

**PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE  
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ TiO<sub>2</sub> VE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
KAPLANMASI VE KOROZYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tuğba BAYRAM**

**Danışman**

**Doç. Dr. Yusuf KAYALI**

**METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**Ocak 2022**

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE MAGNEZYUM VE**  
**ALAŞIMLARININ  $TiO_2$  VE  $Al_2O_3$  KAPLANMASI VE**  
**KOROZYONU**

**Tuğba BAYRAM**

**Danışman**

**Doç. Dr. Yusuf KAYALI**

**METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**OCAK 2022**

## TEZ ONAY SAYFASI

Tuğba BAYRAM tarafından hazırlanan "Plazma Püskürtme Tekniği İle Magnezyum ve Alaşımlarının  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  Kaplanması ve Korozyonu" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 12/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Yusuf KAYALI  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi



**Başkan** : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi



**Üye** : Dr. Öğr. Üye. Muhammet Karabaş  
Kırklareli Üniversitesi  
Lüleburgaz Havacılık ve Uzay Bilimleri  
Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

12.01.2022

  
**Tuğba BAYRAM**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ $TiO_2$ VE $Al_2O_3$ KAPLANMASI VE KOROZYONU

Tuğba BAYRAM

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Yusuf KAYALI

Magnezyum ve alaşımları yoğunluğu çok düşük malzemelerdir. Fakat mekanik ve kimyasal olarak zayıf özelliklere sahiptirler. Korozyon dirençleri oldukça düşük olan bu malzemeler, başarılı şekilde kaplanması ile korozyon dirençlerinde artış olacaktır. Mekanik özelliklerde de değişme olacak ve Mg ve alaşımlarının daha agresif ortamlarda kullanımının önü açılmış olacaktır. Bu çalışmanın amacı, Saf Mg, AZ31 ve AZ91 Mg alaşımlarının, plazma sprey kaplama yöntemi kullanılarak  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  ile kaplanabilirliğinin araştırılmasıdır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, saf Mg, AZ31 ve AZ91 Mg alaşımları plazma püskürtme tekniği ile  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  esaslı seramiklerle başarıyla kaplanmıştır. Kesit mikro yapılarının incelenmesi neticesinde AZ91 alaşımının  $TiO_2$  kaplaması hariç, diğer tüm kaplamalar için sürekli altlık malzemeye sürekli yapışma sağlanmıştır. Kesit mikro yapıları geleneksel plazma püskürtmeli seramik kaplama özelliklerine sahip olup, az miktarda porozite ve kılcal çatlaklar içermektedir.  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  esaslı malzemelerin kaplama öncesi ve sonrası faz yapıları incelendiğinde ise  $TiO_2$ 'de plazma püskürtme sonrası herhangi bir faz dönüşümü meydana gelmemişken,  $Al_2O_3$  ve  $Al_2O_3+TiO_2$  seramiklerde kristalinite azalmıştır.

Kaplama üretimi esnasındaki yüksek plazma entalpisi ve hızlı soğuma hızı kaplama yapısındaki kristalin fazların amorfa dönmesine neden olmuştur. VDI 3198 standardına göre yapılan yapışma testlerinde ise AZ31 kaplamaların tümünün kabul edilebilir yapışma sergilediği anlaşılmıştır. %3,5 NaCl ortamında yapılan elektrokimyasal korozyon testlerine göre ise tüm kaplamalar kaplamasız altlık malzemedan daha düşük korozyon hızı sergilemiştir. En düşük korozyon hızı  $Al_2O_3 + 3TiO_2$  kaplama için ölçülmüşken, en yüksek korozyon hızı ise  $TiO_2$  kaplama için ölçülmüştür. Genel olarak elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde Mg ve alaşımlarının korozyondan korunmasında plazma püskürtmeli seramik esaslı kaplamaların etkili olduğu anlaşılmıştır.

**2022, xiii + 60 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Plazma püskürtme, Magnezyum, Kaplama, Alümina, Titanyum Dioksit.

## ABSTRACT

M.Sc. Thesis

### TiO<sub>2</sub> AND Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> COATING AND CORROSION OF MAGNESIUM AND ITS ALLOYS BY PLASMA SPRAY TECHNIQUE

Tuğba BAYRAM

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Yusuf KAYALI

Magnesium and its alloys are very low density materials, but, they have poor mechanical and chemical properties. Successful coating of these materials, which have very low corrosion resistance, will increase their corrosion resistance. There will also be a change in the mechanical properties and the use of Mg and its alloys in more aggressive environments will be expanded. The aim of this study is to investigate the coatability of pure Mg, AZ31 and AZ91 Mg alloys with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> using the plasma spray method.

Experimental results showed that, pure Mg, AZ31 and AZ91 Mg alloys were successfully coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> based ceramics by plasma spraying technique. As a result of the examination of the cross-sectional microstructures, a continuous adhesion to the substrate was obtained for all coatings on the AZ91 alloy, except for the TiO<sub>2</sub> coating. The cross-sectional microstructures have the characteristics of conventional plasma spray ceramic coatings and contain little porosity and intersplat cracks. When the phase structures of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> based materials were examined before and after plasma spraying, there was no phase transformation occurred in TiO<sub>2</sub> after plasma spraying, while crystallinity decreased in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> ceramics.

