

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ FARKLI
ORTAMLARDAKİ GERİLMELİ KOROZYON
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Recep ÇATAR

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Hikmet ALTUN
2013**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ FARKLI ORTAMLARDAKİ
GERİLMELİ KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Recep ÇATAR

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ




TEZ ONAY FORMU

Magnezyum alaşımlarının farklı ortamlardaki gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi

Doç. Dr. Hikmet ALTUN'un danışmanlığında, Recep ÇATAR tarafından hazırlanan bu çalışma 24/09/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.


Başkan : Doç. Dr. Hikmet ALTUN

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Ferhat BÜLBÜL

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. K. Vefa EZİRMİK

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum



Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2012/434

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ FARKLI ORTAMLARDAKİ GERİLMELİ KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Recep ÇATAR

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hikmet ALTUN

Magnezyum alaşımları hafifliği ve özgül dayanımı nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılabile potansiyeli olan, ancak kötü korozyon direnci nedeniyle kullanımı kısıtlanan mühendislik malzemeleridir. Bu çalışmada bu alaşımın farklı korozif ortamlarda gerilmeli korozyon davranışları belirlenmiştir. Bu kapsamda alaşımlar klor iyonları içeren asidik, bazik ve nötr ortamlarda gerilmeli korozyon deneylerine tabi tutulmuştur.

Hafifliği, özgül mukavemeti, biyo-uyumluluğu vb. gibi üstün özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv ve havacılık sektörü ile implant malzemesi olarak biyo-medikal alanında kullanıma uygun özellikler taşıyan magnezyum alaşımlarının, hem gerilme ve hem de korozyon etkisi altında olduğu gerilmeli korozyon davranışları araştırılmıştır. Bu alaşımların farklı ortamlarda gerilmeli korozyona hassasiyeti belirlenmiş ve ileride çalışılması düşünülen magnezyum alaşımlarını gerilmeli korozyona karşı koruyucu tedbirler çalışmalarına bir temel teşkil etmesi amaçlanmıştır.

2013, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: Magnezyum alaşımları, korozyon, gerilmeli korozyon

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF STRESS CORROSION BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS UNDER DIFFERENT CONDITIONS

Recep ÇATAR

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hikmet ALTUN

Magnesium alloys are engineering alloys which have a widely usage potential due to their lightness and specific strengths but their weak corrosion resistance restrict the usage of these alloys. In this study, stress corrosion properties of these alloys have been determined. The alloys have subjected to stress corrosion tests under acidic, basic and neutral environments which contain chloride ions.

The stress corrosion properties, which are under the effect of both corrosion and stress, of these alloys which are proper for the usage in automotive, aerospace and implant applications have been examined. The sensitivity of these alloys to the stress corrosion different environments have been determined and it is aimed that the results of this study can be used for the protection against stress corrosion of magnesium alloys in future works.

2013, 76 pages

Keywords: Magnesium alloys, corrosion, stress corrosion

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımını, anlayışını, desteğini ve zamanını esirgemeyen tez yöneticim Sayın Doç. Dr. Hikmet ALTUN'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Yaptığım çalışmada yol gösteren ve benden bilgilerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ferhat BÜLBÜL'e, deneyler esnasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Erdoğan GÜNER'e, numunelerin işlenmesi ve hazırlanmasında yardımlarından dolayı Sayın Mak. Müh. Hakan DOĞAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışmayı destekleyen Atatürk Üniversitesi Fon Saymanlığı'na, tezin hazırlanmasında emeği geçen arkadaşlara ve çalışma esnasındaki desteklerinden dolayı nişanlıma ve aileme teşekkür ederim.

Recep ÇATAR

Eylül 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları	6
2.1.1. Magnezyumun özellikleri	7
2.1.2. Magnezyum alaşımları.....	8
2.1.2.a. Alaşım elementlerinin magnezyum özellikleri üzerindeki etkileri.....	9
2.1.2.b. Empürite elementlerin etkisi	12
2.1.2.c. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi	13
2.1.3. Magnezyum alaşımlarının kullanım alanları	13
2.1.3.a. Magnezyum alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları....	15
2.1.3.b. Magnezyum alaşımlarının savunma sanayindeki kullanım alanları.....	20
2.1.3.c. Magnezyum alaşımlarının havacılık sektöründeki kullanım alanları	21
2.2. Korozyon ve Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu	23
2.2.1. Korozyon	23
2.2.1.a. Korozyonun tanımı ve önemi.....	23
2.2.1.b. Korozyonun elektrokimyasal ilkeleri	24
2.2.2. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Davranışları.....	28
2.2.3. Korozyon türleri.....	30
2.2.3.a. Galvanik korozyon.....	31
2.2.3.b. Oyuklanma korozyon.....	34
2.2.3.c. Aralık korozyon	35
2.2.3.d. Taneler arası korozyon	37
2.2.3.e. Gerilmeli korozyon	37

2.2.4. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlaması ve gerilmeli korozyon deneyleri	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM	48
3.1. Materyal	48
3.2. Yöntem	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	52
4.1. AZ31 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar	52
4.2. AZ61 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar	56
4.3. AZ91 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar	59
4.4. Ortamların Magnezyum Alaşımlarının Gerilmeli Korozyon Direncine Etkileri	62
4.4.1. AZ31 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksi	62
4.4.2. AZ61 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksi	64
4.4.3. AZ91 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksi	65
4.4.4. Farklı ortamlarda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indekslerinin karşılaştırılması	66
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	69
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CO	Karbon monoksit gazı
CO ₂	Karbon dioksit gazı
NO	Azot monoksit
V	Volt
e	Elektron
K ₁	Gerilme yoğunluk faktörü
K _{ISCC}	Gerilme yoğunluğu
I _{SCC}	Gerilmeli korozyon indeksi
MPa	Megapascal
°C	Derece
ppm	Milyonda bir birim
ağ.%	Yüzde ağırlık
µm	Mikrometre

Kısaltmalar

PEO	Plazma Elektrolitik Oksidasyon
SSRT	Slow Strain Rate Test(Düşük Deformasyon Hızı Testi)
GKÇ	Gerilmeli Korozyon Çatlaması

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bazı metallerin öz kütlelerinin magnezyum öz kütlesi ile kıyaslanması.....	7
Şekil 2.2. Magnezyum alaşımlarının gelişimi ve spesifik özellikleri	9
Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının elektronik endüstrisindeki kullanım alanlarına örnekler	14
Şekil 2.4. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar	18
Şekil 2.5. Magnezyum alaşımından üretilmiş motor bloğu.....	19
Şekil 2.6. Magnezyum alaşımlarından üretilmiş bazı otomobil parçaları	20
Şekil 2.7. Galvanik korozyon şeması	24
Şekil 2.8. Korozyonun elektrokimyasal oluşum düzeni	26
Şekil 2.9. Oyuklanma ile oluşan bir korozyon hücresi	35
Şekil 2.10. Aralık korozyonu	36
Şekil 2.11. Paslanmaz çelikte taneler arası $Cr_{23}C_6$ çökeltisi.....	37
Şekil 2.12. Saldırgan bir çevrede sabit yük altında çevresel yardımın üç aşaması.....	40
Şekil 2.13. Önceden hazırlanmış aktif yörünge mekanizması.....	40
Şekil 2.14. Zorlanmayla oluşmuş aktif yörünge mekanizması.....	41
Şekil 2.15. Gerilmeli korozyon için sabit deformasyon numuneleri	44
Şekil 2.16. Uzun süreli yükleme testi deney numunesi C-halkası.....	46
Şekil 3.1. Kullanılan magnezyum alaşımlarının teknik resmi	48
Şekil 3.2. Kullanılan magnezyum alaşımlarının işlendikten sonraki görüntüsü.....	49
Şekil 3.3. Korozyon hücresi.....	49
Şekil 3.4. pH metre	50
Şekil 3.5. Üniversal çekme cihazı ve korozyon hücresinin montaj edilmiş görüntüsü	51
Şekil 4.1. AZ31 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu	52
Şekil 4.2. AZ31 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu	53
Şekil 4.3. AZ31 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT test sonucu	53
Şekil 4.4. AZ31 magnezyum alaşımının%3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu.	54
Şekil 4.5. AZ31 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT test sonucu.	55
Şekil 4.6. AZ61 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu	56

Şekil 4.7. AZ61 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu	56
Şekil 4.8. AZ61 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT test sonucu	57
Şekil 4.9. AZ61 magnezyum alaşımının%3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu.....	58
Şekil 4.10. AZ61 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT test sonucu	58
Şekil 4.11. AZ91 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu	59
Şekil 4.12. AZ91 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu	60
Şekil 4.13. AZ91 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT test sonucu	60
Şekil 4.14. AZ91 magnezyum alaşımının%3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu.....	61
Şekil 4.15. AZ91 magnezyum alaşımının değişik ortamdaki SSRT test sonucu	62
Şekil 4.16. AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indeksleri grafik gösterimi.....	63
Şekil 4.17. AZ61 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indeksleri grafik gösterimi.....	64
Şekil 4.18. AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indeksleri grafik gösterimi	66
Şekil 4.19. Farklı türde magnezyum alaşımlarının asidik ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.20. Farklı türde magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.21. Farklı türde magnezyum alaşımlarının bazik ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması	68
Şekil 5.1. Mg-H ₂ O sisteminin potansiyel-pH diyagramı	71
Şekil 5.2. Mg-H ₂ O sisteminin potansiyel-pH diyagramının korozyon problemine uygulaması	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Magnezyum içeren başlıca mineraller ve magnezyum miktarları	6
Çizelge 2.2. Magnezyum alaşımlarındaki elementleri gösteren kod harfler	8
Çizelge 2.3. Levha alaşımlarının farklı atmosfer koşullarında 2,5 yıl süren korozyon testi sonuçları	28
Çizelge 2.4. Normal hidrojen elektrotuna göre 25°C’de bazı elementlerin standart elektrot potansiyelleri	30
Çizelge 2.5. Galvanik seri	33
Çizelge 3.1. Kullanılan magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri	48
Çizelge 4.1. AZ31 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri	63
Çizelge 4.2. AZ61 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri	64
Çizelge 4.3. AZ31 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri	65

1. GİRİŞ

Genel olarak korozyon; malzemelerin ortam ile oluşturduğu kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların sonucu kimyasal ve fiziksel özelliklerde meydana gelen olumsuz değişimler olarak tanımlanır. Ancak bu tanımlama çok geniş bir malzeme grubunu kapsadığından bizim için önemli olan, metalik malzemelerin korozyonudur. Metalik malzemeler açısından korozyon; bir elementin sıfır veya düşük valans değerinden pozitif veya daha yüksek valans değerine yükselmesidir. Altın ve platin gibi asal metallerin haricinde, metallerin çoğu doğada oksit bileşikler halinde bulunur. Bu yüzden bir metalin en kararlı hali oksitli halidir ve metallerin oksidasyon yoluyla korozyona uğraması kaçınılmazdır.

Korozyon çeşitlerinden biri olan gerilmeli korozyon ise gerilme ve korozyon etkisiyle metal malzemelerde meydana gelen bozunma olarak tanımlanabilir. Bu korozyon, tane sınırlarında çatlak oluşturarak malzemelerin dayanımını azaltır. Bozunma parça yüzeyinde bulunan çatlaklarda veya gerilme yığılmasına yol açan diğer geometrik düzensizliklerde başlar. Gerilmeli korozyonun en belirgin özelliği kimyasal ve mekanik etkilerin birbirini destekler nitelikte olmasıdır. Gerilmeli korozyon, korozif ortamda bulunan metal malzemelerde çekme gerilmesi etkisiyle çatlak oluşması ve ilerlemesi şeklinde meydana gelen bir olaydır. Oluşan çatlaklar hem gerilmenin hem de korozyonun etkisiyle belirli hızlarda malzemenin içine doğru ilerler. Parçanın kesiti uygulanan yükü taşıyamayacak duruma geldiğinde parça aniden kopar veya kırılır (Savaşkan 2000). Malzemelerin gerilmeli korozyon dirençleri sabit deformasyon hızı deneyi, sabit yükleme deneyi, korozyon yorulma deneyi ve düşük deformasyon hızı deneyi gibi deneylerle yapılabilmektedir (Jones 1996).

Magnezyum alaşımları, hafiflik ve yüksek özgül dayanım özelliklerinden (mukavemet/yoğunluk) dolayı savunma sanayi ve taşımacılık sektöründe özel bir öneme sahiptir (Mordike and Ebert 2001). Alaşımsız olarak düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olduğundan alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Magnezyum ayrıca yüksek ısı iletkenlik, yüksek boyutsal kararlılık, iyi elektromanyetik koruma, yüksek

sönümleme, iyi işlenebilme ve kolay geri dönüşüm özelliklerine de sahiptir (Chaffin and Jacoby 1998; Fredrich and Schumann 2001). Bu özellikleri Mg alaşımlarını otomotiv, bilgisayar, havacılık, mobil telefonlar, spor malzemeleri gibi pek çok endüstride değerli kılmaktadır. Düşük ağırlık ve metabolizmaya uyumu açısından implant malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Gray and Luan 2002; Kaya vd 2007). Ayrıca son yıllarda enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak için yapılan çalışmalara hız verilmiştir. Bu kapsamda otomotiv endüstrisi de yakıt sarfiyatını azaltmak amacıyla araçların daha hafif olması yönünde çalışmalar yapmaktadır (Kaya vd 2007). Küresel ısınmayı önlemeye yönelik olarak yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ve yakıt tüketiminde tasarrufun gerekliliği, son yıllarda otomotiv sanayisinin daha hafif ve çevre dostu malzemelere yönelmesine sebep olmaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin bir eki olan ve şimdiye kadar 183 ülkenin imzalayarak kabul ettiği Kyoto Protokolü'ne göre otomobillerde CO₂ emisyonunun günümüzdeki sınırı 140 g/km'dir (Küleççi 2008; Birol 2009). Otomobil ağırlığındaki artış, çevreye verilen CO₂ gazı miktarının da artması sebebiyle küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Çevresel faktörler için sadece CO emisyonunda değil, otomobillerin atmosfere bıraktığı diğer CO₂, HC, NO gaz, parçacık ve katı atıkların miktarında da büyük sınırlamalar ve zorlu hedefler getirilecektir. Bu hedeflere ulaşabilmek amacıyla, 1.74 g/cm³'lük özkütlesi ile bilinen en hafif yapısal metal olan magnezyum, sahip olduğu önemli özellikleri ile otomotiv sanayisinin gelecekteki uygulamaları için çok büyük bir potansiyel durumundadır (Kease *et al.* 2003; Seçgin 2012).

21. yüzyıl malzemeleri arasında yer alan magnezyum alaşımları, alüminyumdan %36, çelikten ise %78 daha hafiftir ve yapısal metaller arasında en hafif olanıdır. Buna ek olarak yüksek özgül dayanım ve bükülmezliği, elektromanyetik etkenlere karşı iyi bir kalkan olması, iyi döküm ve işlenebilirlik özellikleri, ısıyı çok iyi dağıtması ve iyi sönümleme kapasitesi magnezyum alaşımlarının otomotiv ve havacılık sanayisi için aday malzemeler arasında ilk sıralarda yer almasını sağlamaktadır (Avedesian and Baker 2003; Polmear 2006; Seçgin 2012).

Hammadde ve enerji kaynaklarının korunabilmesi açısından geri dönüşebilirlik özelliği de, otomotiv sanayisinde malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmektedir. Avrupa Birliği'nin hedefi, otomobillerde kullanılacak malzemelerin 2015 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzemeler olmasıdır. Japonya'da ise, yeni otomobillerde 2015 yılına kadar %95 geri dönüşebilir malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (Zeytin vd 1999).

Mg, yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Ayrıca Mg, mühendislik plastiklerine göre çok daha rijit ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir (Martchek 2000; Westengen 2006).

Mg'un önemli alaşım grupları Mg-Al, Mg-Zn ve Mg-toprak alkali metalleri olarak gruplandırılır. Ama en geniş spektrum Al ve Zn grubudur. Mg alaşımlarının mekanik ve döküm özelliklerini geliştirmek amacıyla çok az miktarda Ca, Sr, Ba veya Sb, Sn, Pb ve Bi katılarak mikro alaşımlandırma yapılmaktadır (Rojagopalan *et al.* 2004). Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen yeni Mg alaşımlarında nadir olarak toprak metalleri kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı gibi iyi mekanik özelliklerine rağmen, elektrokimyasal olarak oldukça aktif bir metal olmasından kaynaklanan kötü korozyon özellikleri, Mg ve alaşımlarının herhangi bir koruma uygulanmadan kullanılmalarını sınırlandırmaktadır (Bohne *et al.* 2006, Yamamoto *et al.* 2001). AZ91, AZ61 ve AZ31 Mg alaşımları daha iyi döküm ve mekanik özellikleri nedeniyle diğer Mg alaşımlarına göre daha yaygın kullanılmaktadır.

Magnezyum alaşımları yukarıda belirtildiği gibi elektronik, otomobil ve havacılık endüstrisi uygulamalarında kullanılmaktadır, ancak zayıf korozyon dirençleri dolayısıyla kullanımını kısıtlı olmaktadır (Lu *et al.* 2002; Winzer 2005) .

Magnezyum alaşımlarının korozyon dirençlerini belirlemek ve iyileştirmek için son yıllarda yapılan çalışmalar artış göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda magnezyum alaşımlarının implant malzeme olarak kullanılabilirliği üzerine durulmuştur. Titanyum alaşımları ve paslanmaz çelikler iyi mekanik özelliklerinden dolayı implant malzeme olarak kullanılmaktadır. Fakat bu ürünlerin alaşımları insan vücudunda toksit etkisi yaratabileceğinden kötü sonuçlara yol açmaktadır. Üstelik bu implantların mekanik özellikleri insanın kemik yapısından oldukça farklıdır (Niimomi 2002). Ayrıca bu implantlar insan vücudunda geçici pim, vida v.b şekillerde kullanıldığı zaman genelde iyileşme işlemi tamamen sağlansa bile insan dokusuna uyum sağlamayabilmekte ve genelde ikinci bir operasyona ihtiyaç duyulabilmektedir. İkinci ameliyat sadece sağlık harcamalarını artırmayıp aynı zamanda hastaların psikolojilerinde büyük farklılıklara ve ruhsal sorunlara yol açmaktadır. Magnezyum alaşımlarının biyouyumlulukları ve mekanik özelliklerinin insan kemiğine olan benzerlikleri sebebiyle iyi bir implant malzemesi olarak düşünülebilir (Staiger 2006). Bu kadar avantajlı olmasına rağmen magnezyum ve alaşımlarının implant malzeme olarak kullanımı pek yaygın değildir. Bunu kısıtlayan en büyük etken ise düşük korozyon direncidir (Witte *et al.* 2006).

Choudhary *et al.* (2011) ise biyolojik magnezyum alaşımlarının mekanik bütünlüğüne insan vücudunun biyo kimyasal ve korozyon etkisinden dolayı yüksek bozulmaya sebep olmaktadır ve bu da sorun olarak devam etmektedir. Bu yüzden gerilme ve korozyonun aynı anda gerçekleşip sebep olduğu gerilmeli korozyon çatlaklarının, vücut sıvısı içerisindeki davranışlarını belirlemek için gerçekte kullanılmadan önce tespit edilmesi gerekmektedir. Gerilmeli korozyon çatlaklarının hassasiyetinin belirlenmesi için SSRT testi yapılmış numune olarak AZ91D kullanılmış ve vücut sıvısı içerisindeki davranışları incelenmiştir. Test numunelerinin kırılma yüzeyleri için SEM analizi yapılmış ve gerilmeli korozyon çatlak yüzeyleri incelenmiştir. Gerilmeli korozyon çatlakları için hassasiyetlerinin olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan diğer bir implant uygulaması çalışmasında AZ91 magnezyum alaşımının ortopedik implant uygulaması değerlendirilmiştir. Bunun için düşük deformasyon hızı deneyi (Slow Strain Rate Testing) uygulanmış ve korozyon ortam için yapay vücut sıvısı

kullanılmıştır. Bu çalışmada magnezyum alaşımı için beklenen gerilmeli korozyon direncinin sağlanmadığı belirtilmiştir (Srinivasan *et al.* 2008).

Magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon davranışı üzerine yapılan diğer bir çalışmada, AZ61 magnezyum alaşımı üzerine Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemiyle kaplama işlemi yapılmış ve alaşım üzerindeki gerilmeli korozyon davranışı, düşük deformasyon hızı deneyi (Slow Strain Rate Testing) ile farklı deformasyon hızları için incelenmiş ve PEO kaplamasının gerilmeli korozyon direncini artırdığı belirtilmiştir (Srinivasan *et al.* 2008).

Al-Zn-Mg-Cu-Zr alaşımı için yapılan çalışmada; yeniden kristalleşme engellenerek gerilmeli korozyon çatlağı direnci düşük deformasyon hızı deneyi ile incelenmiş ve engellenen yeniden kristalleşmenin gerilmeli korozyon direncini artırdığı belirtilmiştir (Kannan and Raman 2008).

Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon davranışlarının belirlenmesine ve gerilmeli korozyon direncinin artırılmasına yönelik çalışmalar son yıllarda artmakta olup yeterli düzeyde değildir. Bu yüzden bu çalışmada, özellikle otomotiv ve havacılık sektörü ile implant malzemesi olarak biyo-medikal alanında kullanıma uygun özellikler taşıyan magnezyum alaşımlarının, hem gerilme ve hem de korozyon etkisi altında olduğu gerilmeli korozyon davranışlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle bu çalışmadan çıkan sonuçlarla bu alaşımların farklı ortamdaki gerilmeli korozyona hassasiyeti belirlenecek ve ileride çalışılması düşünülen magnezyum alaşımlarını gerilmeli korozyona karşı koruyucu tedbirler çalışmalarına bir temel teşkil edecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları

Sir Humphrey Davy tarafından 1808 yılında keşfedilen magnezyum, dünyada en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci elementtir. 1828 yılında Fransız bilim adamı Antoine – Alexander Bussy, magnezyum klorürü metalik potasyum ile ergiterek yaptığı ayrıştırma işlemi ile metalik magnezyumu elde etmiştir. Magnezyumun elektrolitik redüksiyon ile klorürden ilk olarak üretimini ise, 1833 yılında Michael Faraday gerçekleştirmiştir (Biol 2009).

Magnezyum, dünyada yaygın olarak bulunan pekçok mineralde doğal olarak bulunmaktadır. Magnezyum içeren başlıca mineraller ve magnezyum miktarları Çizelge 2.1’de görülmektedir (Park *et al.* 2011).

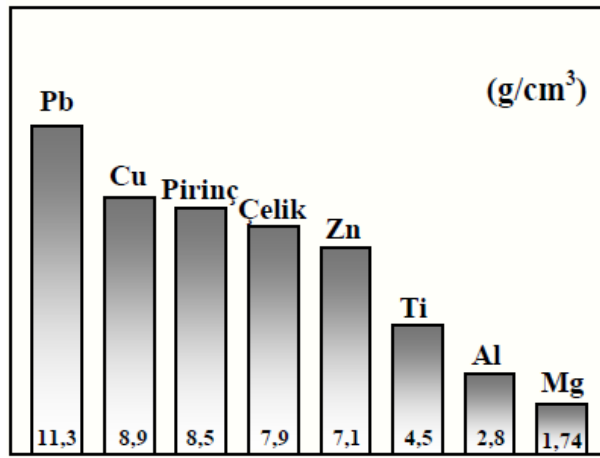
Çizelge 2.1. Magnezyum içeren başlıca mineraller ve magnezyum miktarları

Mineral Adı	Kimyasal Formül	Magnezyum Miktarı,ağ.%
Brusit	Mg(OH) ₂	41.7
Manyezit	MgCO ₃	28.8
Serpatin	3MgO.2SiO ₂ .2H ₂ O	26.3
Dolomit	MgCO ₃ .CaCO ₃	13.2
Karnalit	KCl.MgCl ₂ .6H ₂ O	8.8
Tuzlu göl suyu	MgCl ₂ .MgSO ₄	0.8
Deniz suyu	MgCl ₂ .MgSO ₄	0.14

Magnezyum metalinin üretilmesinde kullanılan başlıca yöntemler magnezit, tuzlu su ve deniz suyundan elde edilen ergimiş magnezyum klorürün (MgCl₂) elektrolizi ve magnezyum oksitin (MgO) ferrosilisyum ile termal redüksiyonudur (Biol 2009).

