (g/L)
NaCl	8,036
NaHCO ₃	0,352
KCl	0,225
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0,230
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0,311
1,0 M HCl	40 (mL)
CaCl ₂	0,293
Na ₂ SO ₄	0,072
TRIS [*]	6,063

Korozyon deneylerinde çalışma elektrodu olarak 0,196 mm² yüzey alanına sahip numune, karşıt elektrot olarak grafit çubuk ve referans elektrot olarak ise gümüş / gümüş klorür (Ag/AgCl)'den oluşan standart üç elektrot sistemi kullanılmıştır. Potansiyodinamik korozyon deneyleri, Parstat 4000 model, potansiyostat galvanostat cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11). Çalışma elektrodu ile karbon

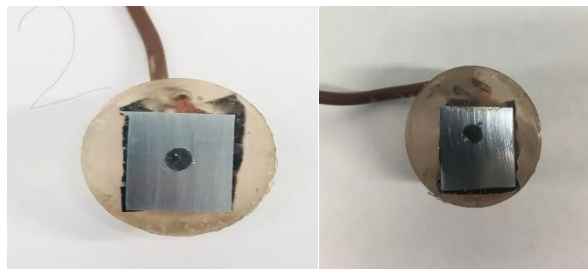
elektrot yüzeyleri karşılıklı gelecek şekilde belirli uzaklıkta, referans elektrod ise çalışma elektroduna olabildiğince yakın yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında, çalışma ve referans elektrotları arasındaki korozyon potansiyelindeki (mV cinsinden) değişiklik, elektrolite daldırıldıktan sonraki ilk 30 dakika boyunca zaman içinde ölçülmüştür. Her bir alaşım grubu için tüm deneyler, polarizasyon eğrileri karşılıklı olarak teyit edilene ve sonuçların daha güvenilir hale getirilmesine çalışılana kadar en az iki kez tekrarlanmıştır.



Şekil 4.11. Elektrokimyasal korozyon test cihazı.

Korozyon testi sonunda her bir numunenin korozyona uğramış yüzeylerinin görüntüleri SEM ile alınıp, korozyon mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir. Polarizasyon eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon hızı (CR) hesaplanmıştır (Shi et al., 2010).

$$\text{Korozyon hızı CR} = 22,85 \times I_{corr} \quad (4.1)$$



Şekil 4.12. Korozyon deneyi sonrası test numuneleri.

4.5. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ

ZM21 Magnezyum alaşımlarının aşınma deneyleri korozif ve kuru olmak üzere iki farklı ortamda Şekil 3.13.'de gösterilen UTS Tribometer T10 test cihazı kullanılarak ASTM G133 standartına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 8N ve 16N yükler altında, 4 mm/s kayma hızında ve toplam kayma mesafesi 10 m olarak uygulanmıştır.



Şekil 4.13. Aşınma test cihazı.

Aşınma sonuçları aşınma hızı ölçümlerine göre değerlendirilmiş olup aşınma deneylerinin sonrasında numunelerin aşınma yüzeyleri ve bilya yüzeyleri optik mikroskop ve masaüstü dijital mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Aşınma testi sonrası alaşımların aşınma hızları;

Hacim kaybı = aşınma yüzey alanı x strok

strok = 3mm

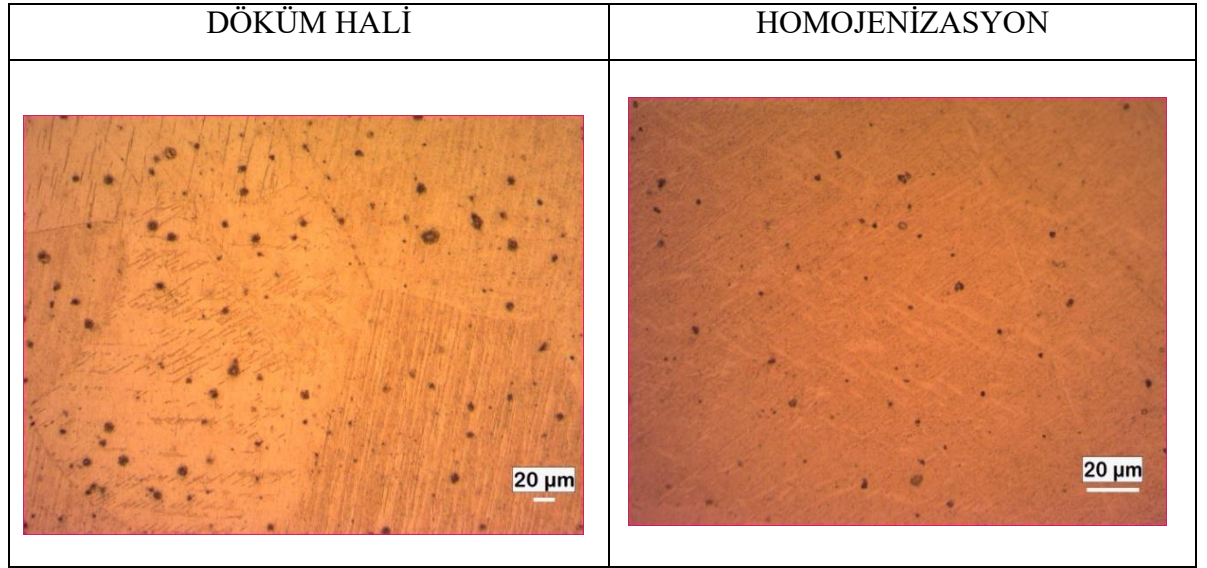
Aşınma hızı = Hacim kaybı / yol formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

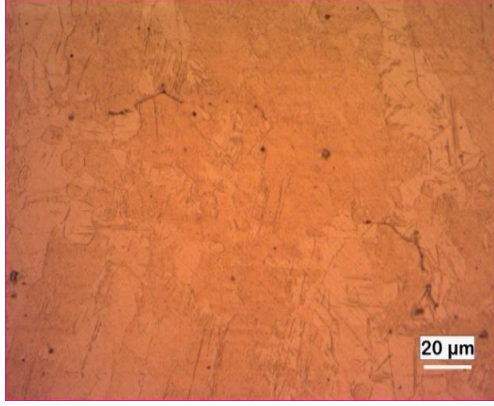
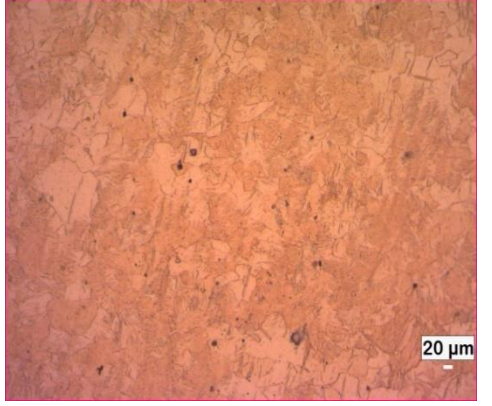
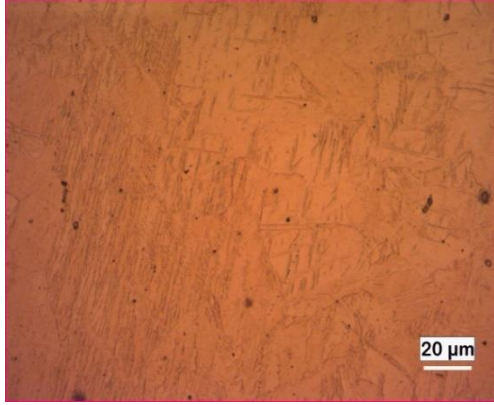
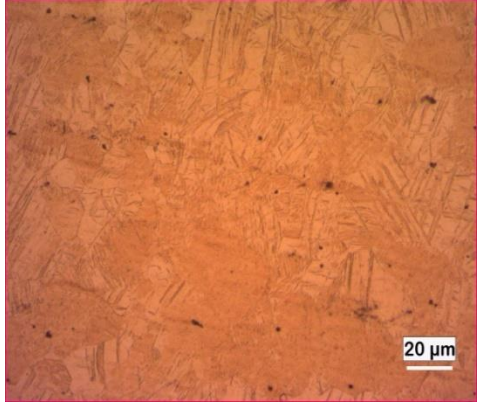
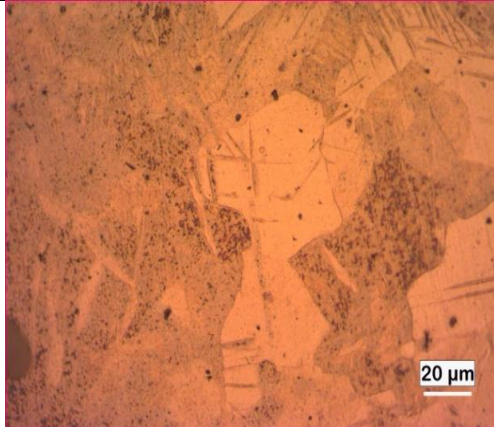
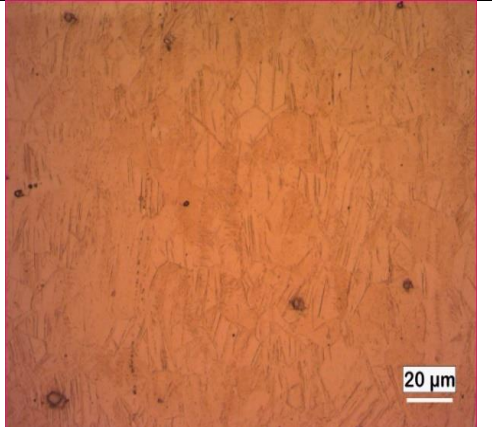
5.1. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCESİ VE SONRASI OPTİK MİKROSKOP MİKROYAPI GÖRÜNTÜ SONUÇLARI

Şekil 5.1’de ZM21 alaşımına ait döküm hali ve homojenizasyon sonrası mikroyapı, Şekil 5.2’de ise farklı sıcaklık ve hadde oranlarına ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.1. ZM21 alaşımının döküm hali ve homojenizasyon sonrası mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi döküm hali numunesinde tane sınırları daha belirgin ve tane boyutları daha iridir. Buna karşın homojenizasyon numunesinde taneler daha belirgin fakat incedir.