The high plasma enthalpy and rapid cooling rate during the coating production caused the crystalline phases in the coating structure to turn into amorphous. In the adhesion tests performed according to the VDI 3198 standard. It was understood that all coatings on AZ31 substrate exhibited an acceptable adhesion. According to the electrochemical corrosion tests performed in 3.5% NaCl environment, all coatings have a lower corrosion rate than that of the uncoated substrate. While the lowest corrosion rate was measured for  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{TiO}_2$  coating, the highest corrosion rate was measured for  $\text{TiO}_2$  coating. When the experimental results were examined in general, it was understood that plasma sprayed ceramic-based coatings were effective in the protection of Mg and its alloys from corrosion.

**2022, xiii + 60 pages**

**Keywords:** Plasma spraying, Magnesium, Coating, Alumina, Titanium Dioxide.



## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf KAYALI' ya ve tüm çalışmam boyunca bana destek olan Sayın Dr. Öğr. ye. Muhammet KARABAŞ' a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve eŐime teşekkür ederim.

Tuğba BAYRAM

AFYONKARAHİSAR, 2022

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI .....	4
2.1 Magnezyum ve Alaşımlarının Özellikleri.....	4
2.1.1 Magnezyum ve Özellikleri.....	4
2.1.2 Magnezyum Alaşımları ve Özellikleri .....	6
2.1.3 AZ31 Magnezyum Alaşımı.....	14
2.1.4 AZ91 Magnezyum Alaşımı.....	17
2.1.5 Magnezyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	18
2.1.6 Alüminyum Oksit Kaplamaların Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	20
2.1.7 Titanyum Dioksit Kaplamaların Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	21
2.2 Termal Püskürtme Yöntemleri.....	21
2.2.1 Alev Püskürtme Yöntemi.....	23
2.2.2 Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi .....	23
2.2.3 Plazma Sprey Püskürtme Yöntemi .....	24
2.3 Magnezyum ve Alaşımlarında Korozyon .....	26
2.3.1 Korozyon.....	26
2.3.2 Magnezyum ve Alaşımlarında Korozyon Mekanizmaları .....	28
2.3.3 Galvanik Korozyon .....	30
2.3.4 Eşit Dağılımlı Korozyon .....	32
2.3.5 Çatlak Korozyonu .....	33
2.3.6 Çukur Korozyonu.....	34
2.3.7 Taneler Arası Korozyon.....	35
2.3.8 Korozyonlu Yorulma .....	36

3. MATERYAL VE METOT.....	37
3.1 Altlık Malzeme ve Kaplama Tozları.....	37
3.2 Kaplamaların Üretimi .....	38
3.3 Yapısal Karakterizasyonlar .....	39
3.4 Daimler-Benz Rockwell-C Adezyon Testleri .....	39
3.5 Elektrokimyasal Korozyon Testleri .....	40
4. DENEYSEL BULGULAR.....	42
4.1 Mikroyapısal Karakterizasyon .....	42
4.2 X Işınları Difraksiyon Analizi .....	44
4.3 Daimler-Benz Rockwell-C Adezyon Testleri .....	46
4.4 Elektrokimyasal Korozyon Test Sonuçları .....	47
4.5 Korozyon Testleri Yapılan Kaplamaların İncelenmesi.....	49
5. SONUÇLAR.....	53
6. KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	60

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

Mg	Magnezyum
Fe	Demir
O	Oksijen
Ti	Titanyum
Zn	Çinko
Al	Alüminyum
Mn	Manganez
Cu	Bakır
Si	Silisyum
Zr	Zirkonyum
Sn	Kalay
Ni	Nikel
Sr	Stronsiyum
Ca	Kalsiyum
Yr	İtriyum
Ag	Gümüş
Pt	Platinyum
Th	Toryum
Mo	Molibden
Co	Kobalt
RE	Toprak alkali elementler
MgO	Magnezyum oksit
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
CaCl <sub>2</sub>	Kalsiyum klorür
NaCl	Sodyum klorür
Mg (OH) <sub>2</sub>	Brusit
MgCO <sub>3</sub> .CaCO <sub>3</sub>	Dolomit
MgCO <sub>3</sub>	Manyezit
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	Bişofit
MgCl <sub>2</sub> . KCl.6H <sub>2</sub> O	Karnalit
3MgO.2SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	Serpantin
TiO <sub>2</sub>	Titanyum dioksit
FeTiO <sub>3</sub>	İlmenit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina
WC	Tungsten karbür
Gpa	Giga pascal
Mpa	Mega pascal
e <sup>-</sup>	Elektron
°C	Santigrat derece
°F	Fahrenheit derece
%	Yüzde
K	Kelvin derece
η	Eta

---

## Simgeler (devamı)

---

$\Phi$	Teta
kg	Kilogram
g	Gram
m	Metre
mm	Milimetre
cm	Santimetre
s	Saat
dak.	Dakika
t	Zaman
L	Litre
Hz	Hertz
J	Joule
kJ	Kilojul
N	Newton
W	Watt
$\Omega$	Ohm
$\mu\text{m}$	Mikrometre
nm	Nanometre
E <sub>corr</sub>	Korozyon potansiyeli
I <sub>corr</sub>	Korozyon akımı
R <sub>p</sub>	Polarizasyon direnci