2.1.1. Magnezyumun Özellikleri

21. yüzyıl malzemeleri arasında yer alan magnezyum, gümüş beyazlığında bir metaldir. $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'lük özkütlesi ile alüminyumdan %36, çelikten ise %78 daha hafiftir ve yapısal metaller arasında en hafif olanıdır (Şekil 2.1) (Avedesian and Baker 2009; Polmear 2006).



Şekil 2.1. Bazı metallerin özkütlelerinin magnezyum özkütlesi ile kıyaslanması (Polmear 2006).

Magnezyumun atom çapı 0,32 nm olduğundan Al, Zn, Ce, Y, Ag, Zr ve Th gibi elementlerle alaşım oluşturmak için uygun büyüklüktedir (Altun vd 2002). Magnezyum alaşımları, $160-300 \text{ N/mm}^2$ çekme dayanımı, $80-190 \text{ N/mm}^2$ %0,2 akma dayanımı ve %2-15 kopma uzamasına sahip alaşımlardır. Bu alaşımlar kara taşıtlarında, elektronik, bilgisayar ve spor gereçleri endüstrisinde kullanım alanı bulmaktadır. Geleneksel magnezyum alaşımları 1900'lü yılların ilk on yılında geliştirilmeye başlanmış ve 1930'lu yılların sonunda bir zirveye ulaşmıştır. İkinci zirve ise 1950'lerde görülmektedir. Son 40 yılda daha ziyade alüminyum ve çelik üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Ancak plastik ve fiberle güçlendirilmiş plastiklerle geleneksel magnezyum alaşımlarının ikamesi bu malzemeyi yeniden gündeme getirmiştir (Zeytin vd 1999).

2.1.2. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum ticari olarak % 99,8'i aşan saflık değerlerinde kullanılmasına karşın, mühendislik uygulamalarında çoğunlukla alüminyum, çinko, mangan, nadir toprak elementleri, zirkonyum, toryum, gümüş gibi metaller ile alaşımlandırılarak kullanılmaktadır (Polmear 2006; Birol 2009).

Magnezyum alaşımlarının gösterilmesinde kullanılan uluslararası bir kodlama sistemi bulunmamaktadır; fakat genel olarak ASTM (American Society for Testing and Materials) B275-94 standardı kullanılmaktadır. Bu sistemde, ilk iki harf magnezyum alaşımında en çok bulunan elementleri ifade etmektedir (Çizelge 2.2) (Ghali 2010).

Çizelge 2.2. Magnezyum alaşımlarındaki elementleri gösteren kod harfler (Ghali 2010).

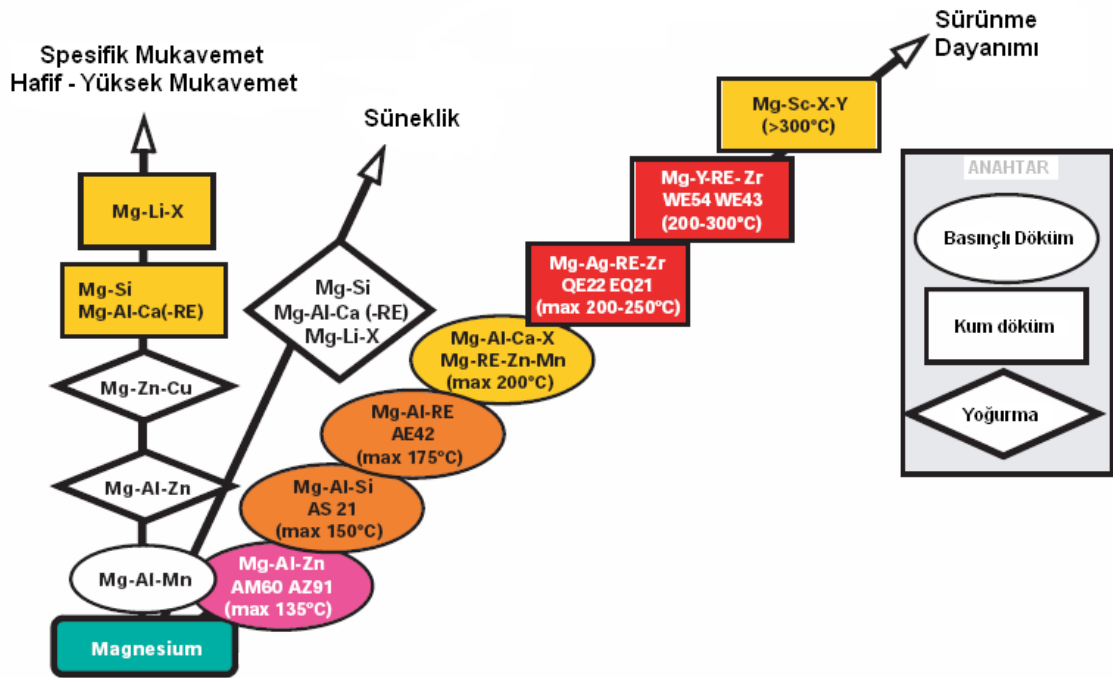
Harf	Alaşım Elementi	Harf	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	M	Mangan
B	Bizmut	N	Nikel
C	Bakır	P	Kurşun
D	Kadmiyum	Q	Gümüş
E	Nadir Toprak Elementleri	R	Krom
F	Demir	S	Silisyum
H	Toryum	T	Kalay
J	Stronsiyum	W	İtriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimon
L	Lityum	Z	Çinko

Seçgin (2012)'nin yaptığı çalışmada belirttiğine göre alaşımda en çok bulunan element, kodda ilk olarak gösterilmektedir. Magnezyum alaşımında en çok bulunan elementlerin miktarı eşit olduğu takdirde ise, kod harfler alfabetik sıraya göre yazılmaktadır. Harflerden sonra kullanılan rakamlar, en çok bulunan iki alaşım elementinin yaklaşık miktarını ağırlık yüzdesi olarak göstermektedir. Magnezyum alaşımının saflık derecesi ise A, B, C harfleri ile belirtilmektedir (Ghali 2010).

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 alaşımı gruplarıdır (Birol 2009). Mg-Al-Zn alaşım sistemi ise en yaygın olarak kullanılan magnezyum alaşımıdır. Mg-Al-Zn

alaşımından üretilen döküm parçalarının nemli ortam koşullarında korozyona uğraması nedeniyle, 1925 yılında alaşıma az miktarda (ağ. %0,2) mangan ilave edilmiştir ve magnezyum alaşımının korozyon direncinin arttığı görülmüştür. Mangan, bir kısmı ergitme sırasında ayrılan intermetalik bileşikler (Al-Mn-Fe) oluşturarak, demir ve diğer ağır metal empüritelerinin giderilmesini sağlamaktadır (Polmear 2006; Ghali 2010).

Magnezyum alaşımları genel olarak döküm ve dövme magnezyum alaşımları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Basınçlı döküm, kum döküm ve dövme magnezyum alaşımlarının gelişimi ve sahip oldukları spesifik özellikler Şekil 2.2’de verilen şemada görülmektedir (Polmear 2006).



Şekil 2.2. Magnezyum alaşımlarının gelişimi ve spesifik özellikleri (Polmear 2006; Seçgin 2012).

2.1.2.a. Alaşım elementlerinin magnezyum özellikleri üzerindeki etkileri

İlave edilen alaşım elementine ve elementin miktarına bağlı olarak magnezyumun fiziksel özellikleri değişmektedir. Alaşım elementlerinin magnezyumun özellikleri

üzerindeki etkileri aşağıdaki şekildedir:

Alüminyum: Magnezyum alaşımlarında en çok kullanılan elementtir ve magnezyumdaki maksimum çözünürlüğü ağırlık %12,7'dir. Alüminyum; mukavemeti, sertliği, dökülebilirliği ve korozyon direncini arttırmaktadır. Ergimiş magnezyum alaşımının oksidasyon hızını ise düşürmektedir. Alüminyum miktarı arttıkça süneklik azalmaktadır. Mukavemetin ve sünekliğin en iyi kombinasyonu ise, magnezyum alaşımında ağırlık %6 alüminyum bulunduğu elde edilmektedir (Polmear 2006; Friedrich and Mordike 2006; Seçgin 2012).

Çinko: Genellikle oda sıcaklığı mukavemetini arttırmak amacıyla alüminyum ile birlikte kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımında bulunan demir ve nikel empüritelerinin korozif etkilerini azaltmaktadır. Buna ek olarak, ergimiş metalin akışkanlığını arttırmaktadır. Fakat magnezyum alaşımı ağırlık %2'den fazla çinko içerdiğinde, uzama miktarı azalarak kırılma meydana gelmektedir. Sünekliğin azalması ise, çinko elementinin Mg₁₇Al₁₂ fazında tercihli olarak birikmesi şeklinde açıklanmaktadır. Çinko, magnezyum alaşımının mukavemetini arttırmak amacıyla zirkonyum, nadir toprak elementleri ve toryum ile birlikte de kullanılmaktadır (Polmear 2006; Birol 2009; Seçgin 2012).

Mangan: Genellikle diğer alaşım elementleri ile birlikte kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımı en fazla ağırlık %1,5–2 mangan içermektedir. Alüminyum içeren magnezyum alaşımlarında mangan, alüminyum ile MnAl, MnAl₄, MnAl₆, Al₈Mn₅ ve Al₈(Mn,Fe)₅ bileşiklerini oluşturmaktadır (Polmear 2006; Friedrich and Mordike 2006; Laser *et al.* 2006; Czerwinski 2008; Seçgin 2012). Magnezyum alaşımlarına mangan ilave edilmesinin temel sebebi, manganın Fe-Mn çökeltileri oluşturarak demir miktarının kontrol altında tutulmasını sağlamasıdır. Bu şekilde, alaşımda bulunan ağır metal empüriteler giderilerek korozyon özellikleri iyileştirilmektedir (Polmear 2006; Friedrich and Mordike 2006; Czerwinski 2008; Seçgin 2012).

Silisyum: AS serisi magnezyum alaşımlarında bulunan silisyum, meydana gelen Mg₂Si çökeltilerine bağlı olarak alaşımın sürünme dayanımı arttırmaktadır (Pekgülyüz 2003;

Kaya vd 2005). Mg_2Si çökelti fazının zayıf bir katot olması nedeniyle silisyumun, magnezyum alaşımının korozyon hızı üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır (Ghali 2010).

Kalsiyum: Alaşım elementlerinin korozyon hızı üzerindeki etkisi alaşımda bulunma yerine, şekline ve miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Magnezyum AC52 ve AC53 alaşımları, AM50 alaşımına kalsiyum ilave edilerek elde edilmektedir. Başlangıçta magnezyum içerisinde çözünen ve magnezyumun aktivitesini düşüren kalsiyum, alaşımın korozyon özelliklerini iyileştirmektedir. Magnezyum içerisindeki konsantrasyonu artan kalsiyum ise, Al ve Mg ile $(Mg_2Al)_2Ca$ intermetalik bileşiğinin oluşması ve galvanik hücre sayısının artması nedeniyle korozyon hızını arttırmaktadır (Gaili 2010).

Gümüş: Nadir toprak elementleri ile birlikte kullanılarak, magnezyum alaşımının yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme dayanımını arttırmaktadır. Fakat alaşımın korozyon direncini azaltmaktadır (Ghaili 2010).

Zirkonyum: Zn, Ag, Y, Th ve nadir toprak elementleri içeren magnezyum alaşımlarına ve saf magnezyuma ilave edilen zirkonyum, tane küçültücü olarak kullanılmaktadır. Berilyumun tane büyütücü etkisini azaltmaktadır. Örnek olarak, berilyum içeren AZ92 alaşımına ilave edilen %0,2 Zr, alaşımın tane boyutunun $510 \mu m$ 'den $180 \mu m$ 'ye düşmesini sağlamaktadır. Bu şekilde alaşımın mekanik özellikleri iyileşmektedir (Friedrich and Mordike 2006; Ghaili 2006, Czerwinski 2008).

Berilyum: Ergimiş metalin oksidasyonunu ve tutuşmasını engellemek amacıyla eser miktarda (10-15 ppm) kullanılmaktadır. Magnezyum eriyikten, demirin giderilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Fakat Mg-Al alaşımlarına ilave edilen düşük miktardaki berilyum, tane büyümesine sebep olmaktadır (Czerwinski 2008).

Toryum: Magnezyum alaşımlarının sürünme dayanımını $350^\circ C$ sıcaklığa kadar arttırmaktadır. Magnezyumun dökülebilirliğini iyileştirmektedir (Friedrich and Mordike

2006).

İtriyum: Magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme dayanımını 300°C sıcaklığa kadar arttırmak amacıyla nadir toprak elementleri ile birlikte kullanılmaktadır (Friedrich and Mordike 2006).

Stronsiyum: Mg-Al alaşımlarına ilave edilen stronsiyum, tane boyutunun küçülmesini sağlamaktadır. Noranda Inc. tarafından geliştirilen AJ magnezyum alaşımı, BMW hibrid motor karterinde kullanılmaktadır. Tane boyutunun küçülmesine, oksit tabakasının yapısının ve bileşiminin değişmesine, mevcut fazların elektrokimyasal özelliklerinin değişmesine bağlı olarak alaşımın korozyon hızı azalmaktadır. Yeni geliştirilen Mg-Al-Sr magnezyum alaşımının sürünme dayanımının yüksek olması diğer olumlu özellikleri arasında yer almaktadır. Yapılan karakterizasyon çalışmalarında alaşımın Al-Sr-(Mg) intermetalik ikincil fazlarını içerdiği gözlemlenmiştir. Magnezyum basınçlı döküm alaşımları AM60B, AS41, AE42 ve alüminyum basınçlı döküm alaşımı A380 ile karşılaştırıldığında, Mg-Al-Sr magnezyum alaşımının tuz püskürtme korozyon direncinin (0,09–0,15 mg/cm² gün) daha yüksek olduğu yapılan araştırmalar ile belirlenmiştir (Ghali 2010).

2.1.2.b. Empürite elementlerinin etkisi

Magnezyum alaşımlarının niteliği saflığına bağlı olarak değişmektedir. Empürite elementleri arasında en zararlı olanları demir ve nikel dir (Czerwinski 2008).

Nikel: Magnezyumun korozyon direncini düşürmektedir. Ticari alaşımlarda izin verilen nikel miktarı ağırlık % 0,01-0,03 değerleri arasındadır. Alaşımın korozyon direncinin yüksek olması için ise, nikel miktarının ağırlık % 0,002 değerini aşmaması gerekmektedir (ASTM B 94) (Czerwinski 2008).

Demir: Demirin de magnezyumun korozyon özellikleri üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Ticari alaşımlarda izin verilen demir miktarı ağırlık %0,01-0,03 değerleri

arasındadır. Alaşımın korozyon direncinin yüksek olması için ise, demir miktarının ağırlıkça %0,005 değerini aşmaması gerekmektedir (ASTM B 94) (Czerwinski 2008).

Bakır: Magnezyum alaşımında bulunan bakır miktarı ağırlıkça %0,05 değerinin üzerinde olduğunda alaşımın korozyon direncini azaltmaktadır; fakat yüksek sıcaklık mukavemetini arttırmaktadır (Czerwinski 2008).

2.1.2.c. Magnezyum alaşımlarının standartlarla gösterimi

Magnezyum alaşımları genellikle iki büyük harfli takip eden iki veya üç numara ile tanımlanır. Harfler, alaşımda iki ana alaşım elementi ile ilgilidir. İlk harf en yüksek konsantrasyonu, ikinci harf ikinci yüksek konsantrasyonu gösterir. Harfleri takip eden ilk numara, ilk harf elementinin ağırlıkça yüzdesi (yalnız iki numara varsa) ve ikinci numara da ikinci harf elementinin ağırlıkça yüzdesidir. A,B gibi harfler numaraları takip ederse bu, genellikle impurite (katışıklık) seviyelerinde alaşım için A, B gibi bir modifikasyonu gösterir. Örneğin AZ91D gösterimi magnezyum alaşımının nominal %9 alüminyum ve %1 çinko içerdiğini gösterir.

Bu standart gösterimlerden ayrı olarak Magnezyum Araştırma Enstitüsünün (MRI) geliştirmiş olduğu yeni alaşımlara ait gösterimler de mevcuttur. Magnezyum Araştırma Enstitüsü yeni alaşımları ‘MRI-1, MRI-2, MRI-3,.....MRI- 230D’ şeklinde tanımlamıştır. Her geçen gün keşfedilen yeni alaşım sayısı artmaktadır. Bu yeni alaşımlar temel alaşımların inovasyonu ile geliştirilmiştir. Örneğin, MRI-1’in temel alaşımı AM60 iken, MRI-2’nin temel alaşımı AM70’tir. Otomotiv endüstrisinde çok kullanılan MRI-153 alaşımının temel alaşımı ise AZ91’dir (Eker 2008).

2.1.3. Magnezyum alaşımlarının kullanım alanları

1983 yılında 27000 ton olan basınçlı döküm magnezyum alaşımı kullanım miktarının 2004 yılında 152000 ton değerine ulaşmış olması, son yıllarda basınçlı döküm magnezyum alaşımlarına olan ilginin arttığını göstermektedir. Dövme alaşımlarının

kullanım alanlarının ise, uygulanan proses optimizasyonu, yapılan alaşım geliştirmeler ve araştırmalar ile hızla geliştiği görülmektedir (Ghali 2010).

Yapısal metaller arasında en hafifi olan magnezyum alaşımları, bu özelliği nedeniyle otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinin ilgisini çekmektedir. Helikopterlerde magnezyum döküm parçalar (vites kutusu, koltuk iskeleti ve pedal), uydularda ise döküm ve dövme magnezyum parçalar kullanılmaktadır. Elektromanyetik etkenlere karşı iyi bir kalkan olması sebebiyle ise, magnezyum alaşımlarının elektronik endüstrisinde (dizüstü bilgisayar, kamera, cep telefonu, televizyon kabini) pek çok kullanım alanı bulunmaktadır (Şekil 2.3) (Duygulu 2009).



Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının elektronik endüstrisindeki kullanım alanlarına rnekler

Magnezyum ve alaşımlarının uygulama alanlarının başında ise % 40 pay ile alüminyum alaşımlandırma gelmektedir. Alüminyuma ilave edilen düşük miktarlardaki magnezyum, alaşımın mukavemetini ve korozyon direncini arttırmaktadır (Aghion and Bronfin 2000; Birol 2009; Ghali 2010).

Dövme magnezyum alaşımı AZ31 ise, magnezyumun pek çok asit tarafından dağlanabilme özelliği nedeniyle matbaa sanayisinde foto-gravür uygulamalarında kullanılmaktadır (Polmear 2006).

2.1.3.a. Magnezyum alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları

Son yıllarda, magnezyum alaşımlarının yüksek özgül dayanımı nedeniyle yoğun olarak kullanıldığı mühendislik uygulama alanlarının başında otomotiv sanayisi gelmektedir (Friedrich and Mordike 2006; Czerwinski 2008). Otomotiv alanında yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında, taşıtlardan daha yüksek yakıt verimliliğinin elde edilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve hava kirliliğinin önlenmesi konularındaki çalışmalar önem kazanmaktadır (Eker 2008).

Dünya enerji kaynaklarının ve ekolojik dengenin korunması da dünya ülkelerinin gündemine girmiş olup, bunun için çok sistematik çalışmalar yapılmaktadır. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin mutlaka hafif, fakat aynı zamanda dayanımlı ve beklenen özellikleri güvenle karşılayan malzemeler kullanması zorunludur. Bu kapsamda özellikle otomobil üretiminde ağırlık azalması hedeflenmektedir. Çevreyi kirletmeden korumanın en etkili yollarından biri, kara ve demiryolu taşımacılığında CO emisyonunun azaltılmasıdır. Avrupa ve Kuzey Amerika'da otomobil üreticileri aldıkları bir kararla 2010 yılı itibariyle yakıt tüketimini %25 azaltmayı öngörmüşlerdir. Böylece CO emisyonunda da %30'luk bir azalma elde edileceği beklenmektedir (Eker 2008).

Genel olarak malzeme fiyatı Mg için eşdeğer malzemelerden % 35 daha fazladır. 2005'te fiyatlar Çin ve Avrupa pazarında 1600-1900\$/ton seviyelerindedir. Ancak yüksek hızlarda ve yekpare üretim kolaylığı sağladığı için hacimsel bazda düşünüldüğünde uygun denilebilecek fiyatlara sahiptir. Fe, Cu ve Ni'den arındırılmış yüksek saflıktaki magnezyum alaşımlarının korozyon direnci yüksektir. ASTM B-117 tuz sprej testinde bu direncini, soğuk haddelenmiş çelik ile kıyaslandığında, bunlara denk olduğu görülür.

Mükemmel sönümlenme kapasitesiyle birçok uygulama için titreşim ve gürültüyü azaltabilirler. Bu uygulamalardan biri de titreşime duyarlı elektronik ekipmanların bağlandığı montaj bloklarında yapılan titreşim testleridir.

Magnezyumun otomotiv sektöründe kullanılma sebeplerinden bazıları aşağıdaki gibidir.

- Elastik enerji absorblama karakteristiği, iyi darbe dayanımı ve çökme direnci sağlar. Bilinen kaynak yöntemleri ile veya perçinleme yoluyla birleştirmeye uygundur.
- İşlenebilirliği iyidir ve kuru olarak da işleme yapılabilir. Talaşlı işlenmesi konvansiyonel, düşük hacimli bir bir tezgâhta olabileceği gibi, yüksek kapasiteli bir CNC tezgâhta da olabilir. Çünkü kesme karakteristikleri istenildiği gibi seçilebilmekte ve talaşların kırılması konusunda herhangi bir sorun yaşanmamaktadır.
- Magnezyum çok reaktiftir fakat uygulanacak kaplamalarla veya sadece doğal olarak oluşumuna izin verilen magnezyum oksit veya magnezyum sülfat tabakaları sayesinde koruma sağlanabilir. Alaşımlar, kromatlama veya nikel kaplama gibi koruyucu veya dekoratif amaçlı çeşitli yüzey işlemlerine tabi tutulabilmektedir (Kaya vd 2002, Eker 2008).

Magnezyum, bugün Avrupa'da otomotiv sektöründe en çok Alman üreticiler tarafından kullanılmaktadır. Magnezyum kullanımı da Volkswagen fabrikalarının tarihi ile başlar. Volkswagen arabalarının ilk geliştirme çalışmalarında magnezyum, motor ve vites kutularında arka tekerleklerden tahrik alan kara taşıtlarının toplam ağırlığını ve arka aks yüklemelerini düşürmek için denenmiştir. Daha sonraları ise magnezyum alaşımlarının ekonomik avantajları giderek önem kazanmıştır. Bugüne kadar uygulamalar, daha çok yüksek fiyatlı otomobillerde ve spor araç sektörlerinde olmuştur.