SICAKLIK	%40 Hadde	%80 Hadde
275 °C		
325 °C		
375 °C		

Şekil 5.2. Farklı sıcaklık ve farklı hadde oranlarında numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 5.2’de sıcaklık ve hadde değerleri verilen numunelerde haddeleme oranlarına göre 275°C’de %80 hadde numunesinde %40 hadde numunesine göre tane yapıları

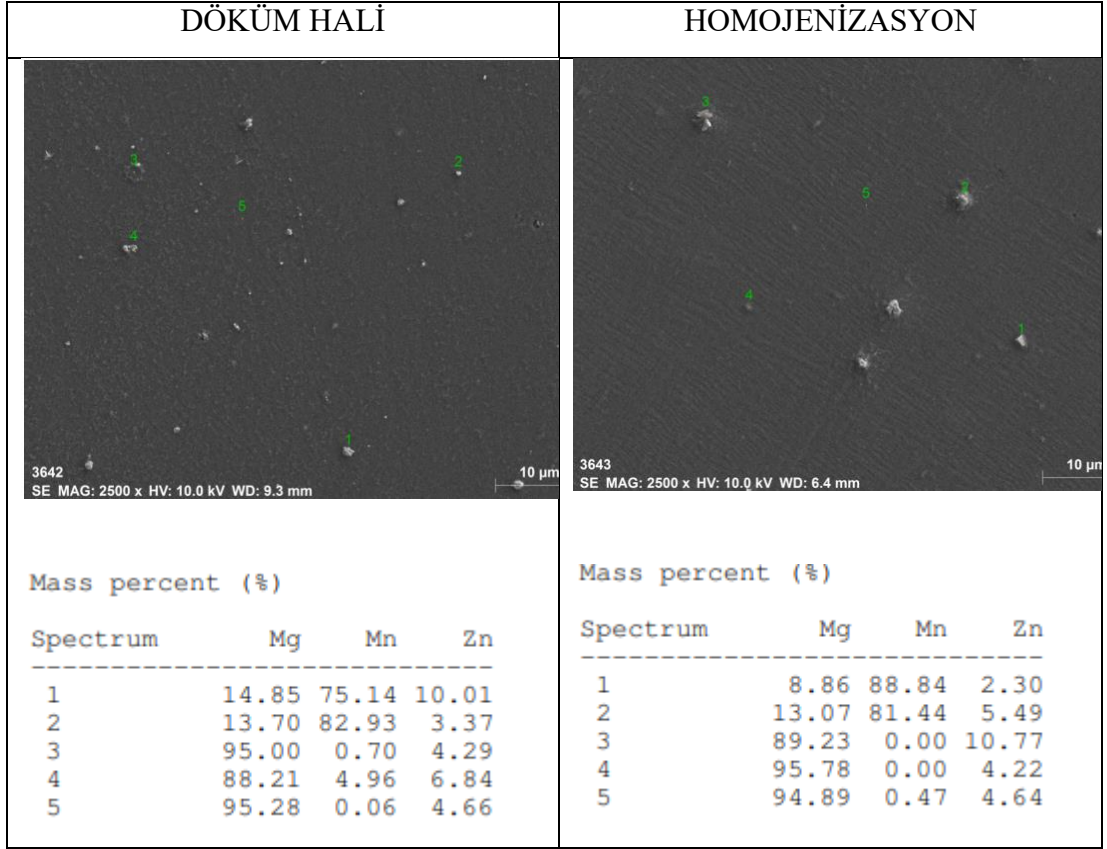
daha belirgin hale gelmiştir. 325⁰C sıcaklıktaki numunede %40 haddede tane yapıları daha ince iken %80 haddede tane sınırları daha belirgin ve tane yapılarında irileşme görülmektedir.

375C sıcaklıkta %40 haddede daha iri taneler görülürken %80 hadde ile tane boyutlarında küçülme ile birlikte tane sınırlarında ki belirginliğin yerini koruduğu görülmektedir.

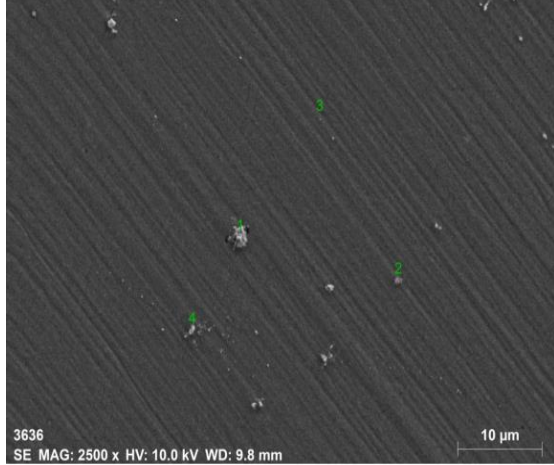
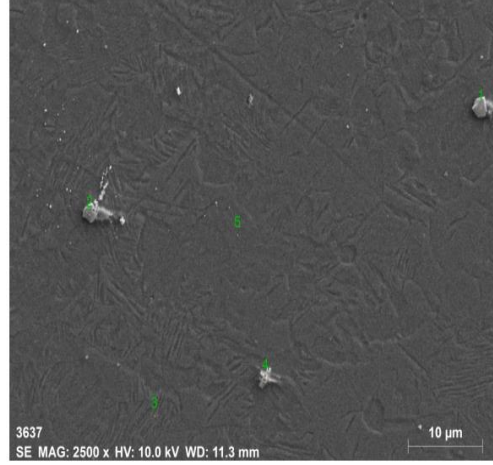
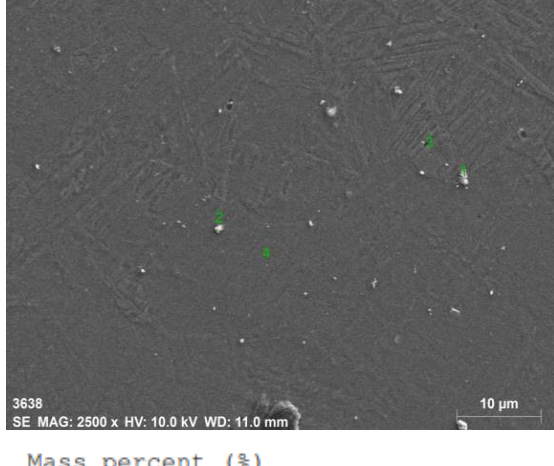
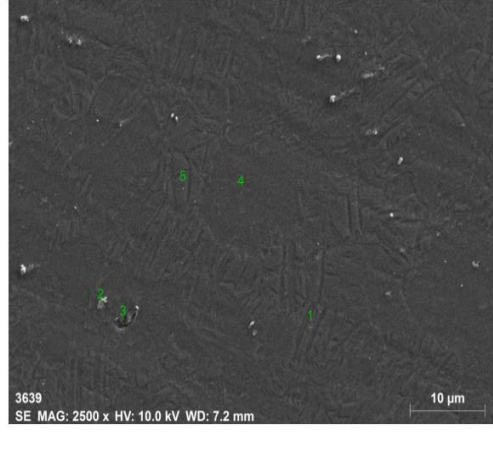
Hadde numunelerinde sıcaklık değerleri arttıkça döküm hali ve homojenizasyon numunelerine kıyasla taneler belirginliğini korumaktadır, bununla birlikte yapılan literatür araştırmalarında da Mg-Mn-Zn alaşımlarının hadde ve sıcaklık oranı arttıkça tane sayılarında artış ve tane yapılarında ki incelmeye etkisi olduğu gözlemlenmektedir (H. Ahmet Gören, vd, 2021).

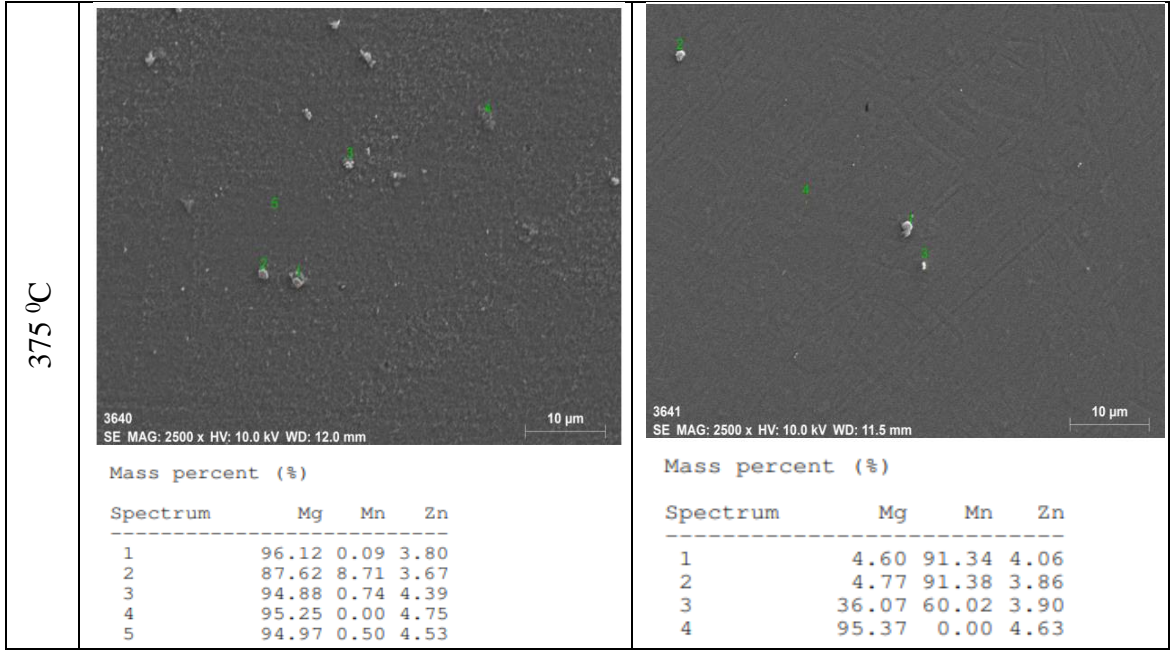
5.2. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ HADDELEME ÖNCE VE SONRASI SEM ANALİZ SONUÇLARI

Şekil 5.3’de ZM21 alaşımına ait döküm hali ve homojenizasyon sonrası SEM görüntüleri, Şekilde 5.4’de ise farklı sıcaklık ve hadde oranlarına ait mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.3. Döküm halı ve homojenizasyon numunelerinin SEM analiz sonuçları.