---

## Kısaltmalar

---

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CVD	Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma
EDS	Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi
HMK	Hacim merkezli kübik
HSP	Hekzagonal sıkı paket
HVOF	Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı Püskürtme
Max.	Maksimum
Min.	Minimum
pH	Hidrojen potansiyeli
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UV	Ultraviyole
XRD	X-ışınları difraktometresi

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Magnezyum HSP kristal yapısı.....	4
Şekil 2.2 Mühendislik metallerinin yoğunluk değerleri.....	4
Şekil 2.3 Magnezyum' a eklenen Al elementinin Mg alaşımlarının özelliklerine etkisi .	7
Şekil 2.4 Mg- Al faz diyagramı.....	8
Şekil 2.5 Mg- Zn ikili denge diyagramı .....	9
Şekil 2.6 Mg-Fe denge diyagramı .....	10
Şekil 2.7 Mg-Sn denge diyagramı.....	10
Şekil 2.8 Mg-Mn ikili faz diyagramı.....	11
Şekil 2.9 Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı .....	15
Şekil 2.10 Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminin döküle bilirliliği. ....	16
Şekil 2.11 Magnezyumun kullanım alanları.....	19
Şekil 2.12 Dünya çapında büyük ülkelerin 2019 yılı itibariyle manyezit rezervleri.....	19
Şekil 2.13 Termal spreycaplama prensibi şematik görünümü .....	22
Şekil 2.14 Plazma spreycaplama yöntemi proses şeması .....	25
Şekil 2.15 Elektrokimyasal hücre korozyon hücresi.....	27
Şekil 2.16 Ana korozyon grupları ( 1.Grup: Çıplak göz ile görülebilen korozyon türleri, 2.Grup: Özel ekipman ile görülebilecek korozyon türleri, 3.Grup: Mikroskop ile görülebilecek korozyon türleri). ....	29
Şekil 2.17 Çukur korozyon çeşitleri a) dar, derin b) eliptik c) geniş d) yeraltı e) alttan kesme f) mikro yapısal yönelim. ....	34
Şekil 2.18 Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan taneler arası korozyon vaka çalışması. ....	35
Şekil 3.1 Kaplama tozlarına ait SEM resimleri ve EDS analiz sonuçları, a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> b) TiO <sub>2</sub> , c) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +%3TiO <sub>2</sub> .....	37
Şekil 3.2 VDI 3198 girinti testi ve hataların görünümü.....	40
Şekil 4.1 Mg altlık üzerine üretilmiş kaplamaların kesit SEM resimleri. ....	42
Şekil 4.2 AZ31 Mg alaşımı üzerine üretilmiş kaplamaların kesit SEM resimleri. ....	43
Şekil 4.3 AZ91 Mg alaşımı üzerine üretilmiş kaplamalara ait SEM resimleri ve EDS analizi. ....	44
Şekil 4.4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tozun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği.....	45
Şekil 4.5 TiO <sub>2</sub> tozun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği.....	45
Şekil 4.6 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +%3TiO <sub>2</sub> tozun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği. ....	46
Şekil 4.7 Rockwell C indentasyon bölgelerinin SEM resimleri a)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , b)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub> , c)TiO <sub>2</sub> . ....	47

<b>Şekil 4.8</b> AZ31 altlık ve kaplamaların Tafel polarizasyon eğrileri. ....	49
<b>Şekil 4.9</b> AZ31 korozyon testi sonrası SEM görüntüleri .....	49
<b>Şekil 4.10</b> Korozyon ürünleri alan EDS analiz sonuçları.....	50
<b>Şekil 4.11</b> % 3.5 NaCl çözeltisinde Korozyondan sonra a) Mg alaşımı, b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplı Mg alaşımı, c) TiO <sub>2</sub> kaplı Mg alaşımı, d) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub> kaplı Mg alaşımı EDX analizleri. ....	51

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 2.1</b> Saf Mg metalinin fiziksel özellikleri.....	5
<b>Çizelge 2.2</b> Saf Magnezyum metalinin mekanik özellikleri. ....	5
<b>Çizelge 2.3</b> Alaşım elementlerinin Mg metaline etkisi .....	12
<b>Çizelge 2.4</b> Alaşım elementlerinin standart gösterimi .....	12
<b>Çizelge 2.5</b> Mg alaşım serilerinin ASTM standartlarıyla gösterilmesi.....	12
<b>Çizelge 2.6</b> En yaygın Mg döküm ve dövme alaşımları .....	13
<b>Çizelge 2.7</b> AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri. ....	14
<b>Çizelge 2.8</b> Yüksek ergime derecesine sahip olan bazı intermetalik fazlar .....	15
<b>Çizelge 2.9</b> AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri .....	17
<b>Çizelge 2.10</b> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 'in genel özellikleri.....	20
<b>Çizelge 2.11</b> Bazı metal ve ticari alaşımların bağıl reaktivite değerleri .....	28
<b>Çizelge 2.12</b> En sık karşılaşılan galvanik hücreler.....	30
<b>Çizelge 3.1</b> Altlık malzemelerin kimyasal kompozisyonları. ....	38
<b>Çizelge 3.2</b> Plazma püskürtme parametreleri.....	39
<b>Çizelge 4.1</b> AZ31 altlık ve seramik kaplamalara ait korozyon değişkenleri.....	48



## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 2.1</b> Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde galvanik korozyon vaka çalışması.....	31
<b>Resim 2.2</b> Ahşap bir kiriş içinde 150 yıl kalan bir karbon çelik çivinin yerel korozyonu. Kirişin dışındaki kavisli bölge daha belirgin bir incelme yaşamıştır .....	32
<b>Resim 2.3</b> Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan çatlak korozyonu vaka çalışması. ....	33
<b>Resim 3.1</b> Metco 9MB plazma tabancası.....	38
<b>Resim 3.2</b> Bakalite alınmış korozyon deneyi numunesi .....	40

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte, değişik sektörlerde kullanışlı malzeme arayışları artarak devam etmektedir. Bu durum malzemelerin beklenen ihtiyaçları karşılayacak şekilde geliştirilerek kullanılması için yeni arayışlara sebep olmaktadır. Magnezyumun da içerisinde bulunduğu hafif metaller, sahip oldukları özellikler sebebiyle birden fazla farklı sektörde tercih edilmektedir.

Magnezyum, titanyum ve alüminyum gibi malzemeler ve bu malzemelerin alaşımlarının yoğunlukları oldukça düşüktür. Yoğunluğu düşük olması, yüksek mukavemet değeri, kolay şekil verilmesi, ses soğurma kapasitesi, kolay dökülebilmesi, elektromanyetik uyarıcılara karşı koruma görevi, torna ve frezede yüksek işlenme kabiliyeti gibi üstün özelliklere sahiptir. Sahip olduğu birçok özellik göz önüne alındığında magnezyum ve alaşımları sektöre yeni teknolojiler ile katkı sağlayabilecek ve gelecek için umut veren malzemeler olarak kabul edilmektedir. Ekonomik ve kullanışlı olmak bakımından sürekli gelişmek ve daha iyi duruma geçmek zorunda olan özellikle otomotiv, havacılık, uzay, iletişim ve bilgisayar sektörlerinde magnezyum ve alaşımlarının kullanımı artmaktadır ve artacağı da tahmin edilmektedir (Candan vd. 2009, Öztürk ve Kaçar, 2012).

Sahip olduğu tüm bu avantajlara rağmen magnezyum metalinin zayıf yönleri de bulunmaktadır. Sertlik değeri düşüktür, bunun yanı sıra aşınma ve sürtünme dayanıklılığı zayıftır. Kimyasal reaktifliği yüksektir, soğuk şekillendirilme kabiliyeti ve tokluk değeri sınırlıdır. Özellikle de korozyon dayanıklılığının zayıf olması nedeniyle bu malzemelerin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Bütün bu negatif yönleri sebebiyle, endüstriyel uygulamalarda magnezyum ve alaşımları kullanılmadan önce korozyona karşı koruma sağlanması gerekmektedir ve genellikle korumasız kullanılmamaktadır (Candan vd. 2009, Can ve Kandemir 2013).

Magnezyumun elektrokimyasal aktivitesi yüksektir. Bu durumun beraberinde korozyona direncinin de düşük olması; Mg ve alaşımları için istenmeyen bir durumdur ve malzemelerin kullanım yelpazesini sınırlandırmaktadır.

Bu olumsuz özellikleri yok etmek ve önlemek amacıyla birçok farklı teknikler uygulanmaktadır. Bu tekniklerden biri de malzeme yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluşturulmasıdır. Bu amaçla metaller üzerine yapılan kaplamalar, kaplama ile metal arasında bir difüzyon bağı oluşturarak veya bir difüzyon bağı oluşturmadan kaplama ile altlık arasında mekanik yapışma esasına dayanacak şekilde yapılır. Örnek olarak, korozyon direncini arttırmak adına boyama, kromatlama, anotlama, elektrokimyasal kaplama, akımsız kaplama, plazma elektrolitik oksidasyon, CVD/ PVD kaplama ve termal spreyleme olarak sayılabilir (Özden 2015, Çelik 2018).

Plazma spreyleme yöntemi, metal malzemelerin çeşitli tozlarla kaplanması ile aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya karşı direnç kazandırılması esasına dayanır. Böylece, düşük maliyetli malzemeler, kaplama ile özellikleri geliştirilerek kullanım alanları artırılabilmektedir. Plazma spreyleme yönteminin en önemli avantajlarından biri, metal ve seramikler dâhil birçok malzemenin, parça boyutlarına takılmaksızın kaplanabilmesidir. Bu yöntem ile malzemede korozyona karşı koruma, aşınma direnci, ısı ve oksidasyon direnci ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerde koruma sağlanabilmektedir. Böylece plazma spreyleme yöntemi sayesinde altlık malzeme ve kaplama malzemelerinin pozitif özelliklerinin yeni bir malzemede toplanması işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece her iki malzemedeki de daha kullanışlı bir malzeme elde edilir. Plazma spreyleme yöntemiyle oluşturulan seramik kaplamalar birçok metale kıyasla oldukça iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler. Bu özelliklerin arandığı durumlarda tercih edilirler (Kaya vd. 2017).