Günümüzde magnezyum alaşımlarının otomotiv sektöründe kullanıma girdiği veya potansiyel kullanım alanı olarak görülebilecek iki ana grup vardır. Bunlardan birincisi magnezyum alaşımlarının halen kabul gördüğü şasi elemanları, dahili parçalar ve kaporta elemanları gibi yapısal elemanlar olup, bu uygulamalarda magnezyum alaşımları dayanım, süneklik, yorulma ve darbe dirençlerinin yeterli olmaları nedeniyle iş görebilirler. Örnek olarak koltuk iskeleti, direksiyon ve direksiyon kolunu bileşenleri, ayna yuvaları, jantlar, süspansiyon kolları, iç konsol, bagaj kapağı, gösterge paneli, fren ve debriyaj pedalları verilebilir. İkinci bir grup uygulama da, motor grubu ve transmisyon komponentlerinden oluşur. Birinci grubun özelliklerinin yanında, yüksek

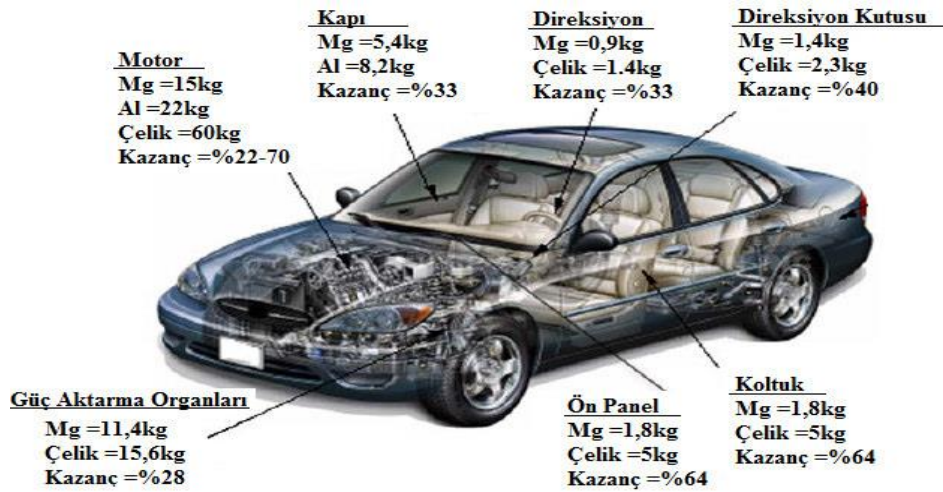
sıcaklıklar için sürünme ve korozyon dayanımı da gerektiren bu parçaların mevcut uygulamaları olmasına rağmen, alaşımları da gelişme sürecine devam etmektedir (Eker 2008).

Magnezyum ve Alaşımlarından Üretilmiş Otomobil Parçaları

- Jantlar
- ABS fren destek ve tutma braketi
- Geçme hava yastığı tutucuları
- Debriyaj gövdesi
- Koltuk yükselticisi
- Koltuk kızıakları
- Orta konsol
- Kapı içi koruyucu kirişler
- Jant göbeği
- İç kapı kolları
- Kol dayama yerleri
- Kapı kilidi gövdeleri
- Motor destek braketleri
- Endüksiyon sistemi yuvası
- Karter taban kısmı
- Silindir kapağı
- Yanma odaları
- Gösterge paneli destek kirişi
- Şanzıman gövdesi
- Emme manifoldu
- Far mesnedi
- Açılır tavan iskeleti
- Ventil
- Hava Filtresi
- Soğutma peteği

- Araç ön paneli
- Travers
- Kaporta

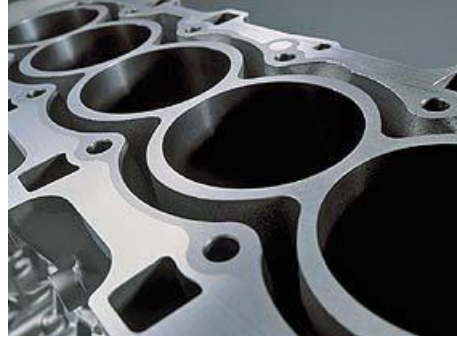
Otomobillerde kullanılan ön panel çelik ve plastik teknolojisi ile üretildiğinde 25-30 kg ve yaklaşık 60 parçadan oluşurken, magnezyum kullanılarak üretilen parça tek bir parçadır ve ağırlığı yalnızca 10 kg'dır. Bu sadece çok çarpıcı tek bir örnektir. Otomobilin her bir parçası böylesi uygulamalar için uygundur. Şekil 2.4'te bir otomobilin değişik kısımlarında magnezyum kullanımıyla elde edilen ağırlık kazancını göstermektedir (Eker 2008).



Şekil 2.4. Otomobil üretiminde Mg alaşımından dökülmüş parçalar (Watarai 2006).

Dişli kutuları, emme manifoldları, karterler, yağ pompası vb. gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan parçaların üretimi için Mg alaşımları bir potansiyel oluşturmaktadır. İçten yanmalı motor bloklarında alüminyum, yüksek sıcaklıklara dayanımı ve yüksek mekanik gerilmeleri karşılayabilmesi nedeniyle yaklaşık 50 yıldır kendine yer bulmaktadır. Günümüzde ise dökme demirin yerini almaya başlamıştır. Ancak, alüminyum motor bloğu dökme demirden yapılarına göre %66 hafifken, magnezyum blok ise %75 daha hafiftir. Daha hafif olmasının yanında yüksek şok ve çökme dayanımı vardır. Ayrıca alüminyuma göre ses ve titreşimi daha iyi sönümler.

Araçların en ağır parçası motorları ve motorun da ağırlıkça %20-25'i motor bloğu olduğundan, buradaki çalışma koşullarında fonksiyonelliğini koruyabilecek bir malzeme geliştirmek yıllardan beri otomotiv üreticilerinin değişmeyen hayali olmuştur. Bu sayede yakıt tüketimi ve gaz emisyonunda azalmaya gidilebilir (Eker 2008). Şekil 2.5'te magnezyum alaşımından üretilmiş bir motor bloğu resmi bulunmaktadır.

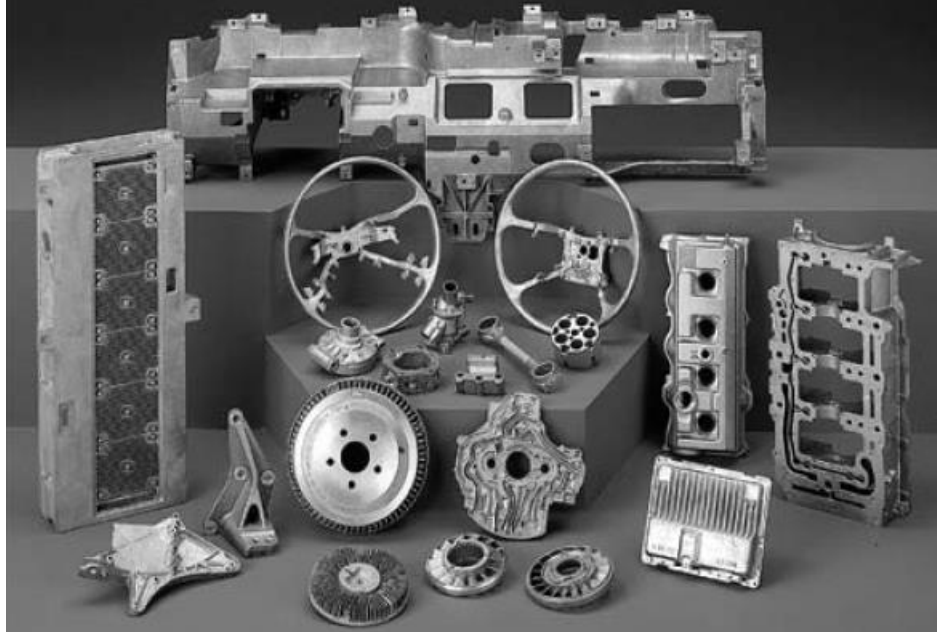


Şekil 2.5. Magnezyum alaşımından üretilmiş motor bloğu (Eker 2008).

Güncel örneklerle bakıldığında, VW'in yüksek mekanik ve termal özellikleri olan AMC-SC1 alaşımını Lupo' nun motor bloğunda kullandığı görülmekte olup 3 silindire sahip bu dizel motor bloğu 14 kg ağırlığındadır ve alüminyum versiyonundan %25 hafiftir. Audi'nin V8 Quattro modelinde de, motor bloğunda kullanılan magnezyum sayesinde araç diğer 8 silindirli benzerlerine göre 5 kg hafiflemiştir. 5 Mart 2005' de piyasaya çıkan 6. nesil BMW6 Serisinde de daha hafif altı silindirli magnezyum-alüminyum kompozit motor blok kullanılmıştır (Şekil 2.5). Serinin zirvesindeki model olan BMW 6.30i'de yer alan sıralı altı silindirli motor, önceki modeline göre 27 bg (20 kW) gibi önemli bir artışla 258 bg'lik (190 kW) bir motor gücü sunmaktadır. Bu özellikler; yeni 3 litrelik 161 kg ağırlığındaki bu motoru, segmentindeki en güçlü ve en hafif altı silindirli motor haline getirmiştir.

Manuel şanzımanlarda 125°C'nin altında olan çalışma sıcaklıkları otomatik şanzımanlarda daha yüksektir. Ford Motor Company de AZ91D alaşımdan yaptığı silindir kapağını araçlarında kullanmıştır. Magnezyum alaşımı silindir kapağı 1.15 kg ağırlığındadır.

Yarış arabalarında da süper sıcaklık özellikleriyle bilinen WE54 alaşımları kullanılmaktadır. Formula-1 arabalarının çoğunun motor parçalarında yerini almıştır. WE54 katkılı pistonların, zorlu yarış koşullarında gelecekte de önemli katkılar sağlaması beklenmektedir (Eker 2008).



Şekil 2.6. Magnezyum alaşımlarından üretilmiş bazı otomobil parçaları (Eker 2008).

2.1.3.b. Magnezyum alaşımlarının savunma sanayindeki kullanım alanları

Magnezyum alaşımları savunma sanayisinde de oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Talaşlı imalatta sadece düşük süneklikli Mg talaşlı islenmeye uygun olmasına rağmen kolay tutuşabilirliği nedeni ile tehlike arz etmektedir. Bu özellikleri ile magnezyum savunma sanayisinde de önemli ve kritik kullanım alanlarına sahip olmaktadır. Büyük tahrip gücüne sahip mühimmatlarda, radar donanımlarında, portatif yer donanımlarında ve stingray torpidolarında alevlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Çubuk şeklinde ekstrüze edilmiş magnezyum ise, anti tank mühimmatı olarak kullanılmaktadır. Standart 120 mm veya 100 mm lik mermileri ateşleme de mühimmata destekleyici olarak magnezyum katılmaktadır. Bu amaçla AZ80, AZ61 ve AZM alaşımlarının tozlarından faydalanılmaktadır. Ayrıca Mg yandığında beyaz ışık ve yoğun ısı ortaya çıkarır.

İnce ve atomize tozlar alevlendirici ve ordu donatım malzemesi olarak özellikle tehlike işareti ve aydınlatma amaçlı kullanılmaktadır. Askeri helikopterler ve uçakların korunmasında hedef yanılma amaçlı olarak Mg esaslı aygıtlar kullanılmaktadır. Ayrıca paraşütle atlayışlarda yerin görselleştirilmesinde bu aydınlatmalardan faydalanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar 2012).

2.1.3.c. Magnezyum alaşımlarının havacılık sektöründeki kullanım alanları

Havacılık sanayinde kullanılan metallerde istenilen en temel özellikler; hafiflik, dayanıklılık, şok-titresim ve korozyona karşı dirençtir. Hafiflik, yoğunluğunun azaltılması ile sağlanabilmektedir. Üretimde çoğunlukla alüminyum, çelik, titanyum, magnezyum ve bakır gibi metalik malzemeler kullanılmakta olup, metallerin saf hallerinin düşük mukavemet özellikleri nedeni ile havacılığın özel ihtiyaçlarını karşılanması neredeyse olanaksızdır. Günümüz araştırma ve geliştirme çalışmalarının esası; daha kullanışlı malzemeler elde edebilmek için yeni ve daha önce denenmemiş alaşımların geliştirilmesi çalışmalarıdır. Sektörün yoğun olarak üzerinde iyileştirme yaptığı özellikler şunlardır:

- Yanıcı olmaları,
- Yüzeyine herhangi bir koruyucu kaplama uygulanmadığında, korozif bir ortamda beyaz renkte kümecikler veya noktalar şeklinde korozyona uğramaları,
- Alaşımlarının yüzeylerinde oluşan oksit-karbonat filminin, korozif olmayan ortamlarda dahi yeteri derecede korozyondan korunma sağlayamamaktadır. Uygun koruyucu kaplama uygulandığında korozyon önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Öztürk ve Kaçar 2012).

Hafif parça kullanımı, yakıt tüketimini azaltmak amacıyla hizmet etmektedir. Hız ve güç gereksiniminin artması sebebiyle de hafiflik yanında daha dayanıklı malzeme kullanımı gerekliliği açıktır. Hava araçlarında Mg alaşımları üzerine yük binmeyen parçalarda aktif

olarak kullanılmaktadır (hidrolik depolar, yakıt depoları, vs.). Hidrolik depo ve quadrant AZ91 dökümdür. Depo hidrolik sistemi beslemekte, modele göre hava aracında 1-3 adet bulunmaktadır. Depolar hidrolik akışkanı depolayıp, çalışma şartlarına uygun şekilde hazırlayan tanklardır. Isınan hidrolik akışkanın kolayca soğutulmasını sağlamalıdır. Bu özellikleri ise AZ91 alaşımı gayet iyi bir şekilde sağlamaktadır. MD500, Eurocopter EC120, NH90 ve Sikorsky S92 gibi birçok helikopterin dişli kutularında ZE41 alaşımı, uydur parçaları için de AZ31, AZM ve AZ61 dövme alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztürk ve Kaçar 2012).

B-36 bombardıman uçağı toplam 8,6 ton ağırlığında olup yaklaşık 3,4 ton Mg alaşımlarından oluşmaktadır. Eğer Mg yerine Al kullanılmış olsa idi 4,5 tonluk bir ağırlık oluşturacaktı. S55 helikopterlerinde ZW3 alaşımı 115 kg civarında kullanılmıştır. Tamamen deneysel amaçla imal edilmiş olan F80C tümüyle Mg ile konstrükte edilmiştir (Öztürk ve Kaçar 2012). Yeni alaşım çalışmaları ile Mg hakkında bilinen parametreler ve böylece de günümüzde hava araçlarında kullanılabilir magnezyum alaşımlarının sayısı artmaktadır. Diğer avantajı da gürültü ve titreşimin azalmasıdır.

Ağırlık azaltılması temel bir konu olsa da, Mg alaşımları korozyon direncinin zayıf olması nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahip değildirler. Uzay endüstrisinde kullanılacak alaşımlar hem mekanik özellikler ve hem de korozyon direnci ile ilgili olan yüksek performans gereksinimini aynı anda sağlamak zorundadır. Günümüzde 20 adet standart Mg döküm alaşımı mevcut olmasına rağmen, bu alaşımlardan modern havacılık endüstrisinin gereksinimlerini karşılayacak olanlarının azlığı büyük bir engeldir (Wendt *et al.* 2004).

2.2. Korozyon ve Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu

2.2.1. Korozyon

2.2.1.a. Korozyonun tanımı ve önemi

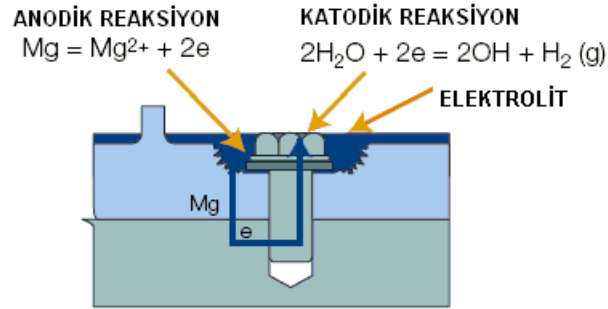
Korozyon, metalin içinde bulunduğu ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Bu tanıma bakılınca, oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre “kimyasal” ve “elektrokimyasal” olmak üzere iki çeşit korozyon olayından bahsetmek mümkündür. Kimyasal korozyon, metal ve alaşımlarının gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir (kuru korozyon). Metal ve alaşımlarının sulu ortamlar içindeki bozulmaları ise elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon) olarak adlandırılır. Gerçekte her iki korozyon türünde de elektrokimyasal mekanizma ile oluştuğu bilinmektedir (Şekil 2.7) (Doruk 1982).

Kimyasal metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp, normal şartlar altında bile korozyona uğrayabilir. Bütün metaller doğada mineral olarak buldukları hale dönüşmek eğilimindedir. Doğada mineraller, söz konusu metalin en düşük enerji taşıyan bileşiği yani en kararlı halinde bulunurlar. Bu mineraller özel metalurjik yöntemlerle ve enerji harcanarak metal haline getirilir. Ancak metallerin çoğu, element halinde, termodinamik olarak kararlı değildir. Uygun bir ortamın bulunması halinde üzerinde taşımış oldukları kimyasal enerjiyi geri vererek yeniden minimum enerji taşıyan kararlı bileşikler haline dönüşmek isterler. Bu sebeple korozyon olayı enerji açığa çıkararak kendiliğinden yürür. Bazı soy metaller hariç teknolojik öneme sahip bütün metal ve alaşımlar korozyona uğrayabilir (Doruk 1982; Çakır 1990; Üneri 1998).

Korozyonun doğrudan ve dolaylı olarak yol açtığı ekonomik kayıplar, önemini belirleyen en önemli göstergedir. Doğrudan ekonomik kayıplara örnek olarak, korozyona dayanıklı malzeme kullanımı, yüzey kaplamaları, etkinliğini azaltmak amacı ile saldırgan ortamlara yapılan ilaveler ve görevini yapamayacak derecede bozunmuş parçaların

yenileri ile değiştirilmeleri verilebilir. Dolaylı ekonomik kayıplar ise; korozyonun yol açtığı arızanın tamiri süresince tesisin servis dışı kalması, ürün kaybı ve bu ürünün yol açabileceği tehlike (çevre kirlenmesi ve yangın gibi), çözünen korozyon ürünlerinin elde edilen kimyasal madde içinde karışması sonucu oluşan ürün kirlenmesi ve korozyon için alınan aşırı önlemlerdir. Dolaylı kayıplar çoğu zaman görünen korozyon kayıplarından fazla olabilir.

Korozyonu tam olarak yok etmek mümkün olmaz. Alınan çeşitli önlemler ile korozyon hızı önemsiz sayılan derecelere indirilebilir. Bugün gelişmiş ülkelerde gayri safi milli hasılanın %4'ü metalik korozyon kayıpları için harcanmaktadır. Bu değerin teknolojik olarak az gelişmiş ülkelerde daha da fazla olması doğaldır. Bu nedenle korozyon ile yapılacak mücadelenin korozyon maliyetini azaltmasının yanında, ulusal ekonomi üzerinde de etkisi vardır (Yalçın ve Koç 1998).



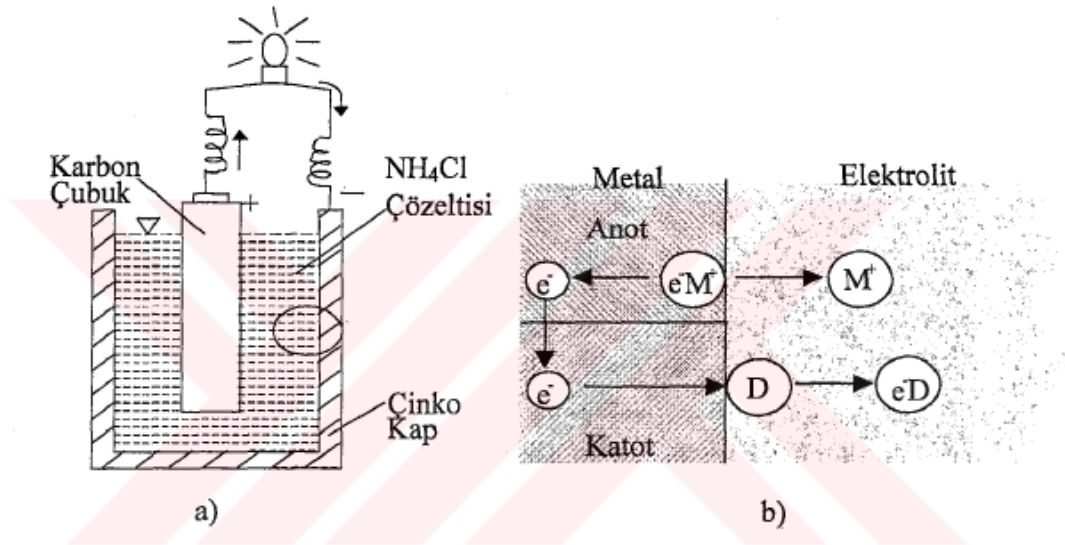
Şekil 2.7. Galvanik korozyon şeması (Hydro megnesium)

2.2.1.b. Korozyonun elektrokimyasal ilkeleri

Korozyon olayını elektrik enerjisi üretimde kullanılan pil modeli ile tariflemek kısıklık ve açıklık sağlar. Şekil 2.8'de görülen kuru pil; elektrik yüklü parçacıkların (yani iyonların) hareketine izin veren elektrolitle (çoğunlukla NH_4Cl çözeltisi), elektrik akımı iletebilen iki elektrottan (karbon çubuk ve çinko kap) oluşur. Elektrotların her ikisi de elektrolitle temas halindedir. Pilin elektrik enerjisi üretebilmesi için karbon çubuk ve çinko kabın metalik bir iletkenle birleştirilmesi yeterlidir. Böylece tariflenen pil düzeni içinde

gerçekleştirilen olay, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesidir. Bu dönüşüm elektrotla elektrolit ara yüzeyinde gerçekleşen olay 'kimyasal yükseltgenme' olarak nitelenir. Yani çinko çözünür ve serbest duruma geçen çinko iyonları belirli sayıda su molekülleri ile birleşerek ($Zn.nH_2O$) çözültüsüyle karışırlar. Buna karşılık karbon-elektrolit ara yüzeyinde gerçekleşen olay 'kimyasal indirgenmedir'. Bu iki olayın (reaksiyonun) toplamı, pil içinde gerçekleştirilen tüm kimyasal değişimi verir.

Yukarıda tariflenen düzeni korozyon hücresi olarak tanımlamak mümkündür. Korozyon hücresinin etkinliği, çinkonun çözünmesini (yani korozyona uğramasını), karbon çubuğun ise korozyona karşı korunmasını sonuçlar niteliktedir. Yüzeyinde kimyasal indirgenmenin olduğu elektrot 'katot' ve kimyasal yükseltgenme yolu ile çözünen elektrot ise 'anot' diye adlandırılır. Anodik olay, elektrik yükü sıfır olan (yani nötr) atomların belirli sayıda elektronu serbest bırakarak pozitif yüklü iyonlara dönüşmeleridir. O halde anodik olay, pozitif yüklü iyonlara paralel olarak, eşdeğer sayıda elektronların serbestleşmesine yol açacaktır. Elektrolit, elektronların geçişine olanak vermediğinden bunlar katı yolu izleyerek katot yüzeyine ulaşırlar ve katot-elektrolit ara yüzeyinde gerçekleşen olaylar (katodik olaylar) sonucu harcanarak kaybolurlar. İşte korozyon hızı (örneğin kuru pilde çinkonun çözünme hızı), katodik olayların hızı ile artacaktır. Katodik olayların hızı veya etkinliği elektron harcama yetenekleri ile ölçülür. Mevcut koşullar altında elektronların kaybolma hızı yavaşlamış veya sıfıra inmişse, korozyon hızı da aynı ölçüde yavaşlamış veya sıfıra inmiş olur. O halde, yeterli büyüklükte bir enerji engeli oluşturarak elektron harcama hızı sıfıra indirgenirse, metalin korozyona karşı tam bağımsızlığı sağlanmış olur.