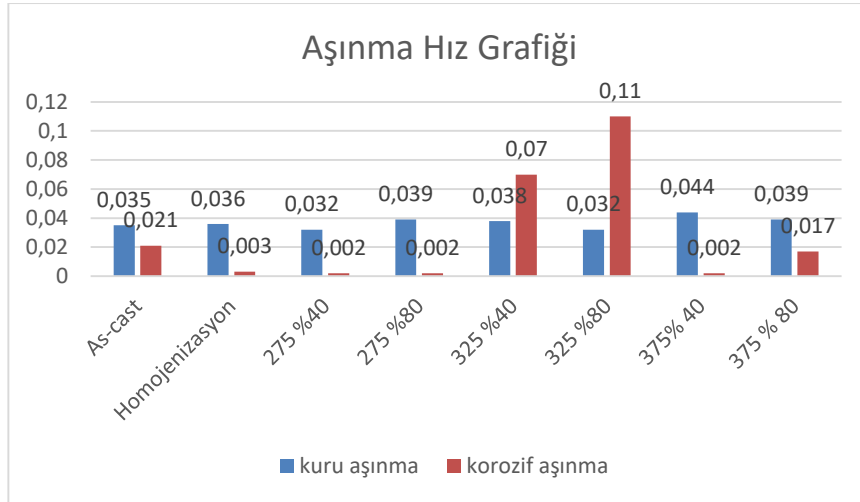
SICAKLIK	%40 Hadde	%80 Hadde																																																
275 °C	 <p>3636 SE MAG: 2500 x HV: 10.0 kV WD: 9.8 mm</p> <p>10 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>8.86</td><td>88.84</td><td>2.30</td></tr> <tr><td>2</td><td>13.07</td><td>81.44</td><td>5.49</td></tr> <tr><td>3</td><td>89.23</td><td>0.00</td><td>10.77</td></tr> <tr><td>4</td><td>95.78</td><td>0.00</td><td>4.22</td></tr> <tr><td>5</td><td>94.89</td><td>0.47</td><td>4.64</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	8.86	88.84	2.30	2	13.07	81.44	5.49	3	89.23	0.00	10.77	4	95.78	0.00	4.22	5	94.89	0.47	4.64	 <p>3637 SE MAG: 2500 x HV: 10.0 kV WD: 11.3 mm</p> <p>10 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1.69</td><td>97.70</td><td>0.61</td></tr> <tr><td>2</td><td>11.01</td><td>88.58</td><td>0.41</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.39</td><td>0.05</td><td>4.56</td></tr> <tr><td>4</td><td>88.21</td><td>7.99</td><td>3.79</td></tr> <tr><td>5</td><td>94.82</td><td>0.32</td><td>4.86</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	1.69	97.70	0.61	2	11.01	88.58	0.41	3	95.39	0.05	4.56	4	88.21	7.99	3.79	5	94.82	0.32	4.86
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																															
1	8.86	88.84	2.30																																															
2	13.07	81.44	5.49																																															
3	89.23	0.00	10.77																																															
4	95.78	0.00	4.22																																															
5	94.89	0.47	4.64																																															
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																															
1	1.69	97.70	0.61																																															
2	11.01	88.58	0.41																																															
3	95.39	0.05	4.56																																															
4	88.21	7.99	3.79																																															
5	94.82	0.32	4.86																																															
325 °C	 <p>3638 SE MAG: 2500 x HV: 10.0 kV WD: 11.0 mm</p> <p>10 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>16.14</td><td>81.58</td><td>2.28</td></tr> <tr><td>2</td><td>16.18</td><td>81.06</td><td>2.76</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.21</td><td>0.08</td><td>4.71</td></tr> <tr><td>4</td><td>94.77</td><td>0.46</td><td>4.78</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	16.14	81.58	2.28	2	16.18	81.06	2.76	3	95.21	0.08	4.71	4	94.77	0.46	4.78	 <p>3639 SE MAG: 2500 x HV: 10.0 kV WD: 7.2 mm</p> <p>10 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>95.32</td><td>0.00</td><td>4.68</td></tr> <tr><td>2</td><td>96.14</td><td>0.00</td><td>3.86</td></tr> <tr><td>3</td><td>94.88</td><td>0.57</td><td>4.55</td></tr> <tr><td>4</td><td>95.36</td><td>0.00</td><td>4.64</td></tr> <tr><td>5</td><td>94.95</td><td>0.42</td><td>4.63</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	95.32	0.00	4.68	2	96.14	0.00	3.86	3	94.88	0.57	4.55	4	95.36	0.00	4.64	5	94.95	0.42	4.63				
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																															
1	16.14	81.58	2.28																																															
2	16.18	81.06	2.76																																															
3	95.21	0.08	4.71																																															
4	94.77	0.46	4.78																																															
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																															
1	95.32	0.00	4.68																																															
2	96.14	0.00	3.86																																															
3	94.88	0.57	4.55																																															
4	95.36	0.00	4.64																																															
5	94.95	0.42	4.63																																															



Şekil 5.4. Sıcaklık ve Hadde değerleri verilen numunelerin SEM grafik analiz sonuçları.

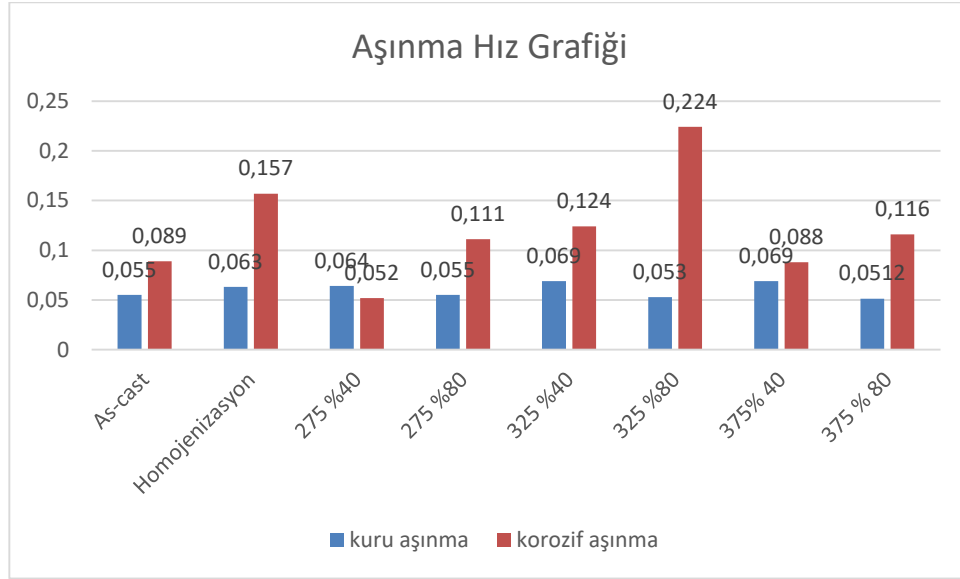
5.3. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ SONRASI GRAFİK SONUÇLARI

Numunelerin farklı ortamlarda (kuru ve korozif) 8N ve 16N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen aşınma hızı grafikleri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.5. Kuru ve korozif ortamda 8N yük altında elde edilen aşınma hız grafikleri.

8N yük altında kuru ortamda hadde ve sıcaklık oranı arttıkça aşınma hızındaki artış düşük oranda seyir ederken, korozif ortamda aşınma hızlarında haddeye bağlı olarak değişkenlik gözlemlenmiştir. Korozif ortamda döküm hali numunesi haddelenmiş numunelere oranla daha yüksek aşınma hızına sahip olurken, en yüksek artış 325 °C sıcaklık %80 hadde numunesinde gözlenmiştir.

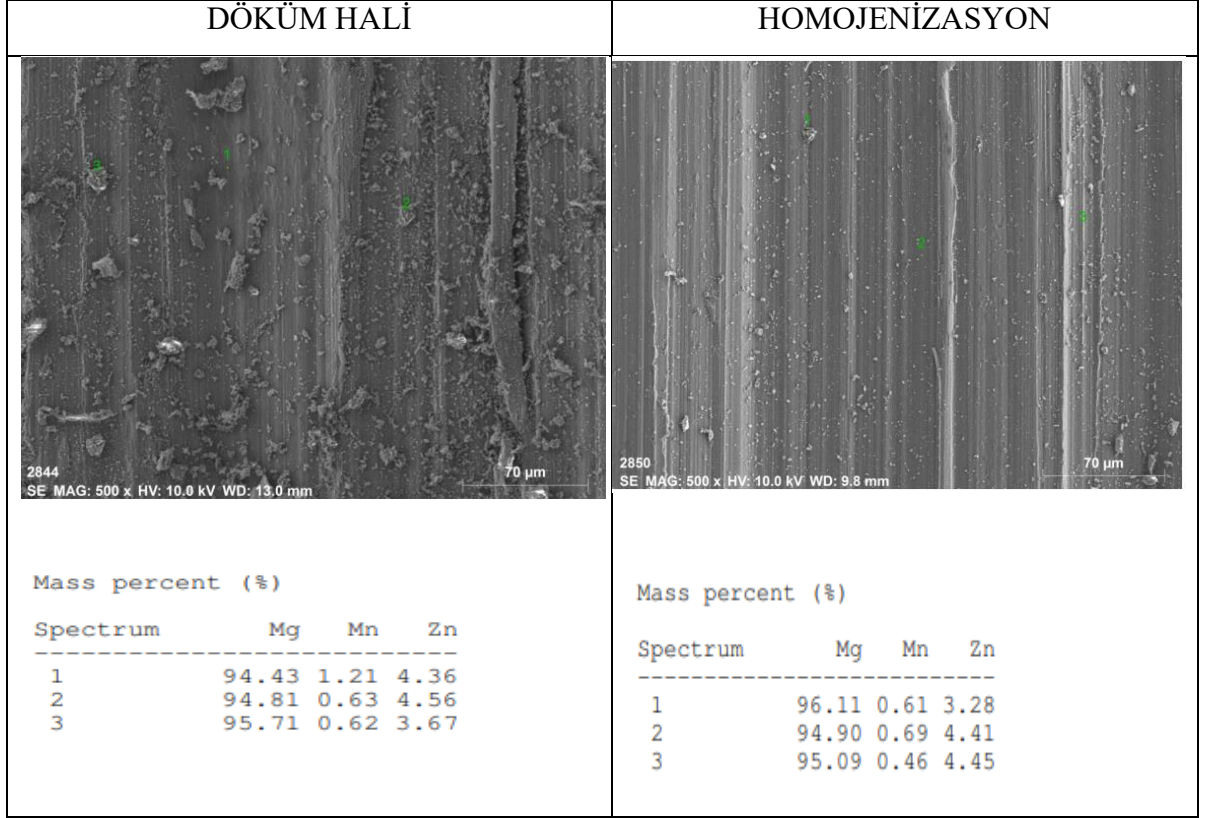


Şekil 5.6. Kuru ve korozif ortamda 16N yük altında elde edilen aşınma hız grafikleri.

16 N yük altında aşınma testine tabi tutulan numunelerde kuru ortamda gerçekleşen aşınma testine kıyasla korozif ortamdaki aşınma hızlarında gözle görülür şekilde artış yaşanmıştır, korozif ortam kuru ortama göre daha agresif olduğundan aşınma hızında artış görülür. En yüksek artış yine 325°C %80 hadde numunesinde görülürken homojenizasyon numunesi döküm hali ve diğer hadde numunelerine oranla yüksek aşınma hızı artışına sahiptir.