Saf magnezyumun sahip olduğu özelliklerinden bazılarının zayıf olması sebebiyle bu haliyle endüstriyel uygulamalarda yalın olarak tercih edilmemektedir. Bu durum göz önüne alındığında Mg metalinin anlamlandırılarak kullanılması, beklenen performansın elde edilmesi bakımından daha cazip olmaktadır. Bu bağlamda Mg, değişik element ilaveleri ile anlamlandırılarak, elementlerin özelliklerinden faydalanıp daha güçlü hale getirilmiştir. AZ31 alaşımı da, saf magnezyumun uzama ve çekme dayanımını arttırmak, sertlik değerini yükseltmek amacıyla elde edilmiştir (Altay 2012, Ekinci 2016).

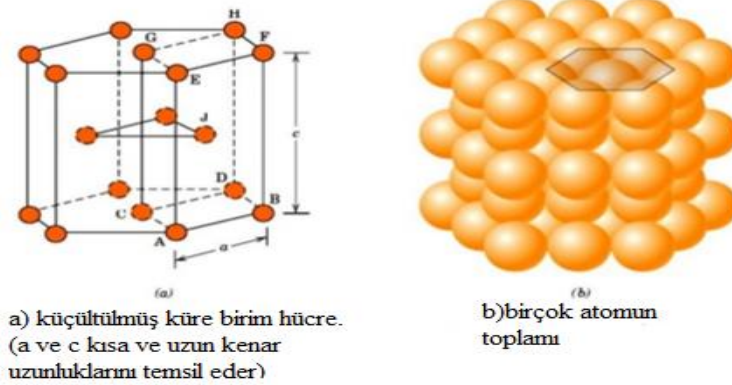
Bu çalışmada; Saf Mg, AZ31 ve AZ91 Mg alaşımları, önemi gün geçtikçe artan plazma spreyle kaplama yöntemi kullanılarak  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  esaslı seramiklerle kaplanmıştır. Üretilen kaplamaların SEM ve XRD ile yapısal karakterizasyonları incelenmiştir. %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon davranışları incelenmiş ve Daimler-Benz Rockwell-C yapışma testlerine tabii tutulmuştur. Çalışmanın amacı; deneysel veriler ışığında ilgili malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilerek kullanım alanlarının genişletilmesidir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

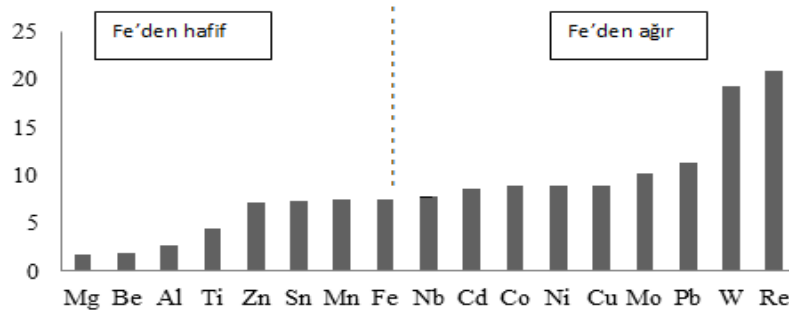
### 2.1 Magnezyum ve Alaşımlarının Özellikleri

#### 2.1.1 Magnezyum ve Özellikleri

Magnezyum; hafif metaller arasında olup gümüş beyazı ve parlak renklidir. 18 yüzyılda Sir Humphrey Davy tarafından keşfedilmiştir. Dünyada en çok rastlanan 8. Element ve 6. metaldir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi Mg hekzagonal sıkı paket kristal kafes yapısına sahiptir. 1,74g/cm<sup>3</sup> yoğunluğu ile alüminyum ve çeliğe göre yoğunluk değeri oldukça düşüktür. Şekil 2.2'de mühendislik metallerinin yoğunluk değerleri verilmiştir. Bu düşük yoğunluk değeri sayesinde düşük eylemsizlik davranışı sergiler. Bu özelliği sebebiyle hızlı hareket eden parçalar için ideal bir malzemedir. Ayrıca, hafifliği sebebiyle parçaların taşınması ve sevk edilmesi gibi durumlarda malzemeyi avantajlı hale getirmektedir (Altay 2012, Kerenciler 2014).



Şekil 2.1 Magnezyum HSP kristal yapısı.



Şekil 2.2 Mühendislik metallerinin yoğunluk değerleri (Callister ve Rethwisch 2013).

Çizelge 2.1’de saf magnezyum metaline ait fiziksel özellikler, Çizelge 2.2’de ise saf magnezyum metaline ait mekanik özellikler verilmiştir.

**Çizelge 2.1** Saf Mg metalinin fiziksel özellikleri (Yiğit 2004, Altay 2012, Kerenciler 2014).

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Atom numarası	Atom ağırlığı	Erime noktası (°C)	Kaynama noktası (°C)	Buharlaşma noktası (°C)	Sertlik (HB)	Elastisite modülü (GPa)
1,738	12	24,31	650 ± 2	1090	1107 ± 10	30-47	45

**Çizelge 2.2** Saf magnezyum metalinin mekanik özellikleri (ASM 1998).

	Çekme dayanımı (Mpa)	Sertlik (HB)	Basmada akma dayanımı (Mpa)	Çekmede akma dayanımı	%uzama (50mm)
Haddelenmiş levha	180-220	45-47	105-115	115-140	2-10
Tavlanmış levha	160-195	40-41	160-195	90-105	3-15
13mm kalınlık (extrüzyon)	165-205	35	40-41	69-105	5-8
13mm kalınlık döküm	90	30	21	21	2-6

Magnezyum, hava ile temas ettiğinde yüzeyinde mat ve ince bir oksit katmanı ile kaplanır. 500°C üzerindeki sıcaklıkta yanarak MgO’ye dönüşür. Periyodik tabloda toprak alkali metaller grubunda yer alır ve yeryüzünde saf halde bulunmaz.