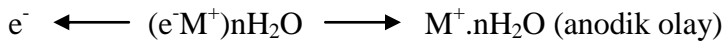
Şekil 2.8. Korozyonun elektrokimyasal oluşum düzeni a) Pil, b) Korozyon hücresinde gerçekleşen olaylar (Altun 2006).

Pil veya korozyon hücresi içinden geçen elektrik akımın taşıyıcıları katı yol içinde elektronlar, elektrolit içerisinde ise iyonlardır. Yerleşmiş tanımlamaya göre, elektrik akımının katı yol içindeki yönü katottan anoda doğrudur (yani elektronların akış yönünün tersidir). Korozyon hızı (anodun çözünme hızı) hücreden geçen akım ile doğru orantılıdır. (Faraday'ın ikinci kanunu).

Korozyon hücresindeki karbon çubuk ile çinko kap arasındaki iletken bağı uzaklaştırdığımızda (açık devre koşulu), hücreden akım geçmesi düşünülemez. Ancak bu koşul, çinkonun çözünme hızının sıfır olmasını gerektirmez. Bunun nedeni, çinko yüzeyinde katot görevini üstlenecek özellikle mikroskobik alanların mevcut olmasıdır. O halde elektrikle temas eden metal yüzeyinin birbirleriyle kısa devre halinde olan çok sayıda mikro elektrotlardan oluştuğunu düşünmek mümkündür. Diğer bir deyişle, açık devre koşulu altında devam eden çinko çözümü, bu mikro anot ve katotlardan kurulu korozyon hücrelerinin faaliyetlerinden ileri gelmektedir. Faraday'ın ikinci kanuna göre, çinkonun korozyon hızı, hücrenin ürettiği akım yoğunluğu (korozyon akım yoğunluğu) ile doğru orantılıdır.

O halde tüm hücre etkinliği içinde şu üç olayı izlemek mümkündür:

a) Anodik olay: Metal atomlarının elektron kaybederek pozitif yüklü metal iyonlarına dönüşmeleridir. Anodik olay elektron üretir. Bu elektronların olay yerinden uzaklaştırılması mümkün değilse veya bu işlem yeterli hızla gerçekleşmiyorsa, anodik olayın tamamen durması veya hızının azalması gerekir.

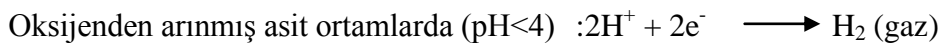


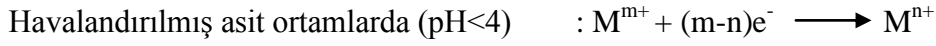
b) Katodik olay: Katodik olayın işlevi, anodik olayla üretilen elektronları harcamaktır. Katodik olayların oluşabilmesi için elektron yüklenebilen (yani indirgenebilen) iyon veya moleküllere ihtiyaç vardır. Katodik olayın hızı, bir yandan elektrolit içindeki indirgenebilen iyon ve moleküllerin konsantrasyonuna, diğer yandan da bunların katot yüzeyine ulaşım hızına bağlıdır.



c) Elektrik akım iletimi: Elektroit içinde akım iletimi, pozitif ve negatif yüklü tüm iyonların hareketini gerektirir. Pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) katoda, negatif yüklü iyonlar (anyonlar) anoda yönelmiş olarak hareket ederler. Korozyon sonucu metal üst yüzeyinde oluşarak tutunan tabak, iyonların geçişini önemli ölçüde engelleyebilir. Bu koşullar altında iç direncin yüksek değerlere ulaşması hatta korozyon hızını kontrol eden ana etken olması mümkündür.

Korozyon hücrelerinin kaynağı, farklı elektrokimyasal tutumları nedeniyle birbirinden ayrışarak anodik olay yanında, aşağıda verilen katodik olayların birinin (veya aynı zamanda bir kaçının oluşumları ile gerçekleşir (Doruk 1982);





2.2.2. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Davranışları

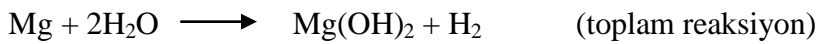
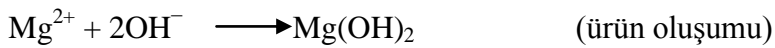
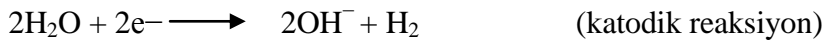
Magnezyumun, metal yüzeyinde oluşan gri oksit filmin koruyucu özellikte olması nedeniyle atmosferik korozyona karşı direnci yüksektir. Koruyucu filmin, metali saldırıya açık hale getirecek şekilde zarar görmesi durumunda korozyon meydana gelmektedir. Magnezyum alaşımlarının korozyonu neme bağlı olarak artış göstermektedir. Magnezyumun yüzeyinde bulunan oksit filmi, metali kırsal ve endüstriyel ortamlarda da büyük ölçüde korumaktadır (Friedrich and Mordike 2006; Ghali 2010) Magnezyum AZ31 alaşımının farklı atmosfer koşullarındaki korozyon hızı değerlerinin, alüminyum ile düşük karbonlu çelik arasında yer aldığı Çizelge 2.3'de görülmektedir (Polmear 2006; Seçgin 2013).

Çizelge 2.3. Levha alaşımlarının farklı atmosfer koşullarında 2,5 yıl süren korozyon testi sonuçları (Polmear 2006; Ghali 2010)

Malzeme	Korozyon Hızı (mm/y)	2,5 Yıl Sonra Çekme Dayanımı Kaybı (%)
<i>Deniz atmosferi</i>		
Al alaşımı 2024	0,002	2,5
Mg alaşımı AZ31	0,018	7,4
Düşük karbonlu çelik	0,15	75,4
<i>Endüstriyel atmosfer</i>		
Al alaşımı 2024	0,002	1,5
Mg alaşımı AZ31	0,028	11,2
Düşük karbonlu çelik	0,025	11,9
<i>Kırsal atmosfer</i>		
Al alaşımı 2024	0	0,4
Mg alaşımı AZ31	0,013	5,9
Düşük karbonlu çelik	0,015	7,5

Hillis and Reincheck ise yaptıkları çalışmada, tuz püskürtme testine ve Brazos Nehri Bölgesi'nde atmosferik koşullara maruz kalan çok düşük miktarlarda empürite içeren magnezyum AZ91 alaşımının, alüminyum 380 döküm alaşımından ve çelikten daha düşük korozyon hızlarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Havaya maruz kalan magnezyumun yüzeyinde oluşan gri oksit film, metali oksidasyona karşı korumaktadır. Sulu çözeltilerde ise magnezyum, su ile birlikte meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon sonucunda ayrışarak kristal $Mg(OH)_2$ kristal filmini ve hidrojen gazını oluşturmaktadır. Anodik (magnezyumun çözünmesi) ve katodik (hidrojen oluşumu) reaksiyonlar ile bunların toplamı olan genel korozyon reaksiyonu aşağıda görülmektedir. Malzeme üzerinde katodik reaksiyonun meydana geldiği bölgelerdeki fazla voltaj, magnezyumun korozyon davranışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Düşük fazla voltaja sahip olan katotlar, hidrojen oluşumunu kolaylaştırarak korozyon hızını arttırmaktadır.



Magnezyum alaşımlarının korozyon reaksiyonlarının, saf magnezyum ile benzerlik gösterdiği düşünülmektedir. Song ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Mg-Al-Zn alaşımının anodik çözünmesi sırasında magnezyumun çözelti içerisine çözünen temel bileşen olduğunu, az miktarda alüminyumun da çözüldüğünü, fakat çözeltilerde çözünmüş çinko bulunmadığını belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak, magnezyumun korozyonu ile ilgili dört reaksiyonun, magnezyum alaşımlarının korozyon prosesi için de geçerli olduğu söylenebilmektedir (Song and Atrens 1999, 2003; Seçgin 2013).

Oldukça aktif bir metal olan magnezyumun 25°C sıcaklıktaki standart elektrot potansiyeli -2,37 V'dir (Çizelge 2.5). Öte yandan, sulu klorür çözeltisi ya da nötr çözelti içerisindeki korozyon potansiyeli, oluşan Mg(OH)₂ filminin yarattığı polarizasyon nedeniyle -1,5 V'den biraz daha negatiftir (Ghali *et al.* 2004; Czerwinski 2008; Seçgin 2013).

Çizelge 2.4. Normal hidrojen elektrotuna göre 25°C'de bazı elementlerin standart elektrot potansiyelleri (Czerwinski 2008).

Elektrot	Reaksiyon	Potansiyel, V
Au, Au ³⁺	Au ³⁺ + e ⁻ → Au	1.50
Pt, Pt ²⁺	Pt ²⁺ + e ⁻ → Pt	1.20
Ag, Ag ⁺	Ag ⁺ + e ⁻ → Ag	0.80
Cu, Cu ²⁺	Cu ²⁺ + e ⁻ → Cu	0.34
H ₂ , H ⁺	H ⁺ + e ⁻ → H ₂	0.00
Sn, Sn ²⁺	Sn ²⁺ + e ⁻ → Sn	-0.14
Ni, Ni ²⁺	Ni ²⁺ + e ⁻ → Ni	-0.25
Co, Co ²⁺	Co ²⁺ + e ⁻ → Co	-0.28
Cd, Cd ²⁺	Cd ²⁺ + e ⁻ → Cd	-0.40
Fe, Fe ²⁺	Fe ²⁺ + e ⁻ → Fe	-0.44
Cr, Cr ²⁺	Cr ²⁺ + e ⁻ → Cr	-0.74
Zn, Zn ²⁺	Zn ²⁺ + e ⁻ → Zn	-0.76
Al, Al ³⁺	Al ³⁺ + e ⁻ → Al	-0.17
Mg, Mg ²⁺	Mg ²⁺ + e ⁻ → Mg	-2.37
Na, Na ⁺	Na ⁺ + e ⁻ → Na	-2.71
K, K ⁺	K ⁺ + e ⁻ → K	-2.92
Li, Li ⁺	Li ⁺ + e ⁻ → Li	-3.02

2.2.3. Korozyon Türleri

Korozyonun çeşitli türleri vardır: Öncelikle korozyon bölgesel (lokal) ve tek düze (homojen) olarak ele alınır. Mühendislik açısından daha önemli olan bölgesel korozyon üç ana başlık altında incelenir:

- 1) Gözle görülebilen korozyon (Makro Korozyon)
- 2) Mikroskopla görülebilen korozyon (Mikro Korozyon)
- 3) Karışık korozyon (Mikro+Makro Korozyon)

2.2.3.a. Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon genellikle sulu veya iletken bir ortamda iki farklı metalin birbirleri ile temas halinde bulunmasından dolayı veya aralarından, akım geçisine müsait bir ortamda bulunmalarından dolayı oluşan bir korozyon türüdür. Bu iki metal arasındaki potansiyel farkı korozyon için ilk atağı oluşturur ve korozyon hızı malzemelerin yüzey reaksiyonu ile ilgilidir. Daha aktif metal anot ve daha soy olan metal ise katot olur.

Akım ve korozyonu devam ettiren faktör ise, iki metal arasındaki potansiyel farkıdır. Kuru pil bu korozyon şekline iyi bir örnek teşkil eder (Şekil 2.8). Karbon elektrot soy yani korozyona karşı dirençli (katot) metal olarak rol oynar. Korozyona uğrayan çinko ise anottur. Anot olarak magnezyum da kullanılabilir (Fontano 1987; Kuşdemir 2008) .

Katodik malzeme bu gibi durumlarda ya hiç korozyona uğramaz ya da çok az korozyona uğrar. Elektrik akımından dolayı veya farklı iki metalin bulunuşundan dolayı bu tür korozyon galvanik veya metal çifti korozyonu diye adlandırılır.

Gerçek korozyon olaylarında iyonları ile denge halindeki saf metaller arasındaki galvanik çift nadiren teşkil eder. Galvanik korozyon etkileri, en çok korozyona uğrayan iki metalin elektriksel birleşmesi sonucunda meydana gelmektedir (Şekil 2.8 a). Ayrıca, mühendislik malzemelerinin çoğu alaşımlar olduğu için, galvanik çiftler genellikle alaşımlarda önem kazanmaktadır. Böyle alaşımlara ait, deniz ortamında galvanik korozyon testleri ve potansiyel ölçümleriyle hazırlanmış galvanik seri Çizelge 2.5'te verilmiştir. Metal ve alaşımların sıralanışı kendilerini meydana getiren elementlerin elektromotif kuvveti (EMK) serilerine benzer olarak yapılmıştır (Üneri 1998).

Elektromotif kuvvet serisi elektrokimyasal korozyonun temelini oluşturur ve elementlerin suda çözünme eğilimlerine göre düzenlenmiş bir sınıflamadır. Eğer iki metal bir elektrolite daldırılırsa ve elektriksel bir iletkenle birbirlerine bağlanırsa, bir elektrik çift oluşur.

EMK (electromotive force= elektromotif kuvvet) serisi bize sadece elektrokimyasal bir reaksiyon olup olmayacağını gösterir, fakat olursa ne hızda gerçekleşeceğini hiçbir zaman öngöremez.

Korozyon, ancak ortamda belirli bir metalin iyonlarına doygunluk söz konusu olup, metal yüzeyinde kristallesen kimyasal bileşiklerin olayı mekanik olarak engellemesi ile kısmen durabilir.

Galvanik dizi kullanılırken en önemli ilke şudur; birbirinden uzak olan metallerin eşlenmesi dizinin üst sonuna yakın metallerin hızla çözünmesine ve kısa bir sürede görevlerini yapamayacak ölçüde bozulmalarına yol açabilir. Bunun nedeni, dizide birbirinden uzaklaştıkça potansiyel farkın artmasıdır. Galvanik eşlemenin zorunlu olduğu hallerde dizide birbirlerine yakın metal ve alaşımların seçilmesi önem taşımaktadır (Doruk 1982).

Galvanik korozyon atmosferde de oluşur. Bu oluşan korozyon derecesi nem miktarına ve bulunduğu atmosferin nem çeşidine göre, önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Meselâ, deniz kenarındaki korozyon, iç kısımlardan daha fazladır. Deniz kenarında yoğunlaşan su, tuz içerir ve bu yüzden daha iletkenidir. Dolayısıyla daha koroziftir (Doruk 1982; Fontano 1987; Üneri 1998).

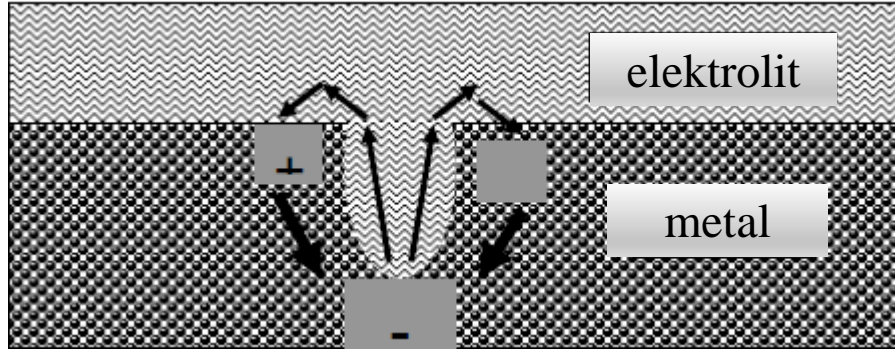
Çizelge 2.5. Galvanik seri (Doruk 1982; Üneri 1998).

Soy Metal Katodik Yön	Platin Altın Grafit Gümüş Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo) Hestallooy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo) 18-8 Mo paslanmaz çelik (pasif) 18-8 Paslanmaz çelik (pasif) Kromlu paslanmaz çelik %11-30 Cr (pasif) Inconel (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe) (Pasif) Nikel (pasif) Gümüş lehim Monel (70 Ni, 30 Cu) Bakır – Nikel (60-90 Cu, 40 – 10 Ni) Tunç (Cu - Sn) Bakır Pirinç (Cu - Zn) Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 18 Mo) Hestallooy B (60 Ni, 17 Cr, 15 Mo) Inconel (aktif) Nikel (pasif) Kalay Kursun Kursun – kalay lehimleri 18-8 Mo paslanmaz çelik (aktif) 18-8 Paslanmaz çelik (aktif)
Aktif Metal Anodik yön	Ni – Resist (yüksek nikelli dökme demir) Kromlu paslanmaz çelik %13 Cr (aktif) Dökme demir Çelik ya da demir 2024 alüminyum (4,5 Cu, 1,5 Mg, 0,6 Mn) Kadmiyum Ticari arı alüminyum (1100) Çinko Magnezyum ve magnezyum alaşımları

2.2.3.b. Oyuklanma Korozyon

Oyuklanma, açıktaki metal yüzeyleri üzerinde oluşan lokalize korozyon saldırısı olarak tanımlanabilir. Oyuklanma belirli bir ortamda, metalin potansiyeli, metal oksit filminin anodik çözünme (oyuklanma) potansiyelini geçtiğinde gerçekleşir. Belirli bir ortamda, metalin anodik oyuklanma potansiyeli, korozyon potansiyeline eşit veya daha düşük ise, spontane, yani kendi kendine, bir oyuklanma oluşması beklenmelidir. Metaller ve alaşımları yüzeylerinde oluşan oksit ürünleri etkisi ile korunabilirler. Bu nedenle, metalin korozyon direnci, metalin içinde bulunduğu belirli ortamda yüzeyinde oluşabilen oksit tabakasının devamlılığına ve koruyuculuğuna bağlıdır. Çoğunlukla korozyon saldırısı yine de devam eder, ancak korozyon hızı ihmal edilebilir bir seviyeye iner. Bu duruma pasif durum denir: Metal, yüzeyinde pasif film oluşması ile korunmalı bir hale gelir. “Pitting potential”, yani oyuklanma (çukurcuk) gerilimi (potansiyeli), oyuklanmanın başladığı, “volt” cinsinden verilen potansiyeldir. Oyuklanma geriliminden daha düşük gerilimlerde dahi pasif film yer yer bozulur ve oyuklanmanın başladığı yerlerde akım yoğunluğu çok yükselir, ancak yeni bir oksit filmi oluşması ile “yara iyileşir”. Metalin pasifleşmesi gerçeği, hiç çözünmeyeceği anlamına gelmez. Korozyonu oluşturan itici güç her zaman vardır, ancak pasif filmin oluşmasıyla çözünme yavaşlar. Pasif tabakadaki Cl⁻ iyonları film tabakasını zayıflatır, böylece “pitting”, yani oyuklanma (çukurlasma) korozyonu başlatırlar ve ortamda Cl⁻ iyonları bulunmaması, film tabakasının bu tür korozyona karşı daha dirençli hale gelmesini sağlar (Doruk 1982; Çakır 1990; Yalçın ve Koç 1991; Üneri 1998).

Oyuk içindeki en derin yerdeki metal atomlarının iyonize olarak çözeltilmeye geçmesi ile oyukun daha da derinleşmesi söz konusudur (Şekil 2.9). Bu tür korozyon oldukça hızlı gerçekleşebilir ve harabiyet düzgün bir yüzeyde beklenenden çok daha erken meydana gelebilir. Yüzeyin parlatılması, çoğu kez çukurcuk korozyonuna önemli etki yapar. Oyuklanma korozyonu ya da yerel korozyon parlatılmış yüzeylerde bilinmiş ya da asitle aşındırılmış yüzeylerden daha az olur. Genellikle parlatılmış yüzeylerde oluşan çukurcuklar daha büyüktürler ve pürüzlü yüzeylerde oluşanlardan daha çabuk metal içine islerler (Üneri 1998).



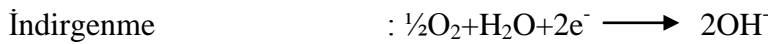
Şekil 2.9. Oyuklanma ile oluşan bir korozyon hücresi (Kuşdemir 2008).

Çukurun dibi bir anot görevi görürken, çukur ağzındaki yüzeyler katot görevi görmektedirler. İyonik akım elektrolitten geçerken, elektronik akım metalden geçer.

2.2.3.c. Aralık Korozyonu

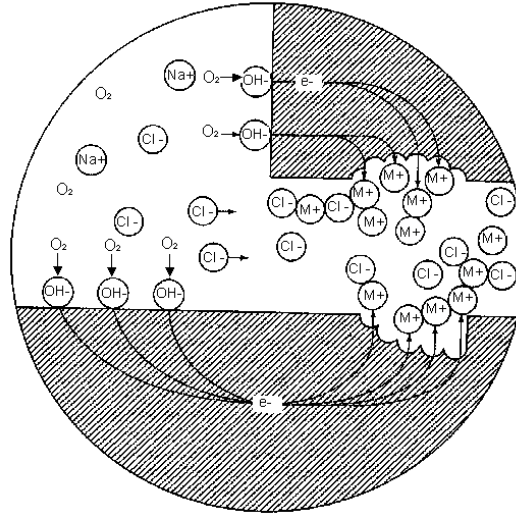
Genellikle sızıntı nedeniyle dar aralıklarda oluşan bir korozyon türüdür. O_2 'nin az olduğu yer anot, çok olduğu yer katot olarak davranarak korozyon gerçekleşir (Şekil 2.10). Bir alaşımın homojen olmaması korozyonu hızlandırır (Schutz and Thomas 1992). Böyle bir durumda, aynı metalin rastgele farklı bölgelerinde anodik, başka bölgelerinde katodik alanlar oluşabilir.

Aralık korozyonun oluşma mekanizması, metalin çözünmesi ve oksijenin hidroksil (OH^-) iyonuna indirgenmesi ile olur.



Başlangıçta, aralıkların içinde ve bütün yüzeyde bu tepkimeler aynı biçimde yürürler. Metal ve çözültide yüklerin korunma ilkesi korunur. Metal iyonunun oluşması sırasında salınan her elektron hemen oksijenin indirgenmesi için harcanır. Kısa bir süre sonra aralık içindeki oksijen, ulaşımın (konveksiyon) sınırlı olması nedeniyle, tükenir ve

böylece bu bölgede oksijenin indirgenmesi durur, bu korozyon durumunda herhangi bir değişme oluşturmaz. Çünkü aralık içindeki yüzey genellikle dış yüzeye oranla çok küçüktür ve böylece toplam oksijen indirgenme hızı hemen hemen değişmemiş olarak kalır. Bu nedenle oksijenli ve oksijensiz korozyon hızı aynı kalır. Oksijenin tükenmesi çok önemli ve dolaylı bir etki oluşturur. Bu etki zamanla daha etkin olur. Oksijen tükendikten sonra kapalı bölgede oksijen indirgenmesi olmaz, ama metal çözünmesi Şekil 2.10'da gösterildiği gibi artar. Aralık içindeki potansiyel metal yüzeyine (katot) aralık yüzeyine karşı ancak 50-100 mV daha büyüktür. Yine de aralık içinde metal çözünmesi (anot) artar (aktif bölge). Bu artışla aralık içinde artı yükler (M^{2+}) çoğalır ve bu artış klorür iyonlarının bu dolaya göç etmesiyle dengelenir.