5.4. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA TESTİ SONRASI SEM GÖRÜNTÜ SONUÇLARI

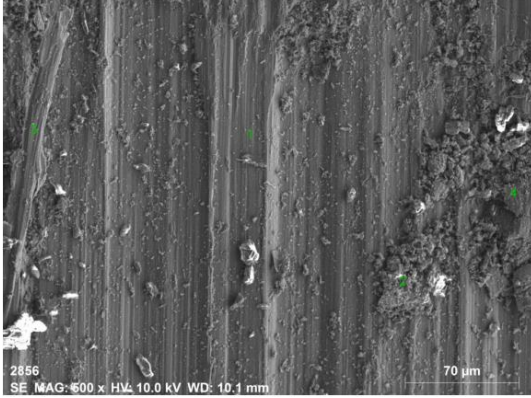
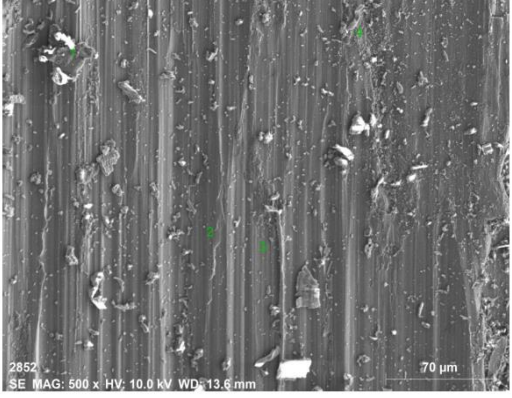
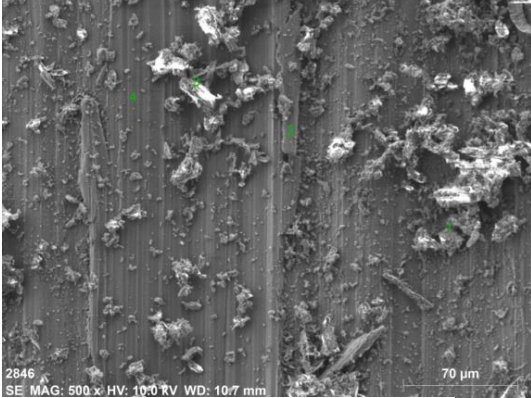
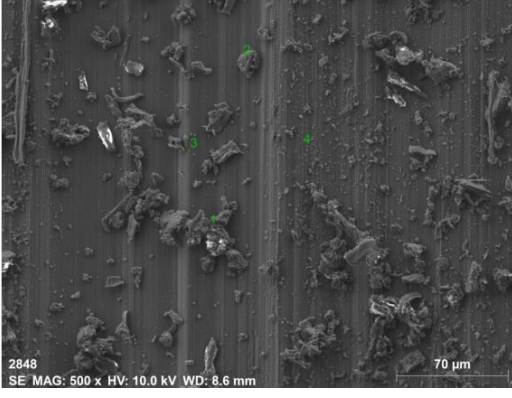
Şekil 5.7’de döküm ve homojenleştirilmiş ZM21 alaşımına ait kuru ortamda 16N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonrası elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir

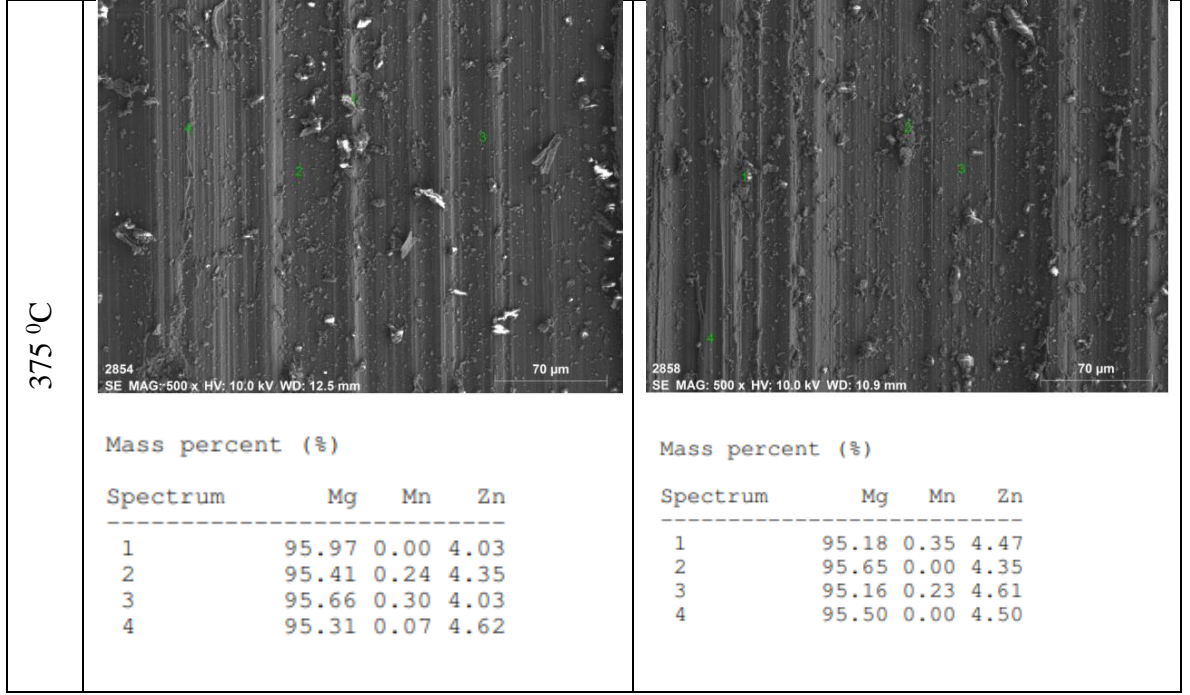


Şekil 5.7. Kuru ortamda döküm ve homojenizasyon numunelerinin SEM görüntü analizleri.

Şekil 5.7’ de görüldüğü gibi her iki numunede de çok fazla olmamakla birlikte yer yer beyaz renkte oksitler içermektedir. Homojenizasyon numunesinde döküm numunesine göre çizik izleri daha ince ve doğrusal bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir.

Şekilde 5.8’de farklı sıcaklık ve hadde oranlarında ZM21 alaşımına ait kuru ortamda 16N yük altında gerçekleştirilen aşınma deney sonrası elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir.

SICAKLIK	%40 Hadde	%80 Hadde																																								
275 °C	 <p>2856 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 10.1 mm</p> <p>70 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>94.67</td><td>0.85</td><td>4.47</td></tr> <tr><td>2</td><td>95.51</td><td>0.87</td><td>3.62</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.50</td><td>0.00</td><td>4.50</td></tr> <tr><td>4</td><td>96.63</td><td>0.12</td><td>3.25</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	94.67	0.85	4.47	2	95.51	0.87	3.62	3	95.50	0.00	4.50	4	96.63	0.12	3.25	 <p>2852 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 13.6 mm</p> <p>70 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>97.87</td><td>0.22</td><td>1.91</td></tr> <tr><td>2</td><td>94.89</td><td>0.86</td><td>4.25</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.17</td><td>0.11</td><td>4.72</td></tr> <tr><td>4</td><td>94.71</td><td>0.43</td><td>4.86</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	97.87	0.22	1.91	2	94.89	0.86	4.25	3	95.17	0.11	4.72	4	94.71	0.43	4.86
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																							
1	94.67	0.85	4.47																																							
2	95.51	0.87	3.62																																							
3	95.50	0.00	4.50																																							
4	96.63	0.12	3.25																																							
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																							
1	97.87	0.22	1.91																																							
2	94.89	0.86	4.25																																							
3	95.17	0.11	4.72																																							
4	94.71	0.43	4.86																																							
325 °C	 <p>2846 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 10.7 mm</p> <p>70 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>96.11</td><td>1.32</td><td>2.57</td></tr> <tr><td>2</td><td>95.69</td><td>0.00</td><td>4.31</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.62</td><td>1.25</td><td>3.13</td></tr> <tr><td>4</td><td>94.91</td><td>0.57</td><td>4.52</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	96.11	1.32	2.57	2	95.69	0.00	4.31	3	95.62	1.25	3.13	4	94.91	0.57	4.52	 <p>2848 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 8.6 mm</p> <p>70 µm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>95.25</td><td>4.75</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>2</td><td>95.51</td><td>0.85</td><td>3.64</td></tr> <tr><td>3</td><td>95.11</td><td>0.48</td><td>4.42</td></tr> <tr><td>4</td><td>95.63</td><td>0.34</td><td>4.03</td></tr> </tbody> </table>	Spectrum	Mg	Mn	Zn	1	95.25	4.75	0.00	2	95.51	0.85	3.64	3	95.11	0.48	4.42	4	95.63	0.34	4.03
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																							
1	96.11	1.32	2.57																																							
2	95.69	0.00	4.31																																							
3	95.62	1.25	3.13																																							
4	94.91	0.57	4.52																																							
Spectrum	Mg	Mn	Zn																																							
1	95.25	4.75	0.00																																							
2	95.51	0.85	3.64																																							
3	95.11	0.48	4.42																																							
4	95.63	0.34	4.03																																							



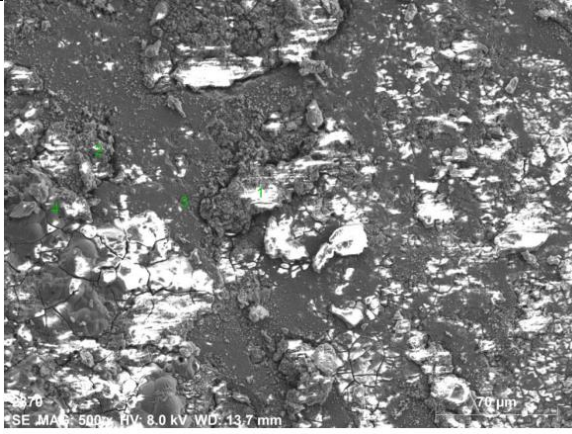
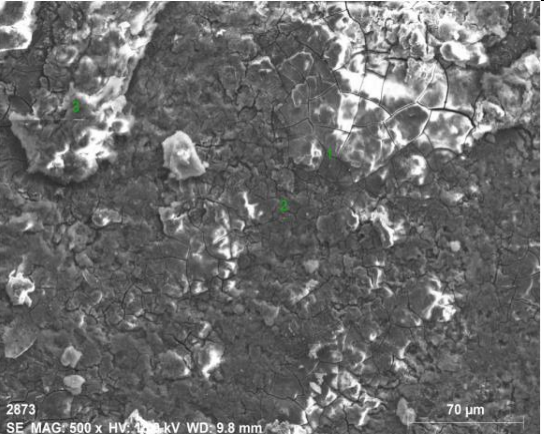
Şekil 5.8. Kuru ortamda; sıcaklık ve hadde değerleri verilen numunelerin SEM görüntü analizleri.

Şekil 5.8’da verilen Hadde numunelerinde aşınma sonrası karakteristik özelliklerine bakılacak olursa; 275⁰C sıcaklıkta ki %40 hadde numunesinin Zn kütle yüzdesinin fazla olduğu 1 ve 3 bölgesinde ince yivler oluştuğu görülürken 2 ve 4 bölgelerinde daha çok çökelmiş yapılar görülmektedir. Aynı sıcaklıkta %80 hadde ile birlikte Mn kütle yüzdesi düşük oranda seyrederken Zn’nin yüksek olduğu bölgelerde aşınma sonrası doğrusal çizgilerin oluşması sağlanmıştır.

325⁰C sıcaklıkta her iki numunede de çökelmelerin ve yer yer oksit tabakaların oluştuğu görülmekte, bu oksitler en fazla %40 hadde numunesinde oluşmuştur. Yapılan literatür araştırmalarında da aşınma sırasında temas bölgesinde ki tekrarlanan yükün sürtünme ısısına neden olup oksit oluşumunu gerçekleştirmesinin rastlanılan bir durum olduğu görülmektedir [H.Zengin 2018].