En önemli cevherleri dolomit (MgCO<sub>3</sub>.CaCO<sub>3</sub>), manyezit (MgCO<sub>3</sub>) (%29 Mg), bişofit (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) (%12 Mg), karnalit (MgCl<sub>2</sub>). KCl.6H<sub>2</sub>O (%9 Mg), serpantin (3MgO.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) (%26 Mg) ve deniz suyudur (Kerenciler 2014, Ekinci 2016). Ayrıca Mg, geri kazanımının mümkün olması sebebiyle üretim- geri dönüşüm döngüsü içerisinde birçok sektörde cazip hale gelmiştir. Diğer metal malzemeler ile kıyaslandığında plastik şekil vermeye en elverişli metaldir. Isı iletkenliği ve damping kapasitesi yüksektir (Yiğit 2004, Kerenciler 2014).

## 2.1.2 Magnezyum Alaşımları ve Özellikleri

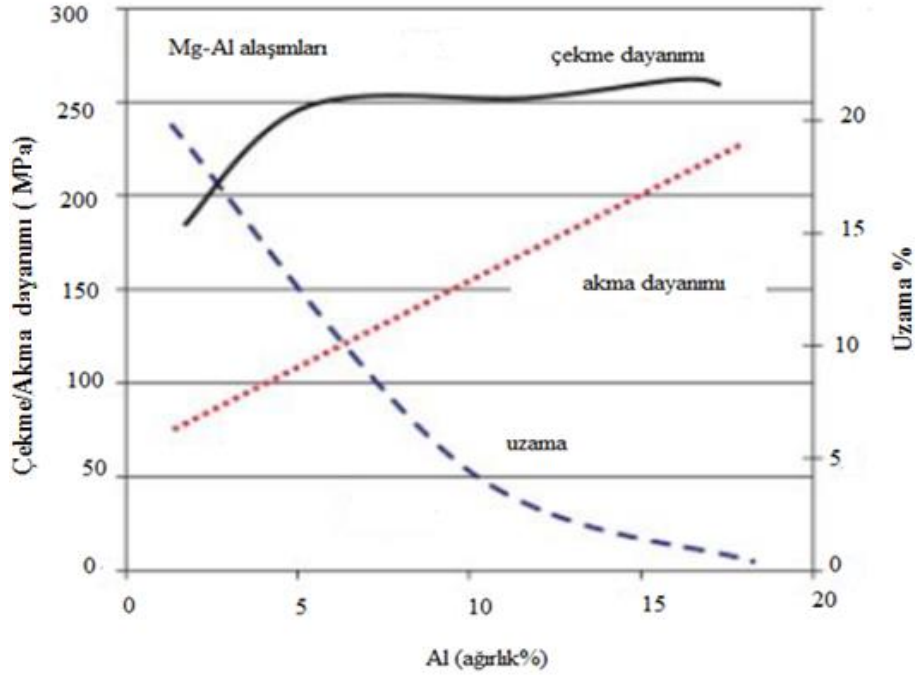
Magnezyum alaşımları, magnezyum ile diğer metallerin anlamlandırılmasıyla elde edilmektedir. Alaşımlama işlemi hem işlenmiş hem de dökme ürünler için magnezyumun özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Çizelge 2.3’de alaşım elementlerinin Mg metaline etkisi gösterilmektedir. Genellikle; Çinko (Zn), Alüminyum(Al), Manganez (Mn), Bakır (Cu), Silisyum(Si) , Zirkonyum (Zr), Kalay (Sn), Kurşun (Pb), Stronsiyum (Sr) , Kalsiyum (Ca), Yitriyum (Yr), Demir(Fe), Gümüş (Ag), Toryum (Th) ve Toprak alkali elementleri (RE) ile yapılmaktadır (Kerenciler 2014, Gerengi vd. 2017).

Kimyasal olarak magnezyum alaşımları nispeten kararsız ve özellikle deniz ortamlarında korozyona karşı hassastır. Bu sebeple değişik alaşım elementleri ilave edilerek özelliklerinde iyileştirme yapılması yoluna gidilmiştir (Callister ve Rethwisch, 2013).

Magnezyum alaşımlarının belirgin bir yorulma sınırı vardır. Yorulma sınırının altındaki döngüsel yüklerde neredeyse sonsuza kadar çalışabilir. Yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Hızlı ısı dağılımı, termal gerilmeleri ve bozulmayı en aza indirir. Manyetik değillerdir ve toksik etkileri yoktur (Schwam vd. 2000). Magnezyum alaşımları, Hume Rothery kuralları doğrultusunda katı eriyik sertleşmesi yapmaktadır. Hume Rothery kuralları gereğince katı eriyik sertleşmesi mekanizmasında bulunan çözünen ve çözen atomların çapları farkı maksimum %15 ile sınırlıdır. Bir diğer önemli husus ise magnezyumun kristal kafes yapısıdır. Mg, HSP kafes yapısına sahiptir ve sadece kendisiyle aynı kristal kafes yapısına sahip olan elementlerle alaşım oluşturabilmektedir. Kafes yapısı birçok element ile katı eriyik çözelti yöntemiyle alaşımlama yapmaya elverişlidir (Barber 2004, Çelik 2014).