Şekil 2.10. Aralık korozyonu (Doruk 1993).

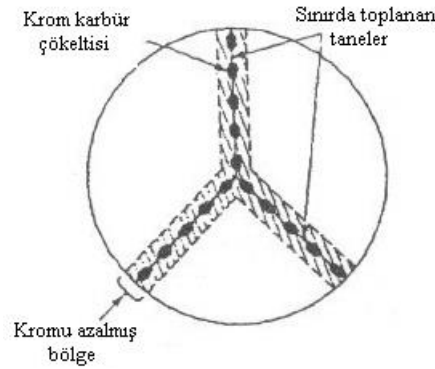
Alkali metal dışındaki metal tuzları, metal klorür ve sülfatları da içinde olmak üzere suyu hidrolizlerler (Üneri 1998).

Aralık bölgesindeki metal, anot gibi davranmakta ve galvanik pil oluşumu sonucunda çözünmektedir. Anotta aşırı pozitif iyonların oluşumuna yol açan bu durum klorür iyonlarının aralık bölgesine ulaşması ile dengelenmektedir. Aralık bölgesinde oluşan metal-klorür kararsızdır ve küçük miktarlarda HCl oluşturacak kadar reaksiyona girmeye hazırdır. Başlangıçta oluşan bu reaksiyonlar çok yavaştır. Ancak çatlakın sınırlı

hacmi içinde pH değerini 2-3 gibi çok düşük seviyeye çekebilmektedir. Bu durum, yeni oluşan korozyon potansiyelini şiddetli hale getirinceye kadar hızlandırmaktadır. Ortam sıcaklığının artması ile Cl^- iyonlarının konsantrasyonunun artması, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun azalması ve artan pH değerleri aralık korozyonu hassasiyetini de artırmaktadır (Bloyce *et al.* 1998).

2.2.3.d. Taneler arası korozyon

Tanelere göre tane sınırları daha aktif yapıya sahiptir. Bu durum iki farklı ortam oluşturur. Bir paslanmaz çelik belirli bir sıcaklığa ısıtılıp soğutulduğunda, Cr, C ile reaksiyon meydana getirir. $Cr_{23}C_6$ 'lar tane sınırlarına çöker, dolayısıyla tane sınırlı Cr'ce fakirleşir ve bu bölgeler Cr'ce zengin tane içleri ile bir galvanik çift oluşturarak çözünürler. Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür (Şekil 2.11). Bu çelikler yüksek sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulursa veya kaynak yapılırsa, çelik içinde bulunan C ile Cr, $Cr_{23}C_6$ bileşiğini oluşturur. $Cr_{23}C_6$ kendisi korozyona uğramaz. Ancak, taneler arasındaki sınır bölgelerinde birikerek bu bölgeleri korozyon açısından zayıf bir hale getirir (Doruk 1982; Çakır 1990; Yalçın ve Koç 1991; Üneri 1998).



Şekil 2.11. Paslanmaz çelikte taneler arası $Cr_{23}C_6$ çökeltisi (Yalçın ve Koç 1991).

2.2.3.e. Gerilmeli korozyon

Bir malzemenin korozyonla birlikte, dış yüklerin oluşturduğu statik çekme gerilmelerinin veya artık çekme gerilmelerinin etkisi altında hasara uğramasına “gerilmeli korozyon

çatlamaşı” adı verilir. Gerilmeli korozyon çatlamaşı (GKÇ) malzemede çatlaklar oluşturarak dayanımını azaltan bir korozyon şeklidir (Eryürek 1993). GKÇ’nin sebep olduğu yapısal kırılma genellikle ani ve beklenmediktir. Kılcal çatlakların tespiti güç olduğundan önceden fark edilemez. Birkaç saat gibi kısa bir servis süresinde ortaya çıkabildiği gibi birkaç hafta ya da uzun bir servis ömründen sonra da meydana gelebilir. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, gerilim altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamaşına neden olur (Yalçın ve Koç 1991). Olay üç aşamada oluşur.

- 1) Çatlak oluşumu
- 2) Çatlak ilerlemesi
- 3) Zoraki kırılma

GKÇ genel olarak şu özelliklere sahiptir.

a) Çekme gerilmesi gereklidir. Bu gerilme:

- Dış yüklerden,
- Soğuk şekil verme nedeniyle doğan iç gerilmelerden,
- Isıl işlem, kaynak vb. nedeniyle doğan iç gerilmelerden,
- Montaj sırasında oluşan kaçıklıklar nedeniyle doğan gerilmelerden meydana gelebilir.

b) Bazı istisnalar dışında bu olaya sadece alaşımlar maruz kalır, saf metallerde görülmez.

c) Verilen bir alaşımda olaya özgü bir elektrolit bulunmalıdır.

d) Alaşım statik yük altında sünek kırılma gösterse bile gerilmeli korozyonla gevrek olarak kırılır.

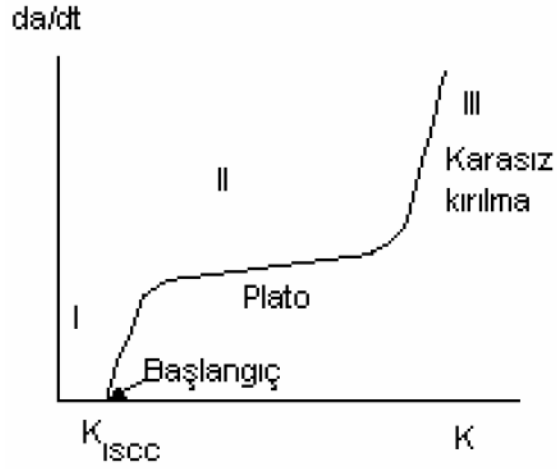
e) Malzeme ve ortama özgü bir “eşik gerilme şiddet faktöründe” gerilmeli korozyon oluşmaz.

f) Katodik koruma GKÇ'nı engellemede etkilidir.

g) Alaşımın cinsine, mikro yapısına ve ortama bağlı olarak, gerilmeli korozyon çatlakları taneler arası, tane içi veya karışık tip şeklinde ilerleyebilir. Çatlaklar mikroskobik seviyede sık sık dallanmaya uğrarlar (Eryürek 1993).

Gerilmeli korozyonunun görünür kanıtları, malzemede doğal gevreklik etkisi yaratan çatlaklardır. Gerçekte gerilmeli korozyonla bozulan bir metal, bu malzeme için normal süneklik standartlarına uygundur. Bu şekilde davranışın nedeni, normal olarak sünek malzemenin neden olduğu durumların kombinasyonu olan, özel bir çevre, yeterli büyüklükte bir çekme gerilmesi ve genellikle alaşımın bileşim ve yapı şartlarındaki özel metalürjik gereksinimlerin bulunmasıdır (Kumru 2004).

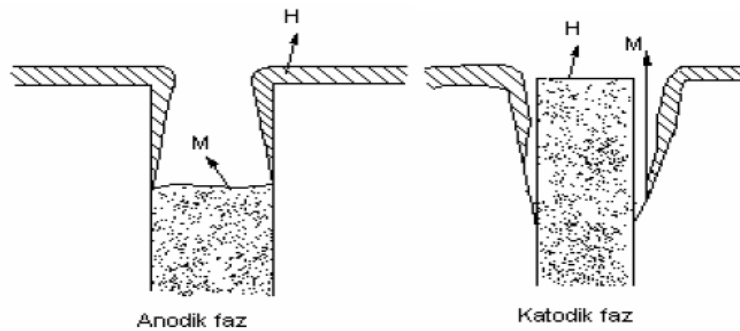
Çatlak ucundaki gerilme yoğunluğu faktörünün K_{ISCC} 'nin bir fonksiyonu olarak GKÇ'ndeki çatlak büyüme hızının ölçümü, çatlak gelişimini üç bölgede gösterir (Şekil 2.12). Birinci bölgede çatlak büyümesi, K 'nın güçlü bir fonksiyonudur. Bu bölge K_{ISCC} 'nin tespit edilmesine yardımcı olur fakat eşik değerinin büyüklüğü çok düşük olabilir. İkinci bölgede çatlak büyümesi aslında K 'dan bağımsızdır, fakat hala sıcaklık ve çevre tarafından güçlü bir şekilde etkilenir. Yatay büyüme hızı tek basına çevresel çatlak büyümesi yoluyla alaşımın çevre sistemini sürdürmek için mümkün olan en yüksek değerdedir. Bu hızlar genellikle makul bir tasarım ömrünü sağlamak için çok hızlı olan 10^{-9} ile 10^{-6} m/s dir. Burada da/dt olarak gösterilen üçüncü bölge, K ile güçlü bir şekilde değişir. K , K_{ISCC} 'ye yaklaşırken çatlak büyüme hızı kararsız hale gelir (Dieter 1988).



Şekil 2.12. Saldırgan bir çevrede sabit yük altında çevresel yardımın üç aşaması (Dieter 1988)

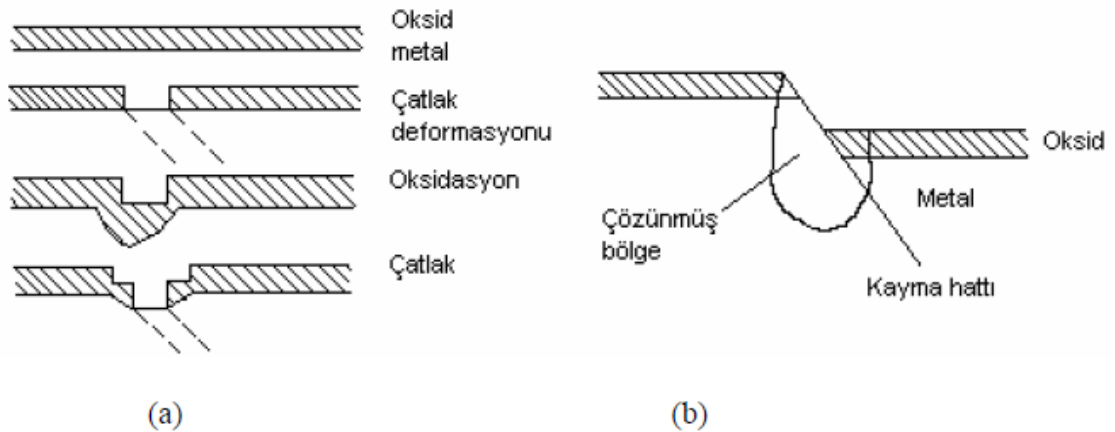
Gerilmeli korozyon çatlığının yayılma şekilleri:

Kolay etkilenen bir malzemedeki gerilmeli korozyonunu meydana gelmesi için bir çekme gerilmesi ve çözünme işlemi gerekir. Gerilmeli korozyonu meydana getiren bu sınır durumlar içinde, korozyonun bulunmaması durumundaki gerilme altında kırılma ve gerilmenin bulunmaması durumunda korozyon tarafından kırılma da tanımlanmış olacaktır. Gerilmeli korozyonu meydana getiren bu uç değerler arasında ne kadarlık korozyon işlemi, metale gerilim uygulanmasıyla etkilendiği ve ne kadarlık kırılmanın, korozyon tarafından kolaylaştırıldığını açıklamak gereklidir (Shreir *et al.* 1976; Kumru 2004).



Şekil 2.13. Önceden hazırlanmış aktif yörünge mekanizması (H: katodik hidrojen) (Shreir *et al.* 1976).

Çatlakların, çözünme kontrollü işlem yoluyla yayılabildiği iki farklı durum vardır. Alaşım, ayrılma veya çökelti olarak genellikle galvanik hücre kurulmasına neden olan tane sınırlarında yapısal özellikler sergileyebilir. Çökelti veya ayrılma lokal hücre içinde anot rolü oynayabilir veya etkili bir katot rolüyle doğrudan doğruya komşu matris üzerinde çözünmeye neden olabilir (Şekil 2.13). Özellikle tane sınırları, kimyasal heterojenlik için potansiyel alanlardır. Önceden mevcut aktif yörüngelerin olmadığı veya çıplak metale maruz bırakmak için koruyucu yüzey filminin kesilmesiyle çalışmadığı yerler, ikinci bir çatlak yayılma mekanizması olarak sonuçlanabilir. Bu yüzden metalin temelinde yatan gerilme, Şekil 2.14’de şematik olarak gösterildiği gibi aktif metalin maruz kaldığı koruyucu filmin kesilmesine sebep olabilir. Aktif yörünge boyunca çatlak yayılmaları zorlamanın kesilmesi ve filmin tekrar kurulması şeklinde periyodik olarak üretilir (Shreir *et al.* 1976).



Şekil 2.14. Zorlanmayla oluşmuş aktif yörünge mekanizması (Shreir *et al.* 1976).

(a) Genellikle film kopma modeli ve (b) kayma basamağı çözünme modeli olarak bahsedilir. Her iki durumda büyüme, çözünme yoluyla; filmin kırılması hız kontrol kademesidir, çatlak büyüme mekanizması değildir.

Gerilmeli korozyon çatlamaında çevresel faktörler

Gerilmeli korozyon çatlamaı için çevresel faktörler büyük çoğunlukla özel durumlardır. Gerilmeli korozyon çatlamaını ilerletmek için, alüminyum ve titanyum esaslı veya

kolayca koruyucu film geliştiren östenitik paslanmaz elik gibi yüksek oranda korozyon dirençli alaşımları bulmak gerekir. Diğer yandan karbon çelikleri veya magnezyum esaslı alaşımlar gibi düşük korozyon dirençli metalleri çatlatmak için kendi kendine kısmen pasifleşen bir çevrenin varlığı gerekir. Birçok kimyasal reaksiyonda olduğu gibi gerilmeli korozyon olayı da artan sıcaklıkla hızlanır. Mg alaşımları gibi sistemlerde çatlama oda sıcaklıklarında meydana gelir. Başka sistemler için kaynama sıcaklığı gereklidir. Çatlamaya meyilli alaşımların çoğu en az 100 °C’de çatlamaya başlar (Shreir *et al.* 1976).

Gerilmeli korozyon çatlamasının önlenmesi:

Gerilmeli korozyon çatlamasını kontrol stratejisinde; tasarım aşamasında ise başlama ve malzeme seçimine odaklanmak, gerilmeyi sınırlamak ve çevreyi kontrol etmektir (Kumru 2004).

1). Gerilmenin Azaltılması:

GKÇ’nin gereklerinden biri parçalarda gerilmenin varlığı olduğu için, kontrol metotlarından biri de bu gerilmeyi yok etmek veya en azından GK için eşik gerilme değeri altına düşürmektir. Bu, genellikle çalışma gerilmeleri için mümkün değildir, fakat çatlamaya neden olan gerilmenin kaynak ya da şekillendirme esnasında ortaya çıkan iç gerilme olması halinde mümkündür (Kumru 2004). Bu ise i gerilmelerin temperleme ile giderilmesi, kesitlerin karşılaştırılması veya yükün azaltılmasıyla mümkündür. Adi karbon elikleri 595-650 °C sıcaklıklarında gerilme giderme ısıl işlemine tabi tutulurlar. Ostenitik paslanmaz eliklerse 815-930°C arasında temperlenerek gerilme gidermeye maruz bırakılırlar (akır 1990).

2). Ortamın Zararlı Maddelerden Arındırılması:

Çevrenin kontrolü yoluyla GK’nı kontrol etmenin en direkt yolu, probleme neden olan çevrenin bileşimini yok etmek ya da değiştirmektir. evre üzerinde bir miktar kontrol

ettiğimiz aktif türler varsa, o zaman zor olmasına rağmen aktif türleri kaldırmak uygun olabilir (Kumru 2004). Orta derecede korozif ortamlarda fosfatlar, organik ve inorganik korozyon koruyucuları başarıyla uygulanmışlardır. Koruyucu yeterli miktarda olmalıdır, aksi halde bölgesel korozyon ve oyulma korozyonlarına fırsat tanınmış olur (Çakır 1990).

Ayrıca malzemeyi kaplama ve çevreden etkili bir şekilde izole etme yoluyla GKÇ önlenir (Kumru 2008).

3). Alaşım Değiştirmek:

Ne çevre şartlarının ne de gerilimin değiştirilemediği durumlarda uygulanır. Örneğin 304 tipi paslanmaz çeliğin uygun olmadığı durumlarda nikelce zengin çelikler (inkonel) kullanmak adet olmuştur. Karbon çelikleri genel korozyona, paslanmaz çeliklerden daha az dayanıklıdır. GKÇ'ye karşı ise durum tam tersidir ve dolayısıyla GKÇ'ye sebep olan durumlarda karbon çelikleri paslanmaz çeliklere tercih edilir. Örneğin deniz suyuyla temasta olan ısı değiştiricileri genellikle adi karbon çelikleridir (Çakır 1990).

4). Katodik Koruma Uygulamak:

Eşlenen metallere daha aktif bir metalin elektriksel olarak bağlanmasıyla uygulanan katodik koruma yönteminde, korozyon, aktif metal üzerinde yoğunlaşır ve sistemin daha soy olan metallere oluşan kısmı korozyona karşı korunur (Eryürek 1993). Katodik koruma, çatlama ve hasarın sadece GKÇ'den kaynaklandığı durumlarda uygulanmalıdır, aksi halde hidrojen kırılabilirliği, uygulanan katodik akımla artacaktır (Çakır 1990).

2.2.4. Magnezyum alaşımlarında gerilmeli korozyon çatlama ve gerilmeli korozyon deneyleri

Magnezyumda meydana gelen gerilmeli korozyon çatlama genellikle tane boyunca (transgranular) gerçekleşmektedir. Bazı durumlarda, Mg-Al-Zn alaşımlarında tane

sınırları boyunca bulunan Mg₁₇Al₁₂ fazları nedeniyle ise, taneler arası (intergranular) gerilmeli korozyon çatlamaşı görölmektedir. Alüminyum ve çinko gibi alaşımların ilave edilmesi, gerilmeli korozyon çatlamaşının ilerlemesine sebep olmaktadır. Yapılan çalışmlar, pH değeriinin 10,2'nin üzerinde olduğu bazik çözeltilerde magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon çatlamaşına karşı oldukça dirençli olduğunu, klorür içeren nötr çözeltilerde ve saf suda ise alaşımda meydana gelen gerilmeli korozyon çatlamaşının arttığını göstermektedir (Song and Atrens 1999).

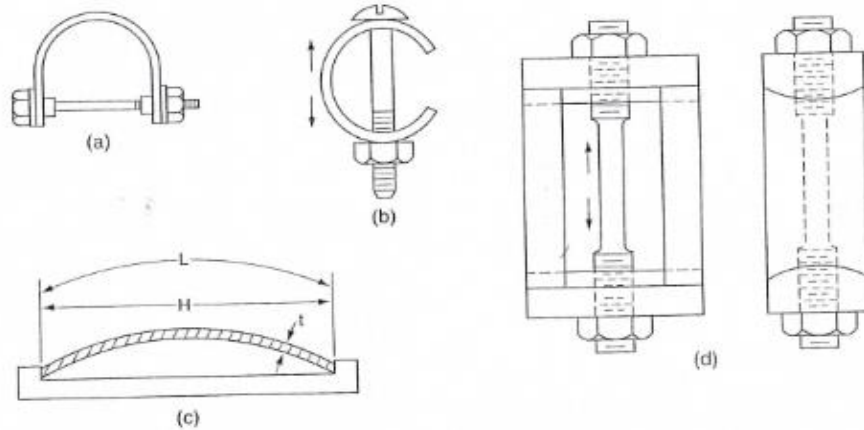
Gerilmeli korozyon deney yöntemleri:

Gerilmeli korozyon testleri birkaç şekilde yapılabilmektedir. Bunlar;

- 1.Sabit deformasyon deneyi,
- 2.Sabit yükleme deneyi,
- 3.Düşük deformasyon hızı deneyi.

1) Sabit deformasyon deneyi

Gerilmeli korozyon çatlamaşını ölçen parametre olarak hasar süresi kullanılmıştır. Sabit deformasyon numuneleri Şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Gerilmeli korozyon için sabit deformasyon numuneleri a)U-eğrisi b) C-halkası c)eğilme plağı d) Çekme (Jones 1996).

U-eğrisi numuneleri, sac veya çubuk şeklindeki numunelere bir mandal üzerinde civatanın sıkılmasıyla plastik deformasyona uğrattılır. U-eğrisi numune şekilleri, gerilmeli korozyon çatlağı için uygundur. En büyük dezavantajı gerilme dağılımlarının iyi olmamasıdır.

C-halka numuneler ise kalın levhalarda kullanılmakta ve civatanın sıkılmasıyla numunenin dış yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşturarak yapılmaktadır. C-halkası numunesinin avantajı, uygulanan gerilmenin akma dayanımının altında veya üstünde uygulanabilir olmasıdır (Jones 1996).

Çok ince dikdörtgen kesitli saclar içinse, eğilmiş numuneler kullanılmaktadır. Gerilme, akma dayanımının altında olduğu zaman, eğilmiş kiriş numunesinde maksimum gerilme dış yüzeyde oluşur (Jones 1996).

En karmaşık sabit deformasyon numuneleri, küçük yüklemelerin civata somunu ile sıkılmasıyla verilmektedir. Bu konfigürasyon gerilmenin kontrollü olarak uygulanması, ölçülmesi ve analizine müsaade etmektedir (Jones 1996).

Sabit deformasyon numuneleri çeşitli aralıklarla çözeltinin içine daldırılır ve gerilmeli korozyon çatlağı oluşumu gözlenir (belli periyotlarla numune çözeltinin içerisinden çıkarılır ve gözlem yapılır). Rastgele olmasına rağmen genellikle çekme düzleminde oluşan ilk çatlak kırılma zamanını göstermektedir. Sabit deformasyon numuneleri portatif, kompakt ve kolay üretilebilir. Bütün yükleme bağlantı elemanları numunede galvanik korozyon gerçekleşmemesi için izole edilmelidir (Jones 1996).

Sabit deformasyon deneylerinin en büyük dezavantajı çatlağın başlaması ve büyümesiyle yüklemenin gerilmeli korozyon çatlağının oluşmasını azaltmasıdır. Bu yüzden yükleme sona erme noktası korozyon çatlağının başladıktan sonra daha fazla büyümeden önce testin çatlağın görülebilir düzeye gelene kadar biraz daha fazla yüklemeye maruz kalmasıdır. Maksimum kırılma zamanını belirlemek güçtür çünkü çatlağın görünür hale gelmesi ve yayılmasını belirlemek gerekir (Jones 1996).

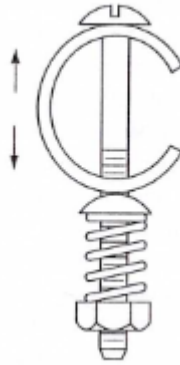
2) Uzun süreli yükleme testi deneyi

Deney boyunca numuneye sabit bir yükleme uygulanır. En basit yükleme sabit bir ölü yükün numuneye asılmasıyla gerçekleşmektedir (Jones 1996).

C-halkası numunesi uygun şekilde uzun süreli yükleme testi için bir sıkıştırma yayı kullanılmıştır. Çatlağın başlaması üzerine kesit alanı azalır ve uygulanan gerilme artar, uzun süreli yükleme altında çatlaklar büyür, ilerler ve çatlağın kırılmasıyla ölçülür.

Gerilme yüklemesinin uygulanması için halka aparatı kullanılmaktadır. Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Bu yükleme durumunda gerilmeli korozyon çatlağından önce numunede göz ardı edilebilir derecede küçük plastik deformasyon gerçekleşir. Bu halka aparatları sabit yükleme için gereklidir (Jones 1996).