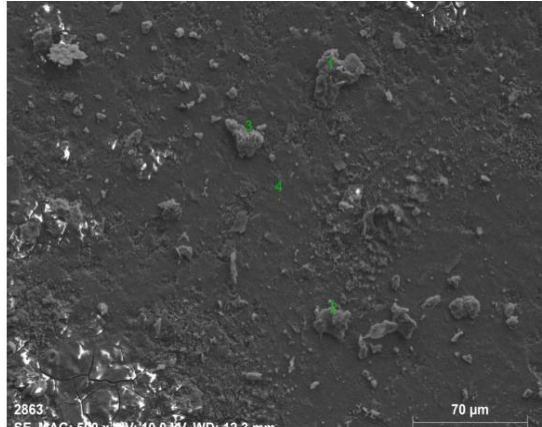
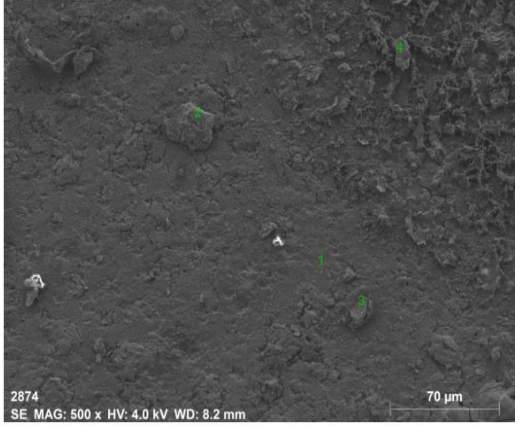
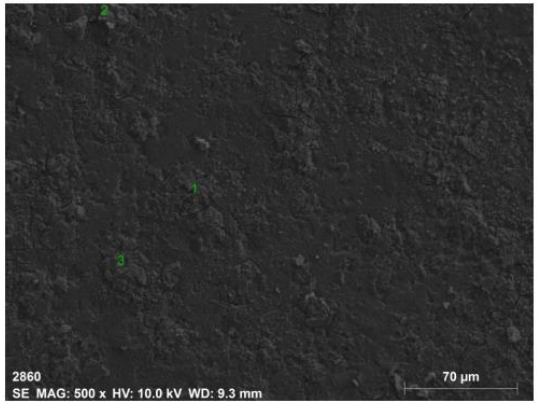
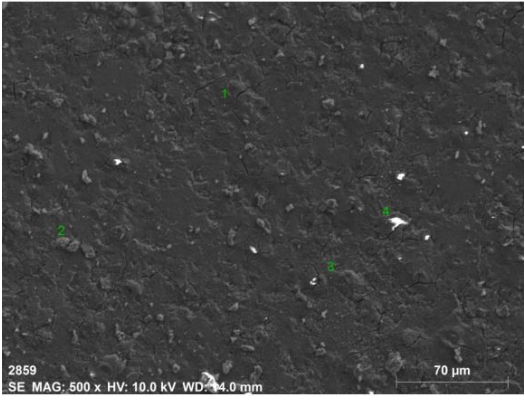
375⁰C sıcaklıkta her iki numunede kısmen benzer özellikler sergilediği görülse de %80 hadde numunesinde aşınma kayıplarının daha az ve çizgi izlerinin daha eşit dağıldığı gözlemlenmiştir.

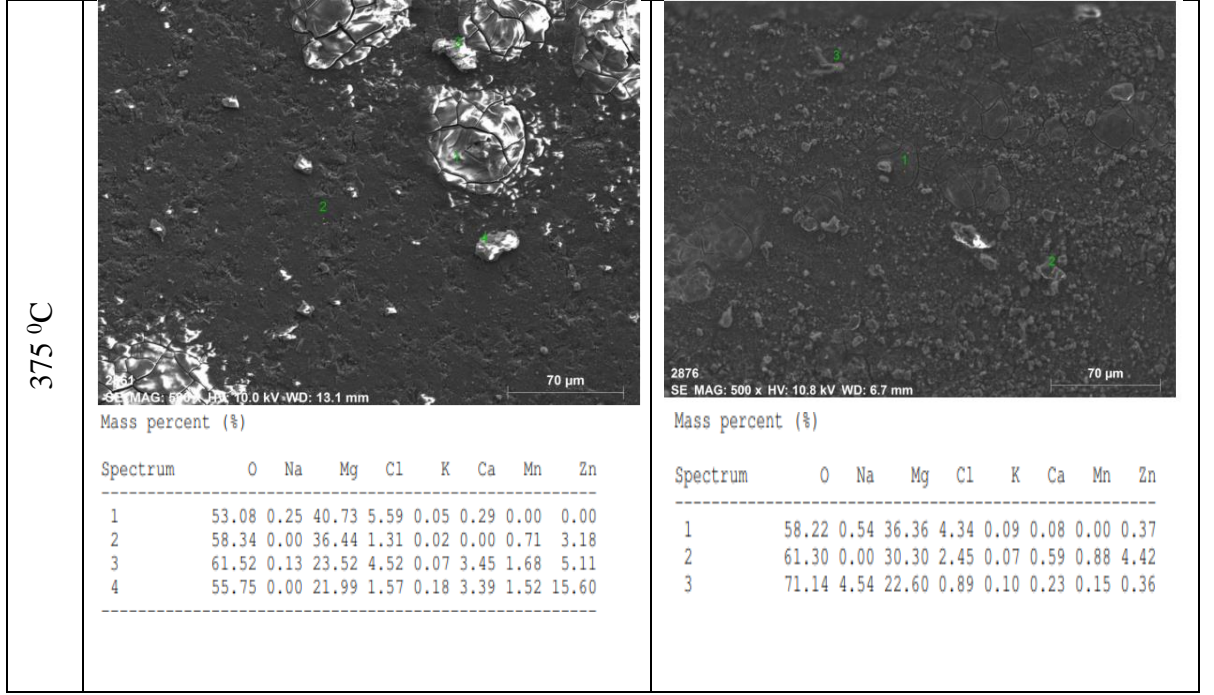
Şekil 4.9’da döküm ve homojenleştirilmiş ZM21 alaşımına ait korozif ortamda 16N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonrası elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir.

DÖKÜM HALİ		HOMOJENİZASYON																																																																																		
																																																																																				
<p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>61.67</td> <td>0.00</td> <td>28.32</td> <td>2.84</td> <td>0.11</td> <td>0.58</td> <td>0.00</td> <td>6.49</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>55.61</td> <td>0.00</td> <td>33.02</td> <td>5.78</td> <td>0.40</td> <td>0.26</td> <td>0.00</td> <td>4.92</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>63.37</td> <td>0.00</td> <td>30.61</td> <td>0.74</td> <td>0.14</td> <td>0.21</td> <td>0.00</td> <td>4.93</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>61.20</td> <td>0.29</td> <td>32.72</td> <td>4.26</td> <td>0.07</td> <td>0.10</td> <td>0.00</td> <td>1.36</td> </tr> </tbody> </table>		Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn	1	61.67	0.00	28.32	2.84	0.11	0.58	0.00	6.49	2	55.61	0.00	33.02	5.78	0.40	0.26	0.00	4.92	3	63.37	0.00	30.61	0.74	0.14	0.21	0.00	4.93	4	61.20	0.29	32.72	4.26	0.07	0.10	0.00	1.36	<p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>61.79</td> <td>0.39</td> <td>36.50</td> <td>0.87</td> <td>0.02</td> <td>0.02</td> <td>0.00</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>62.21</td> <td>2.79</td> <td>30.05</td> <td>0.92</td> <td>0.00</td> <td>0.32</td> <td>1.62</td> <td>2.09</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>57.92</td> <td>0.00</td> <td>35.04</td> <td>2.09</td> <td>0.00</td> <td>0.54</td> <td>1.69</td> <td>2.72</td> </tr> </tbody> </table>		Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn	1	61.79	0.39	36.50	0.87	0.02	0.02	0.00	0.40	2	62.21	2.79	30.05	0.92	0.00	0.32	1.62	2.09	3	57.92	0.00	35.04	2.09	0.00	0.54	1.69	2.72
Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn																																																																												
1	61.67	0.00	28.32	2.84	0.11	0.58	0.00	6.49																																																																												
2	55.61	0.00	33.02	5.78	0.40	0.26	0.00	4.92																																																																												
3	63.37	0.00	30.61	0.74	0.14	0.21	0.00	4.93																																																																												
4	61.20	0.29	32.72	4.26	0.07	0.10	0.00	1.36																																																																												
Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn																																																																												
1	61.79	0.39	36.50	0.87	0.02	0.02	0.00	0.40																																																																												
2	62.21	2.79	30.05	0.92	0.00	0.32	1.62	2.09																																																																												
3	57.92	0.00	35.04	2.09	0.00	0.54	1.69	2.72																																																																												

Şekil 5.9. Korozif ortamda döküm ve homojenizasyon numunelerinin SEM görüntü analizleri.

Şekil 5.10'da farklı sıcaklık ve hadde oranlarında ZM21 alaşımına ait korozif ortamda 16N yük altında aşınma deneyi sonrası elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir.