Alüminyum, magnezyuma ilave edilen alaşım elementleri arasında en fazla kullanılan elementtir. Al ilavesi, döküle bilirliliği iyileştirir.  $Mg_{17}Al_{12}$  nin neden olduğu sertlik etkisi sadece 120 °C’ye kadar gözlense de alüminyum gerilme mukavemetini ve sertliğini artırır. Bu alaşımlar, ısıl işleme pek izin vermeyen kalıp döküm koşulları dışında genellikle ısıl işlem görürler.

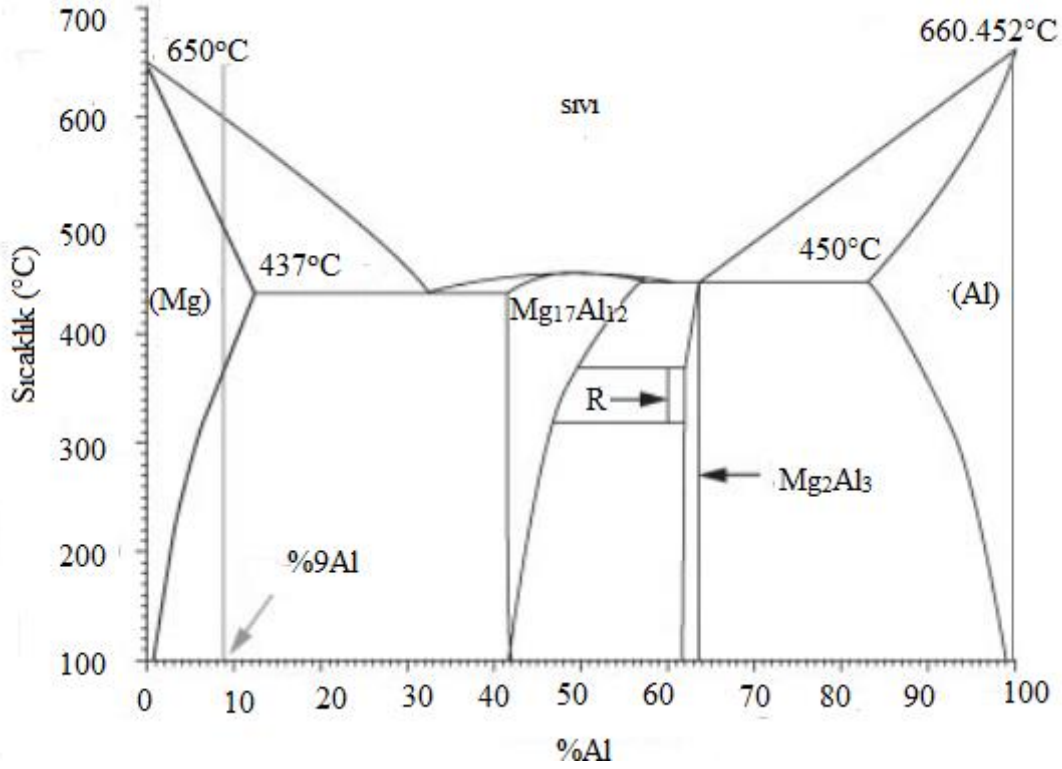
Mekanik özelliklerdeki bu iyileştirmelerin yanı sıra, daha iyi döküle bilirliliğin büyük bir avantajı vardır. Çoğu teknik alaşımın özellikle döküm alaşımlarından olmasının ana nedeni budur (Kainer 2003). Şekil 2.3’de Mg alaşımlarına ilave edilen Al elementinin, Mg alaşımlarının akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama gibi özellikleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Magnezyuma eklenen Al elementinin Mg alaşımlarının özelliklerine etkisi (Kazan 2019).

Mg-Al ikili faz sistemi, en yaygın kullanılan Mg döküm alaşımlarının temelini oluşturmaktadır. AZ91, AM60, AM50 gibi alaşımlar dökümde büyük bir yere sahiptir. Şekil 2.4’ de verilen Mg-Al faz diyagramına göre, Al ’un Mg içinde maksimum çözünürlüğü 25 °C’de ağırlıkça %2,1 ila 437 °C ötektik sıcaklıkta ağırlıkça %12,6 arasında değişmektedir. Ötektik bileşim ağırlıkça %32,3’dür ve ötektik,  $\alpha$ -Mg ile  $\beta$ -fazı olan  $Mg_{17}Al_{12}$  arasındadır (Barber 2004). Ağırlıkça %6’yı aşan alaşımlar ısı işlem görebilir (Gupta ve Sharon 2011).