Kırılma numune tutucularının deplasmanları mikroswitchlerle kaydedilip kırılma zamanı doğru olarak tespit edilebilir (Jones 1996).



Şekil 2.16. Uzun süreli yükleme testi deney numunesi C-halkası (Jones 1996).

3) Düşük deformasyon hızı deneyi

Düşük deformasyon hızı deneyleri artan teknoloji ile diğer gerilmeli korozyon deneylerinin yerini almaktadır. Standartlara uygun olarak hazırlanan çekme deneyi

numuneleri çok düşük deformasyon hızları uygun çekme cihazlarında uygulanarak yapılmaktadır. Çekme hızı 10^{-5} ve 10^{-7} s^{-1} arasında uygulanması gerekmektedir (Jones 1996). Hava ortamında düşük deformasyon hızlarında yapılan düşük deformasyon hızı deneyi (Slow Strain Rate Test) ile farklı ortamlarda yapılan Slow Strain Rate Test (SSRT) deneyi sonuçlarında elde edilen kırılma süreleri değerleri ile teste tabi tutulan ortamın gerilmeli korozyon indeksi (I_{SCC}) aşağıda ki şekilde tespit edilebilmektedir (Jones 1996).

Gerilmeli korozyon indeksi (I_{SCC})= İstenilen ortamdaki kırılma süresi / hava ortamındaki kırılma süresi.

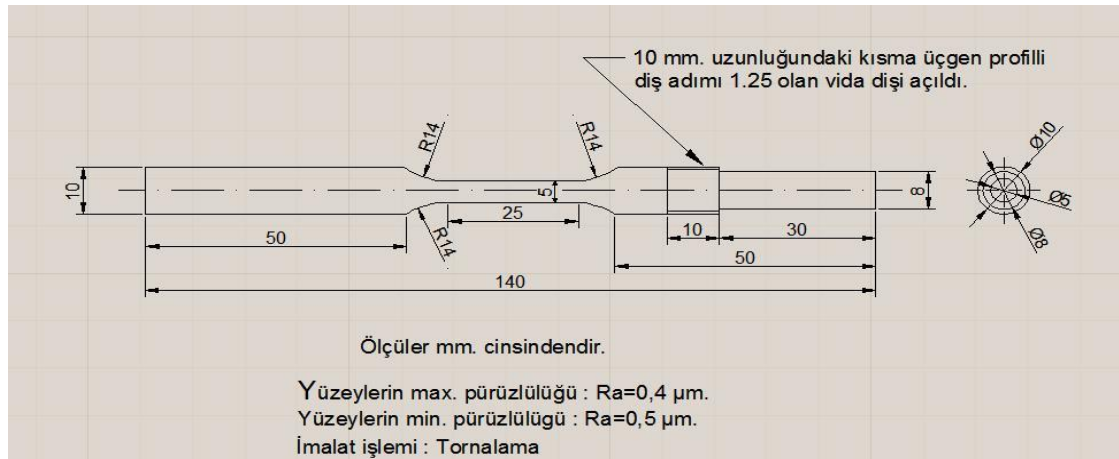
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

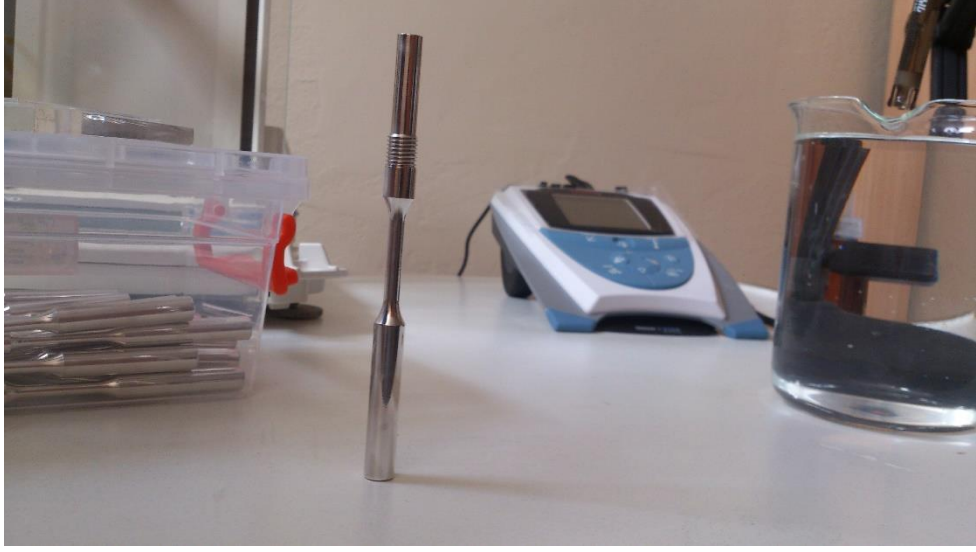
Deneysel kimsiyal bileşimi Çizelge 3.1’de verilen AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımları kullanılmıştır. Çizelgede, bileşim oranı %0.001’in altında olan elementler verilmemiştir. İşlenmemiş halde 16 mm çapında çubuk numuneler şeklinde alınan numuneler ASTM E 8 Test Method standartlarına uygun olarak (Standart Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) piyasada CNC tezgâhlarında işlettirilmiştir. İşlendikten sonra aşağıda teknik resmi Şekil 3.1’de verilen numuneler haline dönüştürülmüştür. Kullanılan magnezyum alaşımlarının işlendikten sonraki görüntüsü ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan magnezyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

Alaşım	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si
AZ31	3.069	1.133	0.486	0.019	0.001	0.131
AZ61	6.242	1.246	0.369	0.029	0.001	0.137
AZ91	9.231	1.348	0.286	0.012	0.004	0.148



Şekil 3.1. Kullanılan magnezyum alaşımlarının teknik resmi



Şekil 3.2. Kullanılan magnezyum alaşımlarının işlendikten sonraki görüntüsü

Korozyon Hücresi:

Gerilmeli korozyon hücresi için gerekli şartlardan bir diğeri korozif ortamın sağlanmasıydı. Bu korozif ortam Şekil 3.3'te gösterilen korozyon hücresinde oluşturulmuştur. Korozyon hücresi malzemesinin, korozyona karşı direncinin yüksek olması (korozyona uğramaması) gerekir. Bu sebeple hücre, korozyona karşı direnci yüksek olan fleksi glass malzemedен yapılmıştır. Korozyon hücresi 1 lt lik bir iç hacime sahip olup, numunelerin bağlanması için aşağısına vida kanalı ve üzerine ise 10 mm çapında bir delik açılmıştır.



Şekil 3.3. Korozyon hücresi

Çözeltiler ve pH metre:

Hazırlanan çözeltilerin pH değerleri Thermo firmasına ait bir pH metre ile ayarlanmıştır. Deneyler, asidik (pH=2), bazik (pH=11) ve nötr durumdaki %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde yapılmıştır.



Şekil 3.4. pH metre

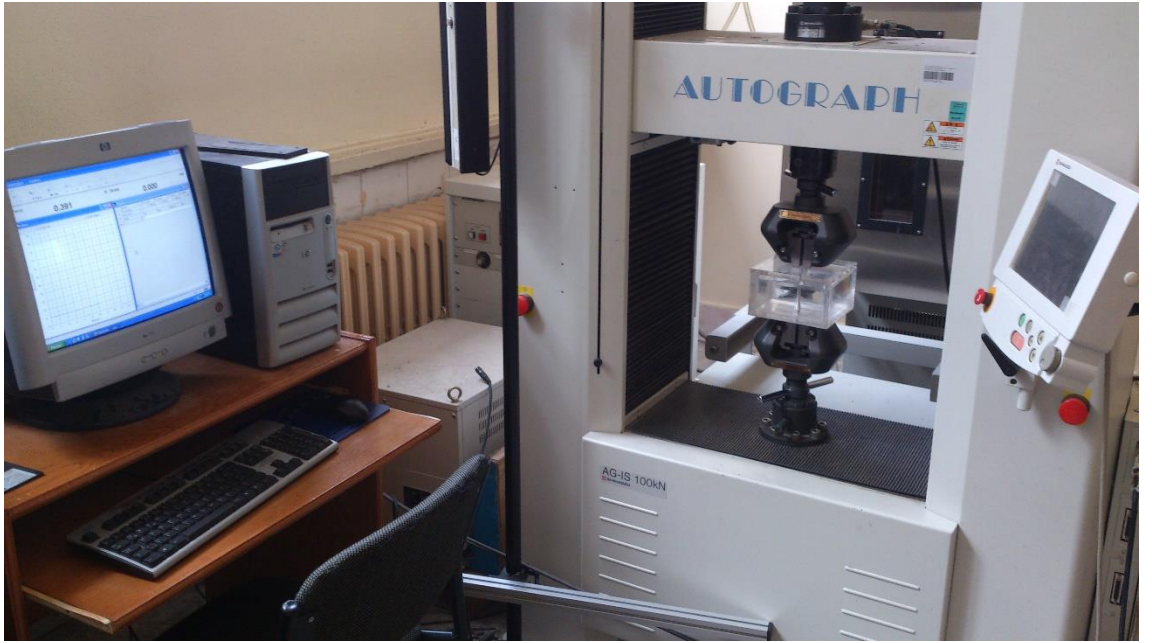
3.2. Yöntem

Bu çalışmada düşük deformasyon hızı deneyi (SSRT(Slow Strain Rate Testing)) uygulanmış ve alaşımların gerilmeli korozyon davranışları incelenmiştir. Deneyler ASTM G-129 00 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada düşük deformasyon Shimadzu marka universal çekme cihazı tarafından sağlanmış; korozif ortam ise yapay olarak çekme cihazı üzerine monte edilen korozyon hücresiyle asidik (pH=2), bazik (pH=11) ve nötr ortamlarla sağlanmıştır.

Üniversal çekme cihazı ile çok düşük deformasyon hızlarında yük uygulanarak ve numune üzerine tertibatlandırılmış (Şekil 3.7) korozyon hücresi içerisinde bulunan yukarıda belirtilen farklı korozif ortamlarda numuneler hasara uğratılmış ve malzemenin gerilmeli korozyon çatlağı indeksi hesaplanmıştır. Gerilmeli korozyon çatlağı indeksi iki şekilde belirlenebilir. Bunlardan ilki numunenin korozif ortamdaki kopma mukavemeti değerinin hava ortamındaki kopma mukavemet değerine oranının tespit edilmesi; ikincisi ise korozif ortamdaki numunenin kopma süresinin, hava ortamındaki numunenin kopma

süresine oranıyla tespit edilmesi şeklindedir. Gerilmeli korozyon çatlağı indeksi düşük olan malzemenin gerilmeli korozyon direnci düşük, indeksi yüksek olan malzemenin ise gerilmeli korozyon direnci yüksek demektir.

Deney sırasında çekme cihazının çene hızı $6,66 \times 10^{-7}$ olarak ayarlanmış, AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımları ilgili çözeltilerde test edilmiştir.

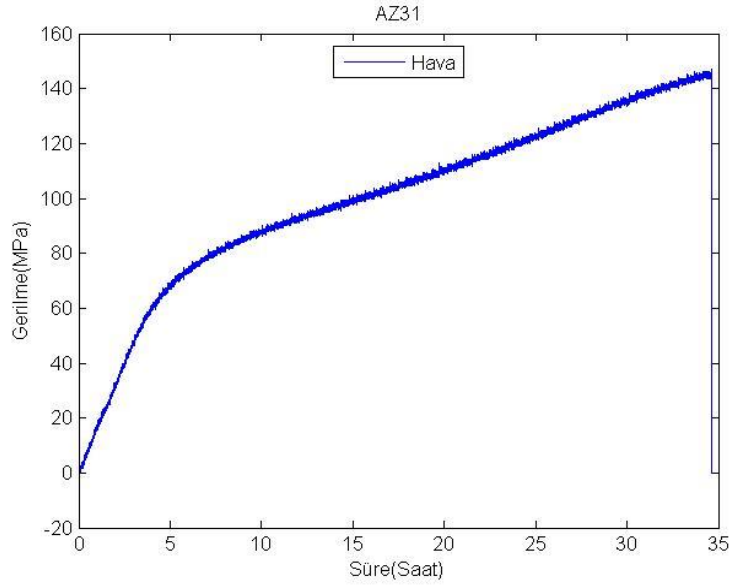


Şekil 3.5. Üniversal çekme cihazı ve korozyon hücresinin montaj edilmiş görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

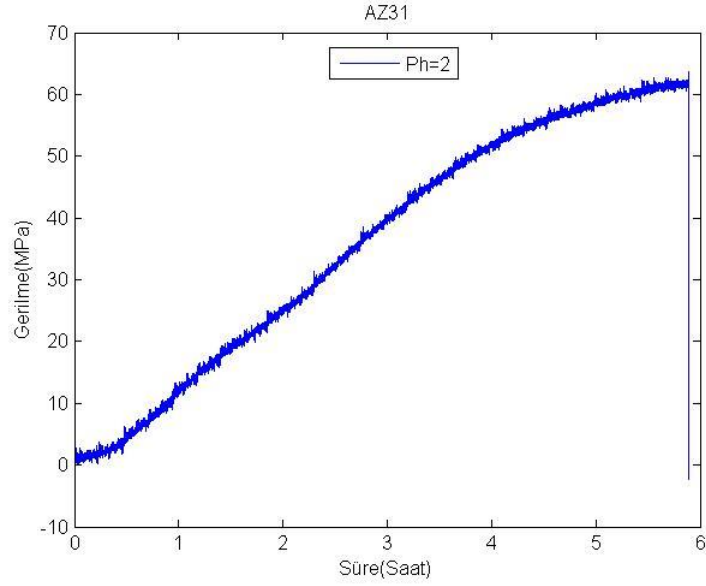
AZ31, AZ61 ve AZ91 alaşımlarının asidik (pH=2), bazik (pH=11) ve nötr %3,5 NaCl çözeltileri içerisindeki düşük deformasyon hızı (SSRT) sonuçları aşağıda grafiklerde verilmiştir.

4.1. AZ31 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar



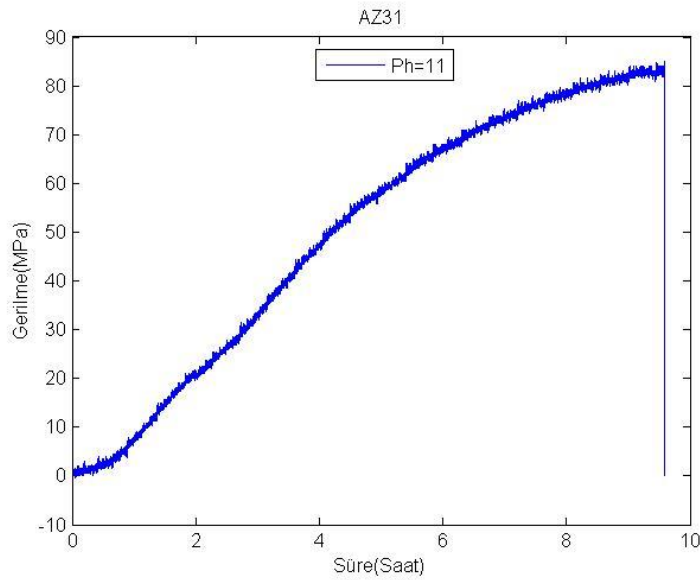
Şekil 4.1. AZ31 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.1’de verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımı hava ortamında SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 145.8 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 34.6 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.2. AZ31 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu

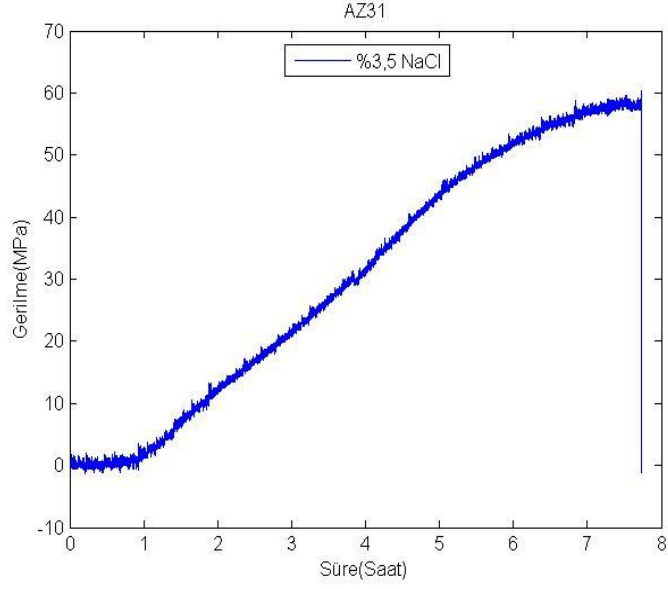
Elde edilen grafik Şekil 4.2’de verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımı asidik ortamda SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 64,9 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 5,9 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3. AZ31 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT test sonucu

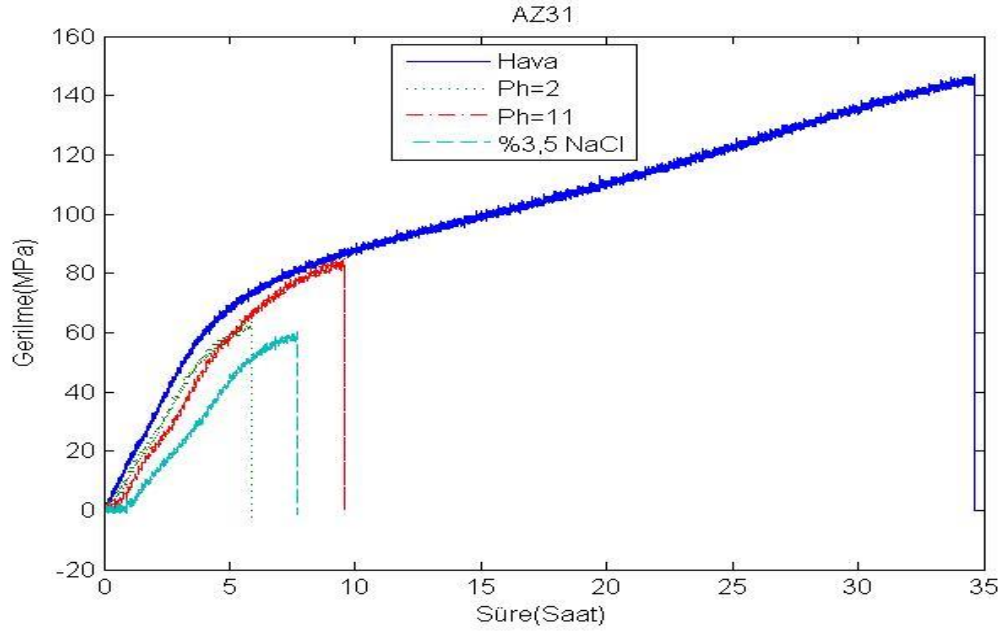
Elde edilen grafik Şekil 4.3’de verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımı bazik ortamda

SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 84,2 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 9,6 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4. AZ31 magnezyum alaşımının %3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu

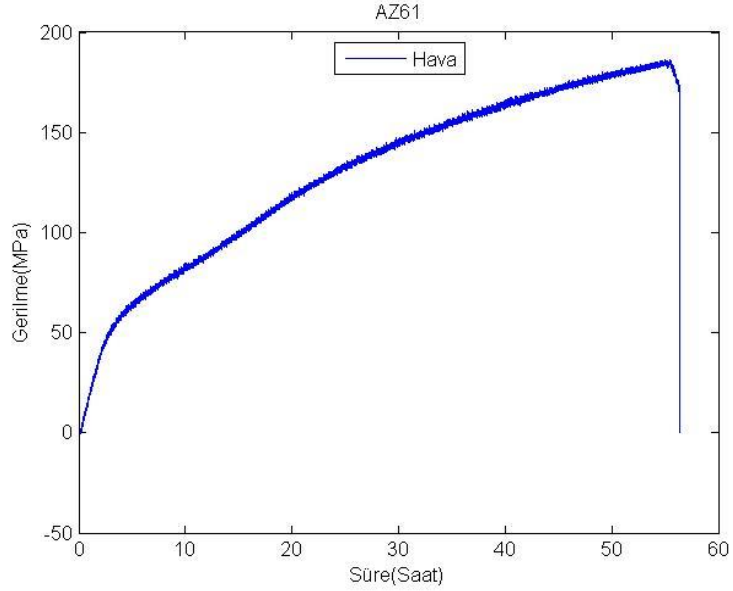
Elde edilen grafik Şekil 4.4'te verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımı nötr %3,5 NaCl çözelti ortamında SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 61,2 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 7,7 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. AZ31 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT test sonucu

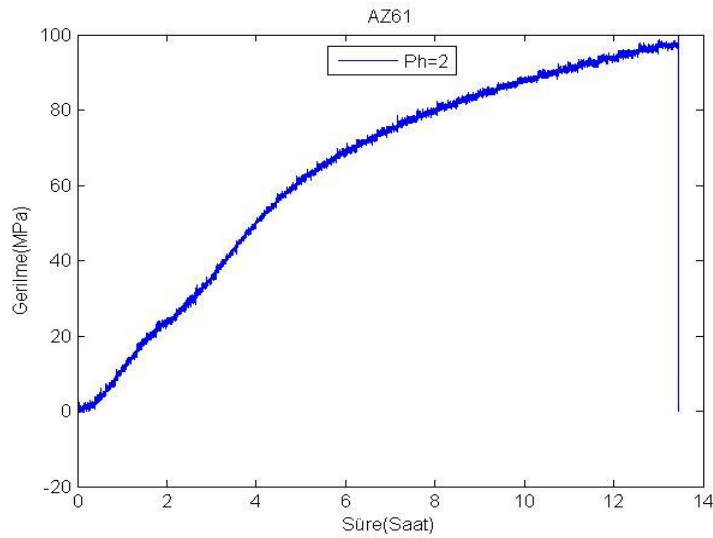
Şekil 4.5’de AZ31 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, pH=2 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 5,9 saat iken, pH=11 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 9,6 saat ve nötr durumdaki %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kırılma süresi 7,7 saattir. Dolayısıyla ortamın asidikliği arttıkça AZ31 magnezyum alaşımının kırılma süresi azalmıştır.

4.2. AZ61 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar



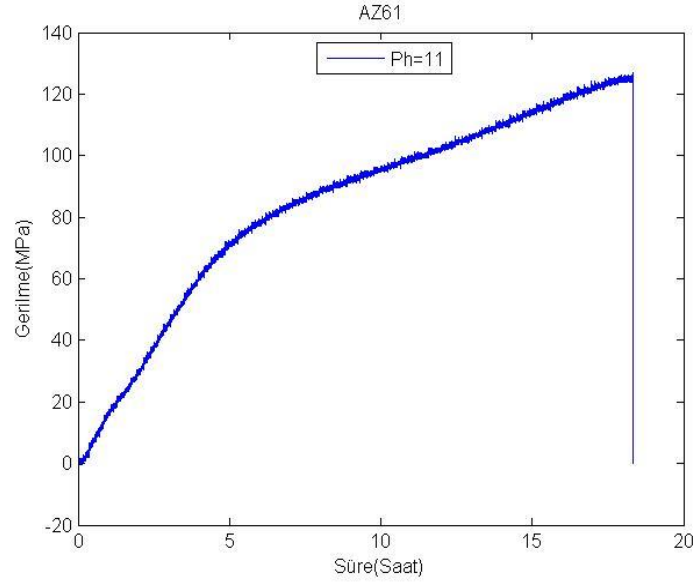
Şekil 4.6. AZ61 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.6’da verilmiştir AZ61 magnezyum alaşımı hava ortamında SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 186,2 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 56,40 saat olarak elde edilmiştir.