SICAKLIK	%40 Hadde	%80 Hadde																																																																																										
275 °C	 <p>2863 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 12.3 mm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>51.99</td> <td>0.00</td> <td>31.98</td> <td>2.58</td> <td>0.00</td> <td>1.90</td> <td>2.65</td> <td>8.90</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>47.38</td> <td>0.00</td> <td>29.73</td> <td>3.48</td> <td>0.07</td> <td>4.59</td> <td>4.61</td> <td>10.14</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>54.44</td> <td>0.00</td> <td>31.39</td> <td>1.66</td> <td>0.02</td> <td>2.87</td> <td>2.79</td> <td>6.82</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>45.07</td> <td>0.00</td> <td>47.97</td> <td>1.62</td> <td>0.05</td> <td>0.06</td> <td>0.90</td> <td>4.33</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn	1	51.99	0.00	31.98	2.58	0.00	1.90	2.65	8.90	2	47.38	0.00	29.73	3.48	0.07	4.59	4.61	10.14	3	54.44	0.00	31.39	1.66	0.02	2.87	2.79	6.82	4	45.07	0.00	47.97	1.62	0.05	0.06	0.90	4.33	 <p>2874 SE MAG: 500 x HV: 4.0 kV WD: 8.2 mm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>18.25</td> <td>0.88</td> <td>4.28</td> <td>0.00</td> <td>55.00</td> <td>21.01</td> <td>0.00</td> <td>0.58</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>32.72</td> <td>0.24</td> <td>14.41</td> <td>0.00</td> <td>38.70</td> <td>13.12</td> <td>0.00</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>13.34</td> <td>0.00</td> <td>2.61</td> <td>0.39</td> <td>57.16</td> <td>24.21</td> <td>0.00</td> <td>2.28</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>8.79</td> <td>0.00</td> <td>1.37</td> <td>0.18</td> <td>58.92</td> <td>27.81</td> <td>0.43</td> <td>2.50</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn	1	18.25	0.88	4.28	0.00	55.00	21.01	0.00	0.58	2	32.72	0.24	14.41	0.00	38.70	13.12	0.00	0.80	3	13.34	0.00	2.61	0.39	57.16	24.21	0.00	2.28	4	8.79	0.00	1.37	0.18	58.92	27.81	0.43	2.50
Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn																																																																																				
1	51.99	0.00	31.98	2.58	0.00	1.90	2.65	8.90																																																																																				
2	47.38	0.00	29.73	3.48	0.07	4.59	4.61	10.14																																																																																				
3	54.44	0.00	31.39	1.66	0.02	2.87	2.79	6.82																																																																																				
4	45.07	0.00	47.97	1.62	0.05	0.06	0.90	4.33																																																																																				
Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn																																																																																				
1	18.25	0.88	4.28	0.00	55.00	21.01	0.00	0.58																																																																																				
2	32.72	0.24	14.41	0.00	38.70	13.12	0.00	0.80																																																																																				
3	13.34	0.00	2.61	0.39	57.16	24.21	0.00	2.28																																																																																				
4	8.79	0.00	1.37	0.18	58.92	27.81	0.43	2.50																																																																																				
325 °C	 <p>2860 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 9.3 mm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>57.01</td> <td>0.17</td> <td>38.46</td> <td>4.36</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>49.35</td> <td>0.00</td> <td>30.62</td> <td>3.37</td> <td>0.00</td> <td>5.11</td> <td>5.15</td> <td>6.39</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>57.77</td> <td>0.00</td> <td>36.01</td> <td>1.86</td> <td>0.02</td> <td>0.02</td> <td>0.43</td> <td>3.90</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn	1	57.01	0.17	38.46	4.36	0.00	0.00	0.00	0.00	2	49.35	0.00	30.62	3.37	0.00	5.11	5.15	6.39	3	57.77	0.00	36.01	1.86	0.02	0.02	0.43	3.90	 <p>2859 SE MAG: 500 x HV: 10.0 kV WD: 14.0 mm</p> <p>Mass percent (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Spectrum</th> <th>C</th> <th>O</th> <th>Na</th> <th>Mg</th> <th>Cl</th> <th>Mn</th> <th>Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6.30</td> <td>55.56</td> <td>0.07</td> <td>33.60</td> <td>1.99</td> <td>0.29</td> <td>2.19</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6.65</td> <td>61.77</td> <td>0.49</td> <td>28.96</td> <td>1.62</td> <td>0.05</td> <td>0.46</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4.64</td> <td>59.75</td> <td>0.42</td> <td>31.89</td> <td>2.87</td> <td>0.00</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4.77</td> <td>60.60</td> <td>0.00</td> <td>28.86</td> <td>1.24</td> <td>0.43</td> <td>4.11</td> </tr> </tbody> </table>	Spectrum	C	O	Na	Mg	Cl	Mn	Zn	1	6.30	55.56	0.07	33.60	1.99	0.29	2.19	2	6.65	61.77	0.49	28.96	1.62	0.05	0.46	3	4.64	59.75	0.42	31.89	2.87	0.00	0.43	4	4.77	60.60	0.00	28.86	1.24	0.43	4.11														
Spectrum	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Mn	Zn																																																																																				
1	57.01	0.17	38.46	4.36	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																				
2	49.35	0.00	30.62	3.37	0.00	5.11	5.15	6.39																																																																																				
3	57.77	0.00	36.01	1.86	0.02	0.02	0.43	3.90																																																																																				
Spectrum	C	O	Na	Mg	Cl	Mn	Zn																																																																																					
1	6.30	55.56	0.07	33.60	1.99	0.29	2.19																																																																																					
2	6.65	61.77	0.49	28.96	1.62	0.05	0.46																																																																																					
3	4.64	59.75	0.42	31.89	2.87	0.00	0.43																																																																																					
4	4.77	60.60	0.00	28.86	1.24	0.43	4.11																																																																																					

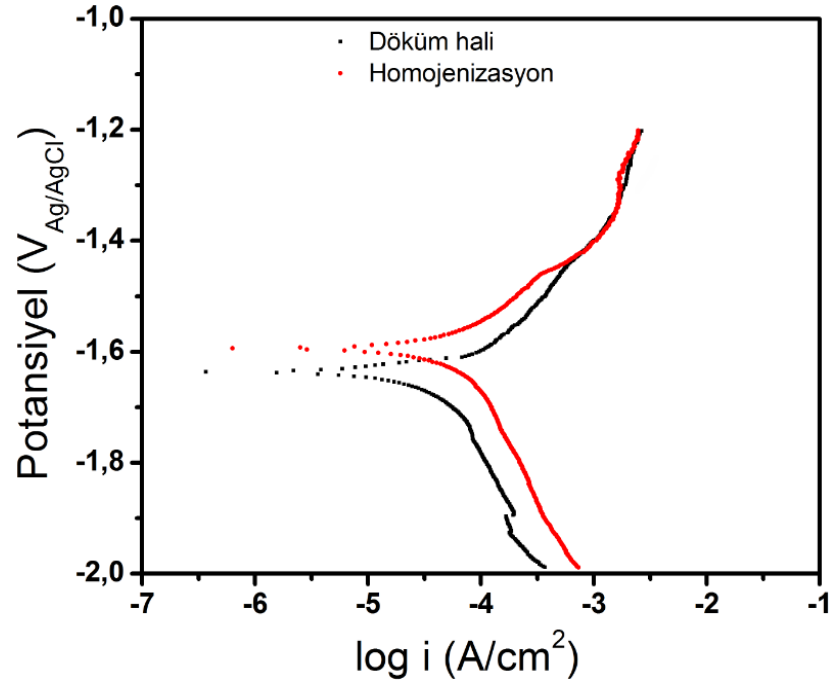


Şekil 5.10. Korozif ortamda; sıcaklık ve hadde değerleri verilen numunelerin SEM görüntü analizleri.

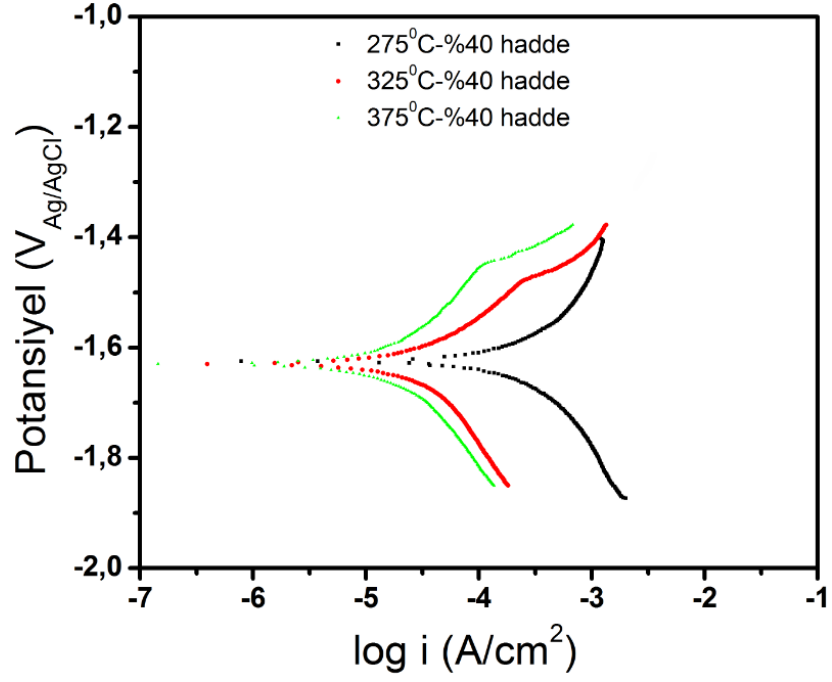
Şekil 5.9 ve 5.10'da verilen SEM görüntü analizlerine bakılacak olursa, korozif ortamda özellikle döküm halinde ki numunede alaşım kayıpları ve çökelmelerin fazla olduğu homojenizasyon numunesine kıyasla daha zayıf aşınma davranışı sergilediği gözlemlenmektedir. Korozif aşınma ortamında hadde numunelerine bakıldığında sıcaklık ve hadde artışıyla birlikte aşınmanın olumlu yönde etkilendiği, alaşım elementlerinde ki kayıpların daha az olduğu gözlemlenmiştir.

5.5. ZM21 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON TESTİ GRAFİK ANALİZ SONUÇLARI

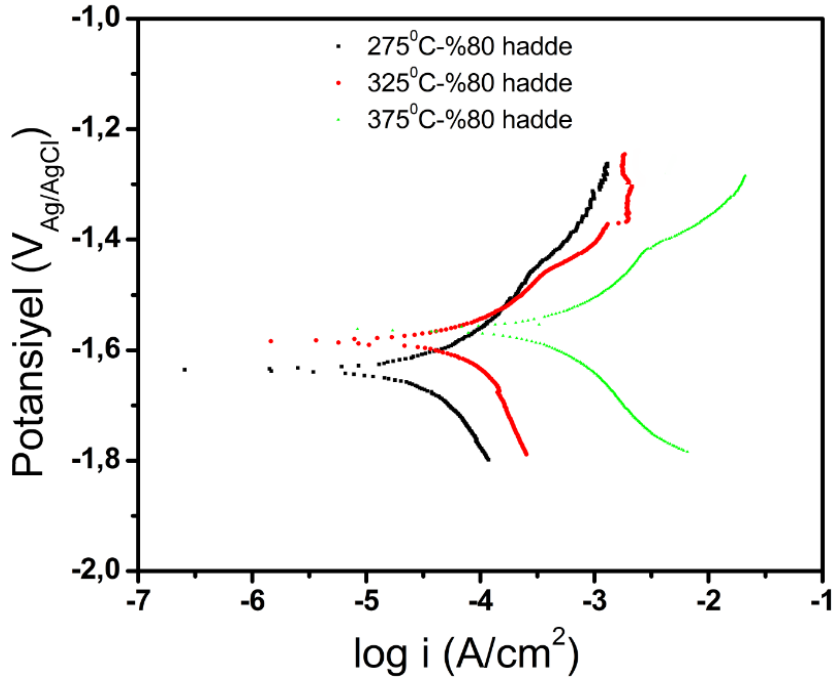
Şekil 5.11'da ZM21 alaşımının döküm ve homojenizasyon işlemi sonrası, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de ise farklı sıcaklıklarda (275°C, 325°C ve 375°C) %40 ve %80 hadde oranları sonrasında elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafikleri görülmektedir. Çizelge 5.1'de polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon hızı (CR) değerleri verilmiştir.



Şekil 5.11. ZM21 alaşımının döküm ve homojenizasyon işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.



Şekil 5.12. ZM21 alaşımına farklı sıcaklıklarda ve %40 oranlarında uygulanan haddeleme işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.



Şekil 5.13. ZM21 alaşımına farklı sıcaklıklarda ve %80 oranlarında uygulanan haddeleme işlemi sonrası elde edilen potansiyodinamik polarizasyon grafiği.

Çizelge 5.1’den de görüldüğü gibi, ZM21 alaşımının döküm hali i_{corr} ve CR değerleri sırasıyla $42,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,9688 \text{ mm}/\text{yıl}$ iken, homojenizasyon sonrası bu değerler yaklaşık %68 oranında bir artış göstermiş ve sırasıyla $71,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $1,6269 \text{ mm}/\text{yıl}$ değerlerine ulaşmıştır. Homojenizasyon sonucunda döküm haline göre korozyon hızında bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni döküm haline göre homojenleştirme sonucunda yapıdaki iç gerilmelerin artışına bağlanabilir.

%40 oranlarında yapılan haddelenmeler sonucunda sıcaklığın artmasıyla i_{corr} değerleri $42,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’den (275°C), yaklaşık %48 bir azalma ile $22,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (375°C) değerlerine kadar düşüş göstermiştir. Aynı şekilde CR değeri de $0,9780 \text{ mm}/\text{yıl}$ ’dan $0,5095 \text{ mm}/\text{yıl}$ değerine kadar azalmıştır. Bir başka ifade ile %40 haddelenmede sıcaklığın artmasıyla korozyon direncinde artış gözlenmiştir. %40 oranında yapılan haddelenmeleri döküm haline göre kıyaslama yaptığımızda korozyon hızı 275°C ’de değişme göstermez iken sıcaklığın artmasıyla korozyon hızında azalış gözlenmiştir, homojenizasyon haline göre kıyaslama yapıldığında ise sıcaklığın artmasıyla korozyon hızında ciddi bir azalma (yaklaşık %68 oranında) gözlenmiştir.

%80 oranlarında yapılan haddelenmeler sonucunda sıcaklığın artmasıyla i_{corr} değerleri sırasıyla $38,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’den, yaklaşık %37’lik bir artış ile $52,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerlerine kadar artış göstermiştir. Aynı şekilde CR değeri de $0,8751 \text{ mm}/\text{yıl}$ ’dan $1,1973 \text{ mm}/\text{yıl}$ değerine kadar artış göstermiştir. Bir başka ifade ile %80 haddelenmede sıcaklığın artmasıyla korozyon direncinde azalma gözlenmiştir. %80 oranında yapılan haddelenmeleri döküm haline göre kıyaslama yaptığımızda korozyon hızı 275°C ve 325°C ’de hemen hemen değişme göstermez iken 375°C ’de yaklaşık %24 oranında korozyon hızında azalış gözlenmiştir, homojenizasyon haline göre kıyaslama yapıldığında ise 275°C sıcaklıkta yaklaşık %46 oranında korozyon hızında bir azalma gözlenirken sıcaklığın artmasıyla korozyon hızındaki azalma %26’ya kadar düşmüştür.

Hadde oranlarının artışına bağlı olarak korozyon değerlendirildiğinde ise 275°C sıcaklıkta hadde oranının artmasıyla korozyon hızında yaklaşık %10 azalma gözlenirken 325°C ve 375°C sıcaklıklarda ise hadde oranlarının artmasıyla korozyon hızları yaklaşık olarak sırasıyla %43 ve %135 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Hem

sıcaklıkların hem de hadde oranlarının artmasıyla korozyon hızlarında artışın nedeni olarak gerek Şekil 5.2'deki optic resimlerden gerekse de Şekil 5.3'deki SEM resimlerinden görüleceği üzere, özellikle 375°C %80 hadde oranında yapıdaki tanelerin incilmesi ve dolayısıyla tane sınırlarının artmasıyla korozyon hızında ciddi bir artış gözlenmiştir. Literatürde tane sınırlarını Kristal hatası olarak belirtip korozyon direncini kötü etkilediği yönünde çalışmalar mevcuttur. [Song and Xu., 2010; Lu et al., 2015].

Çizelge 5.1. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve CR değerleri.

Numune	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/yıl)
Döküm hali	-1,636	42,4	0,9688
Homojenizasyon	-1,594	71,2	1,6269
275°C %40 hadde	-1,625	42,8	0,9780
275°C %80 hadde	-1,635	38,3	0,8751
325°C %40 hadde	-1,629	31,5	0,7197
325°C %80 hadde	-1,583	45,1	1,0305
375°C %40 hadde	-1,629	22,3	0,5095
375°C %80 hadde	-1,564	52,4	1,1973

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

- Bu çalışmada farklı sıcaklık ve hadde oranlarında haddelenerek üretilmiş olan ZM21 magnezyum levhanın Mikroyapı, Sem görüntü analizi, aşınma dayanımı ve korozyon dayanımı incelenmiştir.
- Mikroyapı incelemelerinde, döküm halinden haddeleme oranı ve sıcaklığı arttıkça numunelerin tane sayılarında artış ve tane yapılarında incelmeler oluşmuştur. Homojenizasyon numunelerinde tanelerin belirginliğini bir miktar korumuş fakat boyutlarında küçülme olmuştur.
- İki farklı ortam ve iki farklı yük altında gerçekleşen aşınma testinde kuru ortamdaki 8N yük altında aşınma hızında ki artış haddeye bağlı olarak düşük oranda seyredirken en yüksek aşınma hızı kuru ortamda 375⁰C sıcaklık %40 hadde numunesinde, korozif ortamda ise 325⁰C % 80 hadde de oluşmuştur.
- Sem görüntü analizlerinde, hadde numunelerinde aşınma sonrası karakteristik özelliklerinde Zn kütle yüzdesinin fazla bölgelerde ince yivler oluşurken, Mn kütlesi düşük oranda seyredip Zn'nin yüksek olduğu bölgelerde aşınma sonrası doğrusal çizgilerin oluşması sağlanmıştır.
- Genel olarak hadde ile birlikte sıcaklığında arttığı numunelerde aşınma kayıplarının az ve çizgi izlerinin eşit dağılım sergilediği görülmüştür.
- Korozyon deneyi sonucunda, ZM21 magnezyum alaşımının homojenizasyon sonrasında döküm haline göre %68 oranında korozyon hızında artış görülmüştür. Döküm haline kıyasla 275⁰C ve 325⁰C'de değişme gözlemlenmezken 375⁰C'de yaklaşık %24 oranında korozyon hızında azalma görülmüştür. Homojenizasyon

haline kıyasla ise 275⁰C sıcaklıkta %40 oranında korozyon hızında azalma görülürken sıcaklık artışıyla korozyon hızında azalma %26'ya kadar düşmüştür.

- Hem sıcaklıkların hem de hadde oranlarının artmasıyla korozyon hızlarında artışın nedeni olarak özellikle 375⁰C %80 hadde oranında yapıdaki tanelerin incilmesi ve dolayısıyla tane sınırlarının artmasıyla korozyon hızında ciddi bir artış gözlenmesidir.

KAYNAKLAR

Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S., “Biodegradable Magnesium Alloys for Orthopaedic Applications: A Review On Corrosion Biocompatibility and Surface Modifications”, *Materials Science and Engineering*, 68: 948 – 963 (2016).

Aghion, E., Bronfin, B., Eliezer, D., “The Role of the Magnesium Industry in Protecting the Environment”, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 381 – 385 (2001).

Aghion, E., Eliezer, D., Magnesium, “Alloys Science”, *Technology and Applications*, (2004).

Aizawa, T., Song, R., “Mechanically Induced Reaction for Solid-State Synthesis of Mg₂Si and Mg₂Sn”, *Intermetallics*, 14: 382-291 (2006).

Altun, H., “Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu Ve FBB Kaplamalarının Korozyon Davranışlarının Etkisi”, *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum (2004).

ASM Handbook, “Corrosion”, *ASM International, ISBN 0-87170-007-7*, 13 (1987).

Avedesian, M. M. Ve Baker, “H. Magnesium and Magnesium Alloys”, *ASM Specialty Handbook*, Ohio (1999).

Avedesian, M.M., Baker, H., “Magnesium and Magnesium Alloys”, *ASM Specialty Handbook*, 1, USA, (1999).

Badea, G. E: Caraban, A., Sebesan, M., Dzitac, S., Cret, P. Ve Setel, A., “Polarisation Measurements Used for Corrosion Rates Determination”, *Journal of Sustainable Energy*, 1: 2067-2070 (2010).

Baker, H., “Alloy Phase Diagrams”, *ASM Handbook*, 3, USA (1998).

Beck, E. The Technology of Magnesium and Its Alloys, Hughes, F.A., and Co. Limited, London. (1943).

Birol, Y. “Otomotivde Alüminyumun Cazibesi”, *Bilim ve Teknik*, 497, 50-53 (2009).

C. Blawert, D. Fechner, D. Hoche, V. Heitmann, W. Dietzel, K.U. Kainer, P. Živanovic´, C. Scharf, A. Ditze, J. Grobner, R. Schmid-Fetzer, ‘Corrosion Prevention of Magnesium Alloys’ *Corros. Sci.* 52 2452–2468 (2010).

Cai, S., Lei, T., Li, N., Feng, F., “Effects of Zn On Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior Of Mg-Zn Alloys” *Materials Science And Engineering*, C 32: 2570-2577 (2012).

Corrosion Behavior of Commercially Pure Mg and ZM21 Mg Alloy in Ringer’s Solution – Long Term Evaluation by EIS’ V. Lisitsyn, G. Ben-Hamu, D. Eliezer, K.S. Shin, *Corros. Sci.* 52 2280– 2290 (2010).

Corrosion Behaviour of Magnesium/Aluminium Alloys in 3.5 Wt.% Nacl’ B.E. Carlson, J.W. Jones, *The Metallurgical Aspects of the Corrosion Behavior of Cast Mg–Al Alloys*, In: *Light Metals Processing and Applications*, METSOC Conference, Quebec, 1993.

Corrosion Product and Characterization’ Wenjuan Liu, Fahe Cao, Bingli Jia, Liyun Zheng, Jianqing Zhang, Chunan Cao, Xiaogang Li, *Corros. Sci.* 52 639–650 (2010).

Czerwinski, F. *Magnesium Injection Molding*, Springer, USA (2008).

Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P. And Li, Y., “Effects of Alloying Elements On the Corrosion Behaviour and Biocompatibility of Biodegradable Magnesium Alloys: A Review”, *Journal of Materials Chemistry B*, 2 (14): 1912-1933 (2014).

Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Dobrzanska-Danikiewicz, A.D., Krol, M., Malara, S., Domagala-Dubiel, J., “Mg-Al-Zn Alloy Structure and Properties”, *Open Access Library*, 5: 15 – 25 (2012).

Doruk, M., “Korozyon ve Önlenmesi”, ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayını, Ankara, 70 (1982).

Emley, E. F. *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon, Oxford (1966).

Erçayhan, Y., Saklakoğlu, N., “AZ91 Magnezyum Alaşımının Metalografik Ve Mekanik Özelliklerine İndiyum Elementinin Etkisi”. *Teknik Bilimler Dergisi, Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu*, 1(15), 11-12 (2011).

Fleming, S., “An Overview of Magnesium Based Alloys for Aerospace and Automotive Applications”, Yüksek Lisans Tezi, Master of Engineering in Mechanical Engineering, Rensselaer Poltechnic Institute, Hartford, CT (2012).

Friedrich, H. E. ve Mordike, B. L. *Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications*, Springer, Germany (2006).

Friedrich, H.E., Mordike, B.L., “Magnesium Technology Metallurgy, Design Data, Applications”, 1sted., Berlin, Almanya: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2006). *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy’ C.J. Boehlert, K. Knittel, Mater. Sci. Eng., A* 417 315–321 (2006).

Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S., “Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys”, *Automotive Technology Development, Detroit, Michigan*, 1- 7 (1996).

Ghali, E. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys, Understanding, Performance, And Testing, Jogh Wiley & Sons., USA (2010).