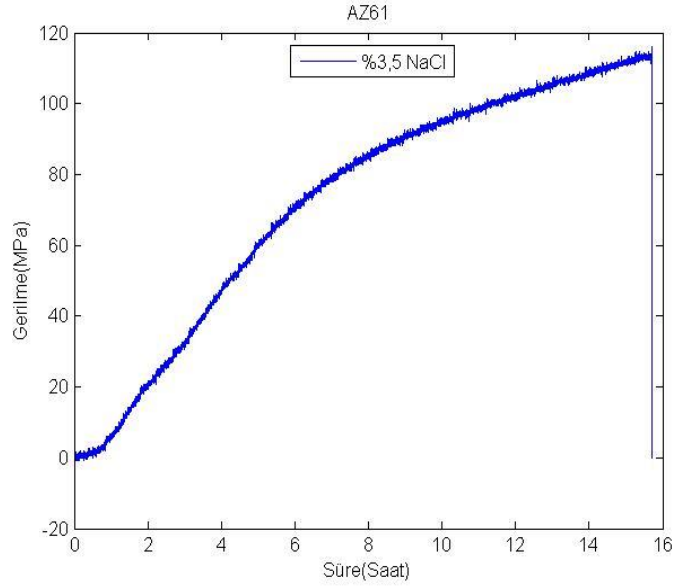
Şekil 4.7. AZ61 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.7’de verilmiştir AZ61 magnezyum alaşımı asidik ortamda SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 99,3 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 13,5 saat olarak elde edilmiştir.



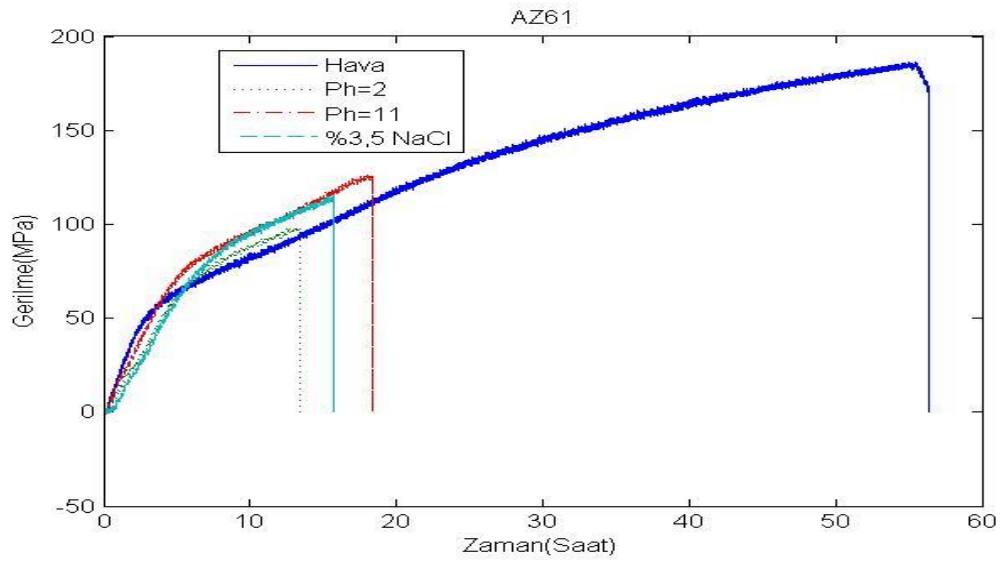
Şekil 4.8. AZ61 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.8’de verilmiştir AZ61 magnezyum alaşımı bazik ortamda SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 126,8 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 18,3 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9. AZ61 magnezyum alaşımının %3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu

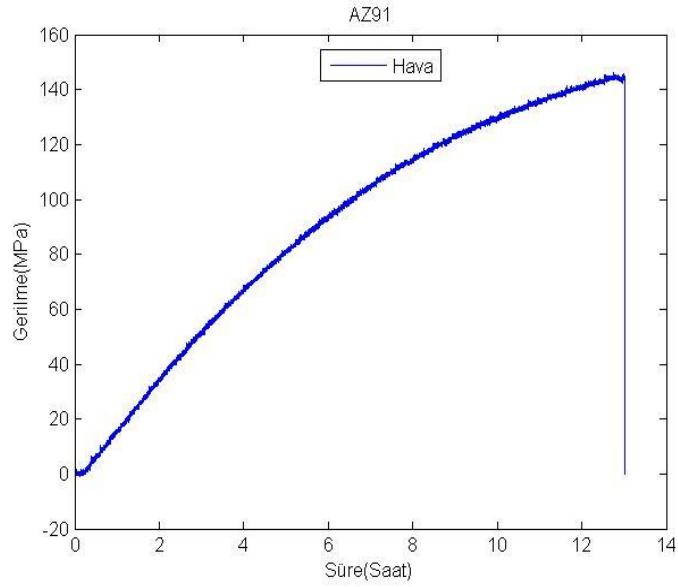
Elde edilen grafik Şekil 4.9’da verilmiştir AZ61 magnezyum alaşımı nötr %3,5 NaCl ortamında SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 115,7 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 15,7 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10. AZ61 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT test sonucu

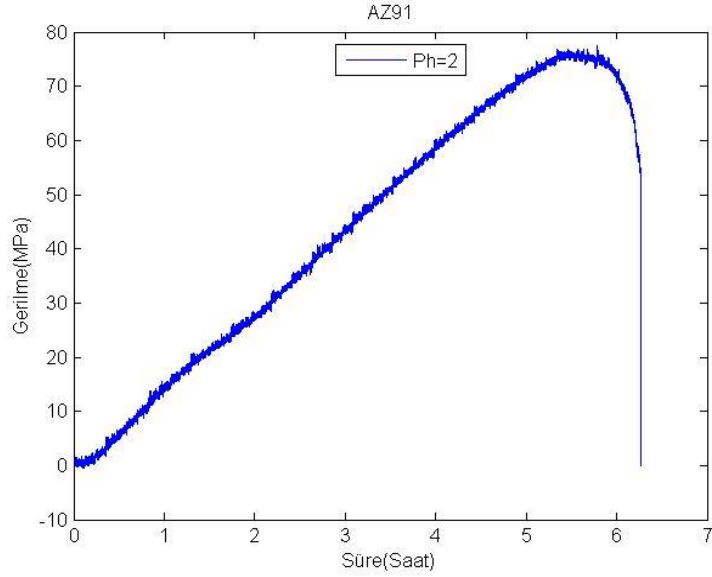
Şekil 4.10'da AZ61 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, pH=2 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 13,46 saat iken, pH=11 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 18,34 saat ve nötr durumdaki %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kırılma süresi 15,71 saattir. Dolayısıyla ortamın asidikliği arttıkça AZ61 magnezyum alaşımının kırılma süresi azalmıştır.

4.3. AZ91 Magnezyum Alaşımına İlişkin Sonuçlar



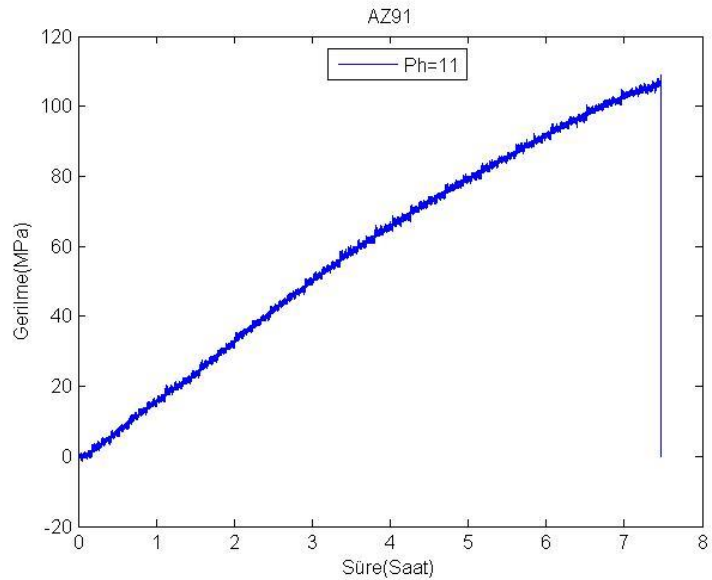
Şekil 4.11. AZ91 magnezyum alaşımının hava ortamındaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.11'de verilmiştir AZ91 magnezyum alaşımı hava ortamında SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 146 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 13 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. AZ91 magnezyum alaşımının asidik ortamdaki SSRT test sonucu

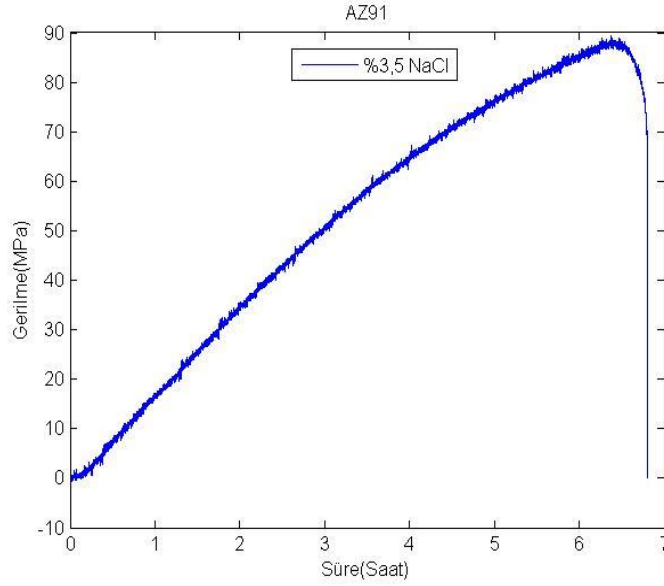
Elde edilen grafik Şekil 4.12’de verilmiştir AZ91 magnezyum alaşımı asidik ortamda SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 77,5 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 6,3 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13. AZ91 magnezyum alaşımının bazik ortamdaki SSRT sonucu

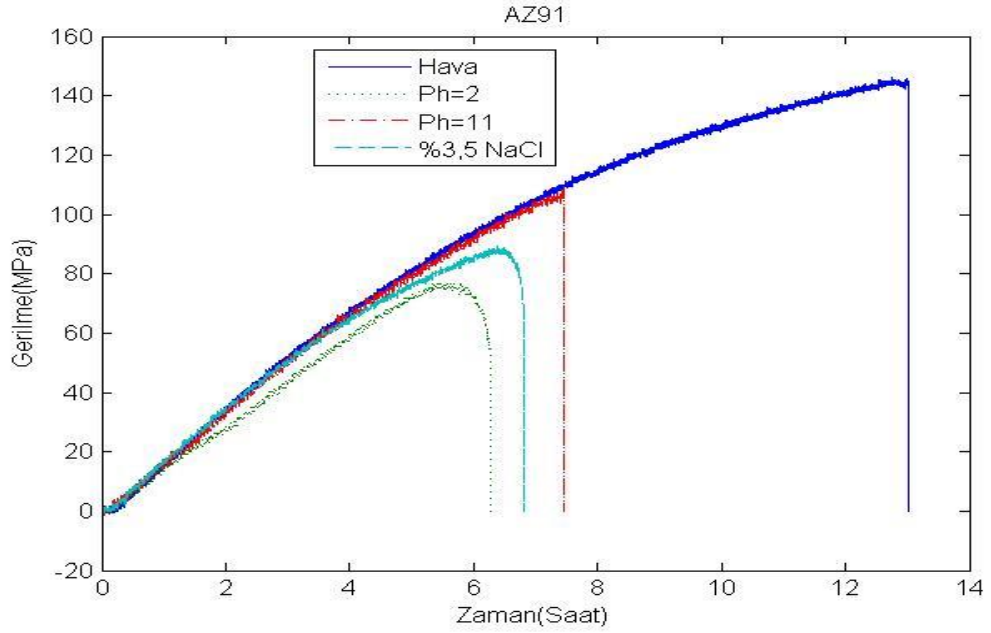
Elde edilen grafik Şekil 4.13’de verilmiştir AZ91 magnezyum alaşımı bazik ortamda

SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 106,8 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 7,5 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. AZ91 magnezyum alaşımının %3,5 NaCl ortamdaki SSRT test sonucu

Elde edilen grafik Şekil 4.14'te verilmiştir AZ91 magnezyum alaşımı nötr %3,5 NaCl ortamda SSRT deneyine tabi tutulmuş ve yapılan deney sonucunda kopma mukavemeti yaklaşık olarak 89,4 MPa ve kırılma süresi yaklaşık olarak 6,8 saat olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.15. AZ91 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT test sonucu

Şekil 4.15'te AZ91 magnezyum alaşımının değişik ortamlardaki SSRT sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, pH=2 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 6,3 saat iken, pH=11 olan çözelti içerisinde numunenin kırılma süresi 7,5 saat ve nötr durumdaki %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kırılma süresi 6,8 saattir. Dolayısıyla ortamın asidikliği arttıkça AZ91 magnezyum alaşımının kırılma süresi azalmıştır.

4.4. Ortamların Magnezyum Alaşımlarının Gerilmeli Korozyon Direncine Etkileri

Malzemelerin gerilmeli korozyon dirençleri gerilmeli korozyon indeksleri (I_{sc}) bulunarak belirlenmektedir. Aşağıda değişik ortamlarda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon dirençleri bulunmuştur.

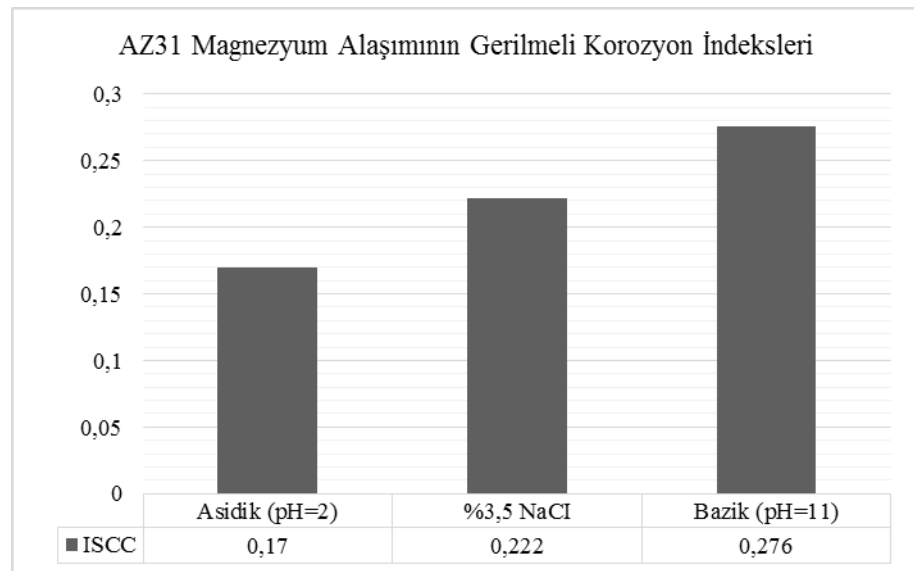
4.4.1. AZ31 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksi

AZ31 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi AZ31 magnezyum alaşımının %3,5'luk

NaCl çözeltisi içerisindeki SSRT testi sonucunda, gerilmeli korozyon indeksi (I_{SCC}) en düşük asidik (pH=2 olan) ortamda ve en yüksek bazik (pH=11 olan) ortamda elde edilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımının çalışan ortamların üçünde de (hem asidik, hem bazik ve hem de nötr ortamlarda) gerilmeli korozyona karşı hassasiyete sahip olup, gerilmeli korozyon direncin en az olduğu (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en fazla olduğu) ortamın asidik ortam olduğu tespit edilmiştir. Gerilmeli korozyon direncinin en yüksek (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en az) olduğu ortamın ise bazik ortam olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1. AZ31 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri

AZ31		Kırılma Süreleri (saat)	I_{SCC}
		Hava	34,62
	Asidik (pH=2)	5,89	0,170
	%3,5 NaCl	7,72	0,222
	Bazik (pH=11)	9,58	0,276



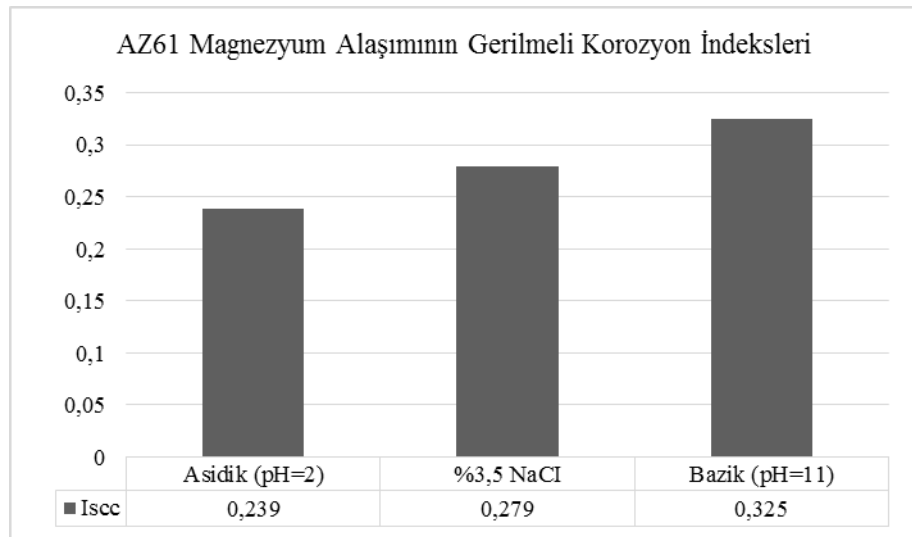
Şekil 4.16. AZ31 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indekslerinin grafik gösterimi

4.4.2. AZ61 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon değerleri

AZ61 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, AZ61 magnezyum alaşımının %3,5'lük NaCl çözeltisi içerisindeki SSRT testi sonucunda, gerilmeli korozyon indeksi (I_{sc}) en düşük pH=2 olan asidik ortamda ve en yüksek pH=11 olan bazik ortamda elde edilmiştir. AZ61 magnezyum alaşımının çalışan ortamların üçünde de (hem asidik hem bazik ve hem de nötr ortamlarda) gerilmeli korozyona karşı hassasiyete sahip olup, gerilmeli korozyon direncin en az (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en fazla) olduğu ortamın asidik ortam olduğu tespit edilmiştir. Gerilmeli korozyon direncinin en yüksek (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en az) olduğu ortamın ise bazik ortam olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.2. AZ61 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri

AZ61		Kırılma Süreleri	I_{sc}
		(saat)	
	Hava	56,40	
	Asidik (pH=2)	13,46	0,239
	%3,5 NaCl	15,71	0,279
	Bazik (pH=11)	18,34	0,325



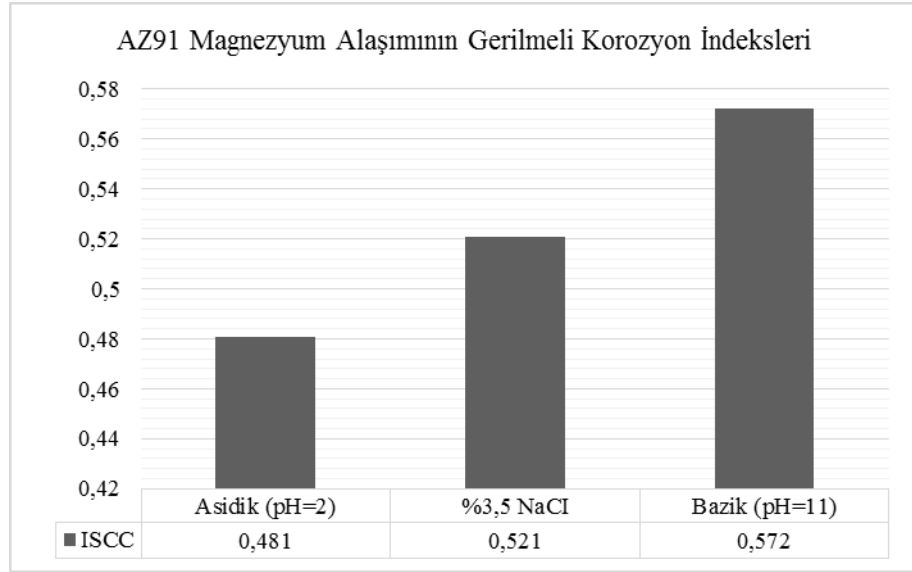
Şekil 4.17. AZ61 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indekslerinin grafik gösterimi

4.4.3. AZ91 Magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon değerleri

AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.18’te verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi AZ91 magnezyum alaşımının %3,5’luk NaCl çözeltisi içerisindeki SSRT testi sonucunda, gerilmeli korozyon indeksi (I_{sc}) en düşük asidik (pH=2) olan ortamda ve en yüksek bazik (pH=11) olan ortamda elde edilmiştir. AZ91 magnezyum alaşımının çalışan ortamların üçünde de (hem asidik hem bazik ve hem de nötr ortamlarda) gerilmeli korozyona karşı hassasiyete sahip olup, gerilmeli korozyon direncin en az olduğu (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en fazla) ortamın asidik ortam olduğu tespit edilmiştir. Gerilmeli korozyon direncinin en yüksek (ya da gerilmeli korozyon hassasiyetinin en az) olduğu ortamın bazik ortam olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.3. AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indeksleri

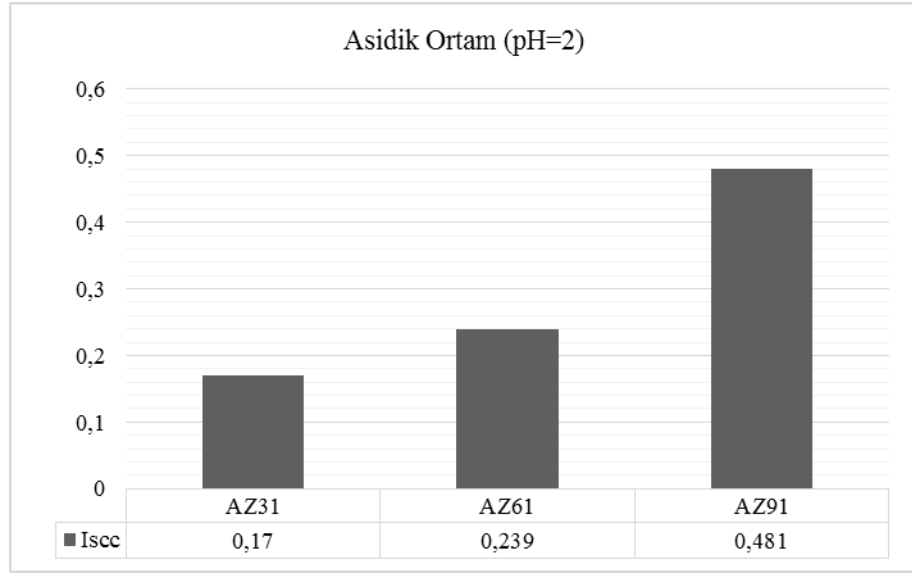
		Kırılma Süreleri (saat)	I_{sc}
AZ91	Hava	13,03	
	Asidik (pH=2)	6,27	0,481
	%3,5 NaCl	6,80	0,521
	Bazik (pH=11)	7,46	0,572



Şekil 4.18. AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indeksleri grafik gösterimi

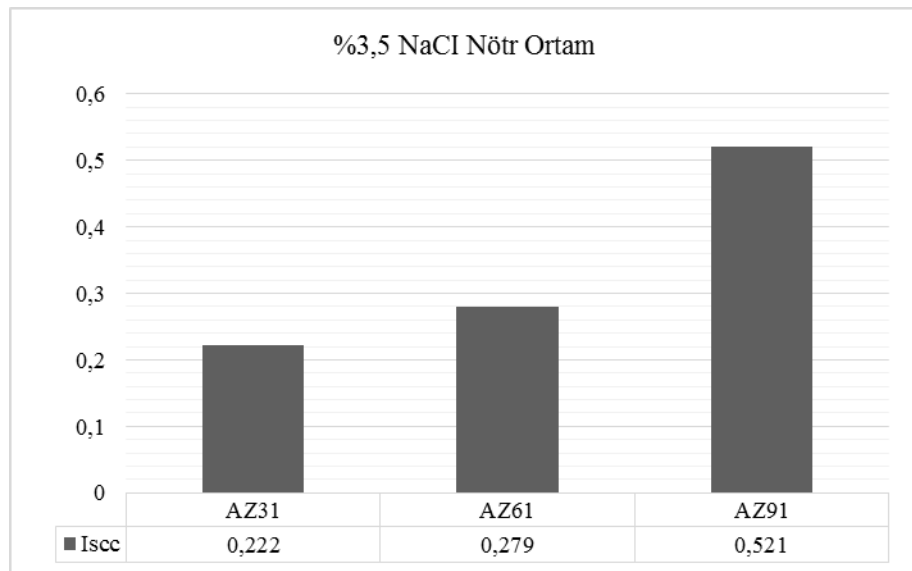
4.4.4. Farklı ortamlarda AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının gerilmeli korozyon indekslerinin karşılaştırılması

Asidik (pH=2), bazik (pH=11) ve %3,5 NaCl nötr çözeltili ortamlarında AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına ait I_{SCC} değerlerinin karşılaştırılması grafik halinde sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.