Gray, J.E. Ve Luan, B., “Protective Coatings On Magnesium and Its Alloys-A Critical Review,” *Journal of Alloys and Compounds*, 336 (1-2): 88-113 (2002).

Gu, X., Zheng, Y., Cheng, Y., Zhong, S. Ve Xi, T., “In Vitro Corrosion and Biocompatibility of Binary Magnesium Alloys”, *Biomaterials*, 30 (4): 484-498 (2009).

Gupta, M., Sharon, N.M.L., “Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 39 – 42 (2011).

H. Czichos, “Tribology-A System Approach to The Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear”, Elsevier, Amsterdam, 1987.

Halil Ahmet Gören, Mehmet Ünal, Yunus Türen, Hayrettin Ahlatçı ‘ZM21 Magnezyum Alaşımına Lantan Ve Kalsiyum İlavesinin Mikroyapı, Mekanik Ve Hadde Özelliklerine Etkisi’ (2021).

Herring, W.B., Leavell, B.S., Paixio, L.M., Yoe, J.H., “Trace Metal in Human Plasma and Red Blood Cells. A Study of Magnesium, Chromium, Nicel, Copper and Zinc I. Observation of Normal Subjects”, *American Journal of Clinical Nutrition*, 8: 846 – 854 (1960).

Hüseyin Zengin “Zk60 Magnezyum Alaşımının Döküm Ve Ekstrüzyon Sonrası Mekanik Ve Korozyon Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisinin İncelenmesi” Doktora Tezi, Kbu (2018).

I.J. Polmer, ‘Physical Metallurgy of Magnesium Alloys’, DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, P. 201 1992.

Ji, S., Yang, W., Gao, F., Watson, D., Fan, Z., “Effects of Iron On the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si Diecast Alloys”, *Materials Science and Engineering, A* 564: 130-139 (2013).

K. Kato, K. Adachi, “Wear Mechanism”, *Modern Tribology Handbook*, 2001.
Kaesche, H., “Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems”, Springer (2003).

Kainer, K. U. Ve Buch, F. V. The Current State of Technology and Potential for Further Development of Magnesium Applications, Magnesium Alloys and Technology, Ed. Kainer, K.U., And Wiley-VCH (2003).

Kainer, K. U. Ve Buch, F. V. The Current State of Technology and Potential for Further Development of Magnesium Applications, Magnesium Alloys and Technology, Ed. Kainer, K.U., And Wiley-VCH (2003).

Kainer, K.U, “Magnesium – Alloys and Technologies”, *WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim*, 1 – 13 (2003).

Kandemir, K., Can, A.Ç., “Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi-Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1): 37-45 (2003).

Kapinos, D., Augustyn, B., Szymanek, M., “Methods Od Introducing Alloying Elements into Liquid Magnesium”, *Metallurgy and Foundry Engineering*, 40 (3): 141-160 (2014).

Kreysa, G., Schütze, M., “Corrosion Handbook”, Wiley VCH, 6 (2004).

Küleççi, M. K. Magnesium and Its Alloys Applications in Automotive Industry, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Cilt 39, Sayı. 9-10, 851-865 (2008).

Kuşdemir, H., “AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi”, *Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, Türkiye (2008).

Li, X., Liu, X., Shuilin, W., Yeung, K.W.K., Zheng, Y., Chu, P.K., “Design of Magnesium Alloys with Controllable Degradation for Biomedical Implants: From Bulk to Surface”, *Acta Biomaterialia*, 45: 2 – 30 (2016).

Lu, Y., Bradshaw, A., Chiu, Y., & Jones, I., "Effects of secondary phase and grain size on the corrosion of biodegradable Mg-Zn-Ca alloys", *Materials Science and Engineering: C*, 48: 480486 (2015).

M. Karabaşoğlu (2008) “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı Ve İmalatı” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2008

Martin Jonsson, Dan Persson, Corros. Sci.’ The Influence of the Microstructure On the Atmospheric Corrosion Behaviour of Magnesium Alloys AZ91D and AM50’ 52 (2010) 1077–1085.

Mert, F., Özdemir, A., Karataş, Ç., “Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 13(3), 165-176 (2010).

“Microstructural Characterization and Electrochemical Behaviour’ Wenjuan Liu, Fahe Cao, Anna Chen, Linrong Chang, Jianqing Zhang, Chunan Cao, Corros. Sci. 52 627–638 (2010).

Mochizuki, A., Kaneda, H., “Study On the Blood Compatibility and Biodegradation Properties of Magnesium Alloys”, *Materials Science and Engineering C*, 47: 204 – 210 (2015).

Mordike, B.L., Ebert, T., “Magnesium Properties-Applications-Potential”, *Materials Science and Engineering*, A302: 37 – 45 (2001).

N.T. Kirkland, J. Lespagnol, N. Birbilis, M.P. Staiger, “A Survey of Bio-Corrosion Rates of Magnesium Alloys” *Corros. Sci.* 52 287– 291. (2010).

Nümerger, U., “Korrosion Und Korrosionsschutz Im Bauwesen”, *Band 1, Bauverlag GmbH*, Wiesbaden Un Berlin, (1995).

Polmear, I. J. Light Alloys, From Traditional Alloys to Nanocrystals, Butterworth – Heinemann, UK (2006).

Polmear, I. J. Light Alloys, Metallurgy of The Light Elements, Arnold, London (2006).

Roberge, P.R., “Handbook of Corrosion Engineering”, *Mcgrawhill* (2012).

S.A. Khan, Y. Miyashita, Y. Mutoh, Z.B. Sajuri, ‘Advances in Manufacturing II: Volume 4 - Mechanical Engineering ‘A 420 315–321. *Mater. Sci. Eng.* (2006).

Saris, N.E.L., Mervaala, E., Kappanen, H., Khawaja, J.A., Lewenstam, A., “Magnesium an Update On Physiological, Clinical and Analytical Aspects”, *Clinica Chimica Acta*, 94: 1 – 26 (2000).

Song, G. L. Ve Atrens, A. “Understanding Magnesium Corrosion, A Framework for Improved Alloy Performance”, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 5, Sayı. 12, 837-858. (2003).

Song, G. L. Ve Atrens, A. Corrosion “Mechanisms of Magnesium Alloys”, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 1, Sayı. 1, 11-33. (1999).

Song, G., & Xu, Z.,” The surface, microstructure and corrosion of magnesium alloy AZ31 sheet”, *Electrochimica Acta*, 55(13): 4148-4161 (2010).

T. Varol, “Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi Ve Karakterizasyonu” *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2016.

T. Yıldız, A.K. Gür, “Aşınma Sistemleri”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 86-91,(2006).

Temel VAROL ‘‘Aşınma Deneyi’’ *Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü* KTÜ (2016).

Thomaz, T. R., Weber, C. R., Pelegriani, T., Dick, L. F. P. Ve Knörnschild, “G. The Negative Difference Effect of Magnesium and of The AZ91 Alloy in Chloride and Stannate-Containing Solutions”, *Corrosion Science*, 52, Pp. 2235-2243 (2010).

TMMOB *Makine Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu*, Bursa, Türkiye (2009).

Ümit Özdemir,” ZM21 Magnezyum Alaşımlarının Haddelenme Sonrası Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi (2020).

Ünal, M., “Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2008).

Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Gül, F., Candan, E., “AZ91 Magnezyum Alaşımının Döküm Ve Mekanik Özelliklerine Silisyum İlavesinin Etkisi.” *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, Türkiye (2009).

Üneri, S., “Korozyon Ve Önlenmesi”, *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 75-96 (1998).

Vogel, M., “Mikrostruktur Und Kriechverhalten von Magnesium-Druckgusslegierungen Im System Mg-Zn-Al-Ca”, *Max-Planck-Institut Für Metallforschung*, Stuttgart, 6 – 20 (2002).

Wei Zhou, Tian Shen, Naing Naing Aung, 52‘Effect of Heat Treatment On the Corrosion Behaviour of a Mg-Y Alloy in Chloride Medium’ *Corros. Sci.* 1035–1041 (2010) .

Windhagen, H., Radtke, K., Weizbauer, A., Diekmann, J., Noll, Y., Kreimeyer, U., Schavan, R., Stukenborg-Colsman, C., Waizy, H., “Biodegradable Magnesiumbased Screw Clinically Ewivalent to Titanium Screw in Hallux Valgus Surgery: Short Term Results of the First Prospective, Randomized, Controlled Clinical Pilot Study”, *Biomedical Engineering Online*, 12: 62-72 (2013).

Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C.J., Windhagen, H., “In Vivo Corrosion of Four Magnesium Alloys and The Associated Bone Response”, *Biomaterials*, 26, 3557–3563

Wolf, F.I., Cittadini, A., “Chemistry and Biochemistry of Magnesium”, *Molecular Aspects of Medicine*, 24: 3 – 9 (2003).

Xu, L., Yu, G., Zhang, E., Pan, F. And Yang, K., “In Vivo Corrosion of Mg-Mn-Zn Aalloy for Bone Impant Application”, *Journal of Biomedical Materials Research*, 83A (3): 703-711 (2007).

Y.C. Chiou, K. Kato, T. Kayaba, “Effect of Normal Stiffness in Loading System On Wear of Carbon Steel-Part 1: Severe-Mild Wear Transition”, *J. Tribology*, 491-495, (1985).

Yavuz, H.G., “Mikro Ark Oksidasyon İşlemi Uygulanan AZ91 Kalite Magnezyum Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi.” *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, Türkiye (2011).

Yun, Y., Dong, Z., Lee, N., Lui, Y., Xue, D., Guo, X., Kuhlmann, J., Doepke, A., Halsall, H.B., Heineman, W., Sundaramurthy, S., Schulz, J.M., Yin, Z., Shanov, V., Hurd, D., Nagy, P., Li, W., Fox, C., “Revolutionizing Biodegradable Metals”, *Review, Materials Today*, 12 (10): 22-32 (2009).

Zeng, R. C., Zhang, J., Huang, W. J., Dietzel, W., Kainer, K. U., Blawert, C. Ve Ke, W. “Review of Studies On Corrosion of Magnesium Alloys”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 16, 763-771 (2006).

Zhang, S., Li, J., Zhou, C., Zhang, X., Xie, C., Zhang, Y., Tao, H., He, Y., Jiang Y., Bian, Y., “In Vitro Degradation Hemolysis and MC3T3-E1 Cell Adhesion of Biodegradable Mg-Zn Alloy”, *Material Science Engineering C*, 29 (6): 1907- 1912 (2009).

Zhang, S., Zhang, X., Zhou, C., Song, Y., Xie, C., Tao, H., Zhang, Y., Jiang Y., Bian, Y., “Research On an Mg-Zn Alloy as A Degradable Biomaterial”, *Acta Biometer*, 6 (2): 626-640 (2010).

Zhang, X.G., “Corrosion and Electrochemistry of Zinc”, *Springer, Canada* (1996).

Zhang, Z., “Development of Magnesium-Based Alloys for Elevated Temperature Applications”, *Doktora Tezi, Faculte Des Sciences Et De Genie Universite, Quebec-Canada*, 2-75 (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Sakine OBUZ İlk öğrenimini Adıyaman'da orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğrenimine başladı. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalına yüksek lisans öğrencisi olarak başladı.