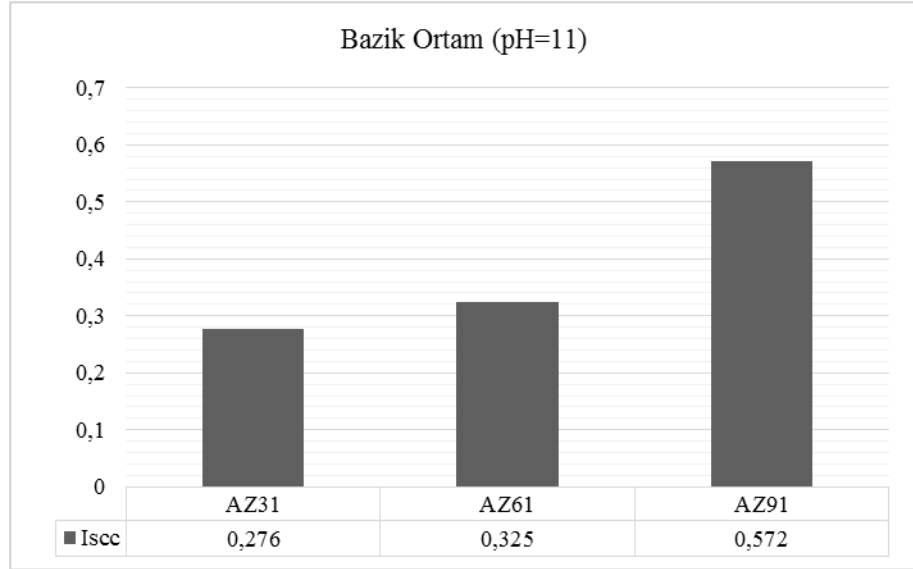
Şekil 4.19. Farklı türde magnezyum alaşımlarının asidik ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi pH=2 olan asidik ortamda kullanılan alaşımlar içerisinde gerilmeli korozyon direncinin en yüksek olduğu (Isc 'nin en yüksek olduğu) magnezyum alaşımının AZ91 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.20. Farklı türde magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl nötr ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi %3,5 NaCl nötr çözelti ortamında kullanılan alaşımlar içerisinde gerilmeli korozyon direncinin en yüksek olduğu (Iscc ‘nin en yüksek olduğu) magnezyum alaşımının AZ91 olduğu görülmektedir.



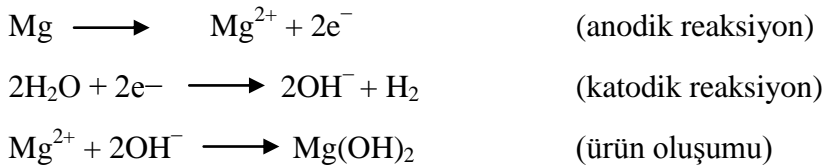
Şekil 4.21. Farklı türde magnezyum alaşımlarının bazik ortamlardaki SSRT test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi pH=11 olan bazik ortamda kullanılan alaşımlar içerisinde gerilmeli korozyon direncinin en yüksek olduğu (Iscc’nin en yüksek olduğu) magnezyum alaşımının AZ91 olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak her üç ortamda da AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon indeksi diğer AZ31 ve AZ61 alaşımlarına göre daha yüksektir. Dolayısıyla bu alaşımın gerilmeli korozyona karşı direnci diğer iki alaşıma göre yüksektir.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

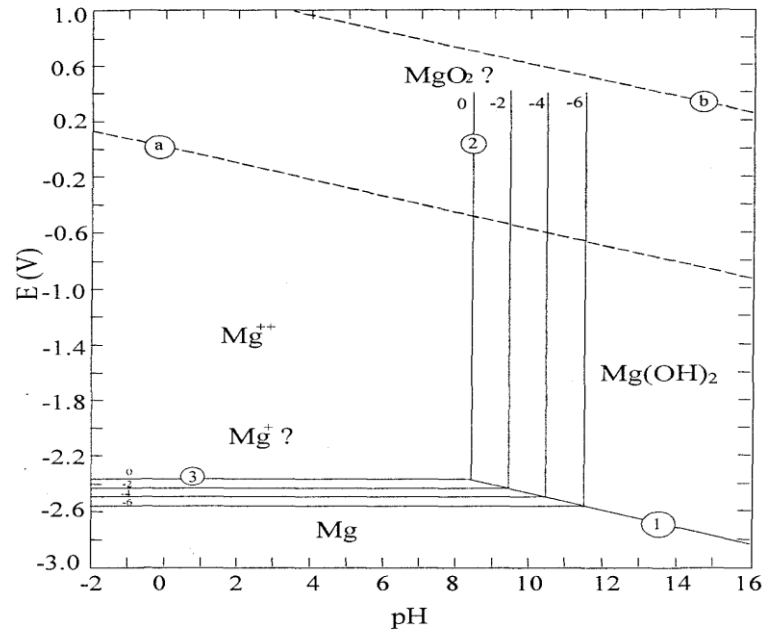
Yapılan çalışmada AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının %3,5 NaCl çözeltisindeki gerilmeli korozyon dirençlerinin zayıf olduğu bulunmuştur. Özellikle pH değeri azaldıkça gerilmeli korozyon dirençlerinin de önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir. Magnezyum alaşımlarının pH değerine bağlı olarak gerilmeli korozyon davranışlarının, korozyon davranışlarına benzer bir etkisi olduğu görülmektedir. Çözelti pH'ının korozyon davranışına olan bu etkisi, magnezyumun E_h -pH diyagramı (Pourbaix diyagramı) ile açıklanabilir. Şekil 5.1'de Mg-H₂O sisteminin potansiyel-pH diyagramı ve Şekil 5.2'de ise Mg-H₂O sisteminin potansiyel-pH diyagramının korozyon problemlerine uygulanışı verilmiştir. Sulu çözeltiler içerisindeki magnezyumun çözünmesi, öncelikli olarak, magnezyum hidroksit (Mg(OH)₂) ve hidrojen gazı (H₂) üretilecek şekilde suyun redüklenmesi ile oluşur (Ambat 2000). Bu reaksiyonlar çözünmüş oksijen konsantrasyonuna karşı duyarsızdırlar (Baril 2001).



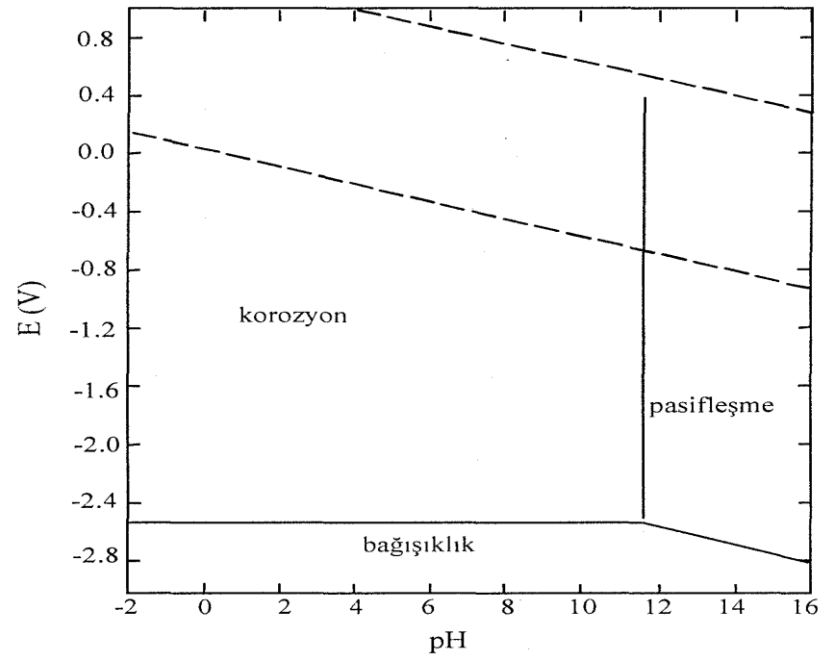
Magnezyum-alüminyum alaşımlarında, magnezyum konsantrasyonuna bağlı olarak pH değerinin yaklaşık 9'un üzerinde olduğu durumlarda, Mg(OH)₂ oluşumu kolaylaşır. Mg(OH)₂'in çökmesi için gerekli pH değeri, yaklaşık olarak 11 civarındadır. Yüzeyde oluşan Mg(OH)₂, korozyona karşı koruyucu bir tutum sergilediğinden, yüksek pH değerlerinde korozyon hızı ve gerilmeli korozyon direnci artmaktadır. Ayrıca, yüksek asitliğe sahip çözeltilerin magnezyum-alüminyum alaşımları için oldukça saldırgan olmasına, bu tür çözeltiler içerisinde magnezyum gibi alüminyumunda korozyon direncinin zayıf olmasının etkisi vardır (Ambat 2000).

Gerilmeli korozyon indeksleri karşılaştırıldığında ise AZ91 magnezyum alaşımının gerilmeli korozyon direncinin AZ31 ve AZ61'e göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Alaşım içerisindeki alüminyum miktarının korozyon ve gerilmeli korozyona etkisini Ghali (2000) ve Song *et al.* (1998) şöyle açıklamışlardır: Ağırlıkça %2-8 Al bulunan Mg-Al alaşımlarında Al miktarının konsantrasyonu arttıkça korozyon miktarı azalır. Yaklaşık olarak %2-4 Al civarında olan düşük miktarlardaki Al ilaveleri ise α -Mg uzantılarının tane sınırlarında çift fazlı $\alpha+\beta$ ötektik fazı tarafından çevrenmesiyle ortaya çıkar. Buna karşın ağırlıkça %6-9 Al oranındaki yüksek ilavelerde katılaşma oranına bağlı olarak tane sınırı boyunca saf β tanelerinin tane sınırı boyunca çökmesi eğilim gösterir. Al miktarının %10'a kadar olması durumunda ise Al- zengin α fazı katılaşma esnasında mikrosegregasyona sebep olacaktır ve bu değer uygun lokal konsantrasyon olacaktır (Ghali 2000). Song *et al.* (1998)'a göre β fazı, çözelti içerisinde çok kararlı ve etkin bir katottur. β fazı, biri engel ve diğeri de galvanik katot olmak üzere iki rol üstlenir. Eğer β fazı α matriksi içerisinde taneler arasında çökelti halinde küçük miktarlarda mevcutsa, bu durum esas olarak galvanik bir katot olarak görev yapar ve α matriksinin korozyonunu hızlandırır. Eğer β fazının miktarı fazlaysa, o zaman β fazı alaşımın korozyonunu önleyecek şekilde anodik bir engel olarak davranabilir. β fazı, ağırlıkça %2'nin üzerinde Al olduğu durumlarda görülmeye başlamaktadır. Sonuç olarak Al miktarının %10'a kadar artması korozyon ve gerilmeli korozyon direncini artırabilmektedir.



Şekil 5.1. Mg-H₂O sisteminin potansiyel-pH diyagramı (Pourbaix 1966)



Şekil 5.2. Mg-H₂O sisteminin potansiyel-pH diyagramının korozyon problemine uygulanişı (Pourbaix 1996)

AZ31, AZ61 ve AZ91 magnezyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalarda, otomotiv, savunma sanayi, havacılıkta ve özellikle son yıllarda implant uygulamalarda daha fazla kullanılabilmesi için gerilmeli korozyon dirençlerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yeterli düzeyde olmayıp bu konuda kapsamlı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aghion, E. ve Bronfin, B., 2000. Magnesium alloys development towards the 21st century, *Materials Science Forum*, 350-351, 19-30.
- Ambat, R., Aung, N.N., ann Zhou, W., 2000. Studies on influence of chloride ion and pH on the corrosion and electrochmeical behaviour of AZ91D magnesium alloy. *Journal of Applied Electrochemistry*, 30, 865-874.
- Altun H.,2004, *Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamaların Korozyon Davranışlarına Etkisi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniv. Fen Bilimleri Ens., Erzurum
- Arnander, M. and Newman, K., 2006. Fractures of the distal radius. *Surgery (Oxford)*, 24 (12), 429-432.
- Avedesian, M. M. ve Baker, H., 1999. Magnesium and magnesium alloys, *ASM Specialty Handbook*, Ohio.
- Biröl, Y., 2009. Otomotivde Alüminyumun Cazibesi, *Bilim ve Teknik*, 497, 50-53.
- Chaffin G.N., J.E. Jacoby, 1998. *Guidelines for Aluminum Sow Casting and Charging*, The Aluminum Association, Washington, D.C.
- Chaffin G.N., J.E. Jacoby, 1998. *Guidelines for Aluminum Sow Casting and Charging*, The Aluminum Association, Washington, D.C..
- Choudhary L., Szmerling J, Goldwasser R., Raman R. K. S., ,2011. Investigations into stress corrosion cracking behaviour of AZ91D magnesium alloy in physiological environment, 518-523
- Czerwinski, F., 2008. *Magnesium Injection Molding*, Springer, USA.
- Dieter, George E. 1988., “*Mecanical Metallurgy*”University of Maryland
- Doruk M.,1982. *Korozoyon ve Önlenmesi*,ODTÜ, 248s, Ankara
- Duygulu, Ö. 2009. *Production and development of wrought magnesium alloys (doktora tezi)*, İTÜ, İstanbul.
- Eker A.A.,2008, *Magnezyum alaşımları ders notları*.
- Fredrich H., S. Schumann, 2001. Research for a New Age of Magnesium in the Automotive Industry, *J. Mat. Proc.Tech.*, 117, p: 276-28
- Fredrich H., S. Schumann, 2001.Research for a New Age of Magnesium in the Automotive Industry, *J. Mat. Proc. Tech.*, 117, p: 276-28.
- Friedrich, H. E. ve Mordike, B. L., 2006. *Magnesium technology, metallurgy, design data, applications*, Springer, Germany.
- Ghali, E., Dietzel, W. ve Kainer, K. U., 2004. General and localized corrosion of magnesium alloys: a critical review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Cilt 13, sayı. 1, 7-23.
- Ghali, E.,2010. *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys, understanding, performance, and testing*, Jogh Wiley & Sons., USA.
- Ghali E., 2000. in *Uhlig’s Corrosion Handbook*, 2nd edition,edited by R. W. Revie. Wiley, Hoboken, NJ, pp. 793–830.
- Gray J.E., Luan B., 2002. Protective Coatings on Magnesium and its Alloys—A Critical Review, *J. Alloys Compd.*, 336, p: 88-113.
- Gray J.E., Luan B., 2002. Protective Coatings on Magnesium and its Alloys—A Critical Review, *J. Alloys Compd.*, 336, p: 88-113.
- Hydro Magnesium, “*Magnesium Die Castings*”, Technical Brochure.

- Jones D.A., 1996. Principles and Prevention of Corrosion, Part 8, Printice-Hall Internationalan (UK) Limited, 2nd ed,
- Kaese, V., Greve, L., Jüttner, S., Goede, M., Schumann, S., Friedrich, H., Holl, W. ve Ritter, W., 2003. Approaches to use magnesium as structural material in car body, Magnesium, Proceedings of 6th International Conference Magnesium Alloys and their Applications, Ed. Kainer, K.U., DGM, 936-942.
- Kannan M.B. and Raman R.K.S., 2008. Evaluating the stress corrosion cracking susceptibility of Mg–Al–Zn alloy in modified-simulated body fluid for orthopaedic implant application, Scripta Materialia 59 , 175–178
- Kannan M.B. Raja V.S., 2010. Enhancing stress corrosion cracking resistance in Al–Zn–Mg–Cu–Zr alloy through inhibiting recrystallization, Engineering Fracture Mechanics 77 249–256
- Kaya A.A., Kaya R.A., 2007. Witte F., and Duygulu Ö., Useful Corrosion- Potential of Magnesium Alloys as Implants, International Corrosion Engineering Conference, Seoul, Korea.
- Kaya A.A., Kaya R.A., Witte F., and Duygulu Ö., 2007. Useful Corrosion- Potential of Magnesium Alloys as Implants, International Corrosion Engineering Conference, Seoul, Korea, May 20-24.
- Kaya A.A., Pekgülyüz M., Türkoğlu S., Özdoğru E.F., 2004. Ağırılık Tasarrufu Amacıyla Otomobil Motor Bölmesinde Magnezyum Alasımlarının Kullanımı, OTEKON'04, Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
- Kaya, A. A., Pekgülyüz, M. ve Eliezer, D., 2005. High temperature deformation, alloys and processing of magnesium, The deformation and processing of structural materials, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, England.
- Kuşdemir H., AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniv. Fen Bilimleri Ens., Karabük
- Kumru N., 2004. Metalik Malzemelerde Gerilmeli Korozyon, CBÜ Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi, Sayı:2
- Külekçi, M. K., 2008. Magnesium and its alloys applications in automotive industry, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Cilt 39, sayı. 9-10, 851-865.
- Laser, T., Nürnberg, M., Janz, A., Hartig, C., Letzig, D., Schmid-Fetzer, R., ve Bormann, R., 2006. The influence of manganese on the microstructure and mechanical properties of AZ31 gravity die cast alloys, Acta Materialia, 54, 3033-3041.
- Lu L., M.O. Lai, Y.H. Toh, L. Froyen, 2002. Structure and Properties of Mg–Al–Ti–B Alloys Synthesized via Mechanical Alloying, Mater. Sci. Eng. A, 334, p: 163-172,
- M.B. Kannan, W. Dietzel, R.K.S. Raman, P. 2007. Lyon, Scripta Materialia 57 579–581.
- Mordike B.L., Ebert T., 2001. Magnesium Properties Applications Potential, Mat. Sci. Eng. A, 302, p: 37-45,
- Mordike B.L., Ebert T., 2001. Magnesium Properties—Applications—Potential, Mat. Sci. Eng. A, 302, p: 37-45,
- Mordike, B. L. ve Ebert, T., 2001. Magnesium properties – applications – potential, Materials Science and Engineering A, 302, 37-45.

- N. Winzer, A. Atrens, G. Song, E. Ghali, W. Dietzel, K.U. Kainer, N. Hort, C. Blawert, 2005. *Advanced Engineering Materials* 7 (8) ,659–693.
- Niinomi M. 2002. Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*;33:477.
- Öztürk İ., Kaçar İ., 2012, Magnezyum alaşımlarının kullanım alanlarının incelenmesi, Niğde Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:1 Sayı1,12-20
- Pekgülyüz, M. O. ve Kaya, A. A., 2003. Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 5, sayı. 12, 866-878.
- Polmear, I. J., 2006. Light alloys, from traditional alloys to nanocrystals, Butterworth-Heinemann, UK.
- Polmear, I. J., 2006. Light alloys, metallurgy of the light elements, Arnold, London.
- Pourbaix, M., 1966. Atlas of electrochemical equilibrium diagrams in aqueous solutions, Houston.
- Savaşkan T.,2000. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitapevi,No:330,347 s, Trabzon.
- Seçgin G.O.,2013, İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AZ31 Magnezyum Alaımının Korozyon Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Ens.,İstanbul
- Shereir, L. L.; Jarman, R. A.; Burstein, G. T., 1976. “Corrosion 1 Metal/Environment Reactions
- Song G., Atrens, A., Wu X., Bo Z., and Zhang B., 1998. Corrosion behaviour of AZ21,AZ501 and AZ91 in sodium chloride. *Corrosion Science*
- Song, G. L. ve Atrens, A., 1999. Corrosion mechanisms of magnesium alloys, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 1, sayı. 1, 11-33.
- Song, G. L. ve Atrens, A., 2003. Understanding magnesium corrosion, a framework for improved alloy performance, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 5, sayı. 12, 837-858.
- Srinivasan P. B., Blawert C., Dietzel W. and Kainer K.U., 2008. Stress corrosion cracking behaviour of a surface-modified magnesium alloy, 43–46
- Srinivasan P. B., Blawert C., Dietzel W. and Kainer K.U., 2008. Stress corrosion cracking behaviour of a surface-modified magnesium alloy, 43–46
- Staiger MP, Pietak AM, Huadmai J, Dias G., 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*;27:1728.
- Watarai H (2006) Trend of Research and Development for Magnesium Alloys, *Science and Technology Trends*, 18: 84-97.
- Wendt A., Weiß K., 2004. Gießsimulation für Magnesium-Leichtbauteile in der Flugzeugindustrie, *Virtual Materials Processing*, , Bayreuth, Germany.
- Wendt A., Weiss K., Ben-Dov A., Bamberger M., Bronfin B., 2005. Magnesium Castings in Aeronautics Applications–Special Requirements, *Magnesium Technology*, TMS-2005 Conference (The Minerals, Metals & Materials Society), San Francisco, USA .
- Witte F, Fischer J, Nellesen J, Crostack H-A, Kaese V, Pisch A, Beckmann F, Windhagen H., 2006. In vitro and in vivo corrosion measurements of magnesium alloys. *Biomaterials*;27:1013.
- Yalçın H., Koç T., 1990, Mühendisler için Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası.

- Zeng, R. C., Zhang, J., Huang, W. J., Dietzel, W., Kainer, K. U., Blawert, C. ve Ke, W., 2006. Review of studies on corrosion of magnesium alloys, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 16, 763-771.
- Zeytin, K. H., İnan, O. ve Teymur, B., 1999. Magnezyum alaşımları: Otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği, TÜBİTAK-MAM Rapor, Gebze, Kocaeli.

ÖZGEÇMİŞ

1988 tarihinde Erzurum’da doğdu. İlköğrenimini Başöğretmen İlköğretim Okulu’nda, lise öğrenimini Erzurum Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldu ve aynı zamanda çift anadal programıyla 2007 yılında başladığı İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında mezun oldu. 2010 yılında ÖYP kapsamında Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve aynı yıl Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde 6 ay hazırlık eğitimi aldıktan sonra 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2012 yılı Ocak ayı itibariyle Bayburt Üniversitesi’nden yüksek lisans ve doktora eğitimini tamamlamak amacıyla Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’ne Araştırma Görevlisi olarak görevlendirildi.