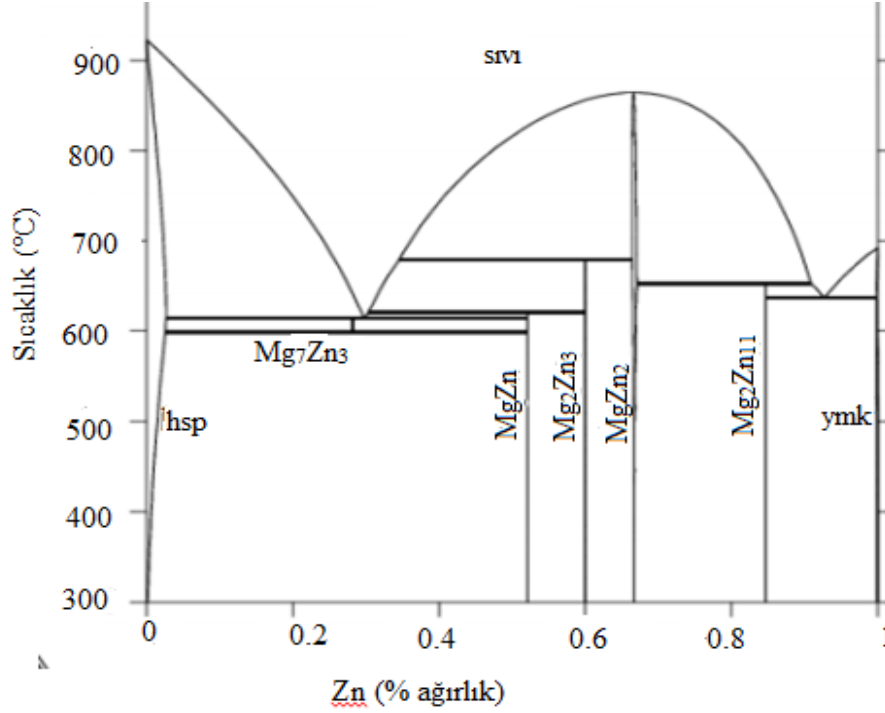




Şekil 2.4 Mg- Al faz diyagramı (Barber 2004, Çelik 2014).

Mg-Al ikili alaşımları genellikle yüksek oranda dökülebilir ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, ticari alaşımlar ikili alaşım olarak çok sık kullanılmaz. Çoğunlukla çinko, manganez, nadir toprak metalleri, silikon ilaveli üçlü ve dördü alaşımlardır. Bu ilaveler ile belirli özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlar ve alaşımları döküm için daha uygun hale getirir. Bununla birlikte, alaşımın katılaşma davranışını da karmaşıktırır (Barber 2004).

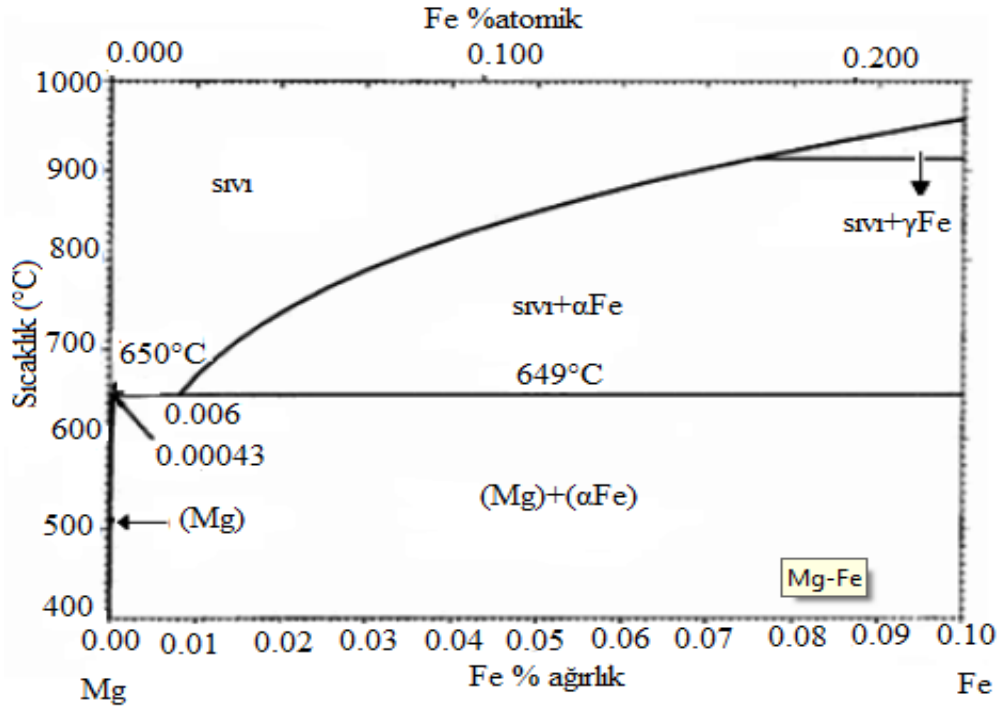
Çinko, Mg alaşımlarında Al beraberinde en çok kullanılan elementtir. Şekil 2.5 'de Mg-Zn ikili denge diyagramı ve magnezyumun çinko ile oluşturduğu bileşikler görülmektedir. Dökülebilirlik ve güçlendirme açısından Al ile aynı davranışı sağlar. %3'e kadar çinko eklenerek çekme telafi edilebilir ve çekme mukavemeti artırılır. Alüminyumda olduğu gibi, mikro gözeneklilik eğilimi vardır (Kainer 2003). Çinko ilavesi, alaşımın korozyon direncini ve çekme mukavemetini artırır. Fakat alaşıma ilave edilen Zn tane sınırlarına çökelme yaparak sıcak yırtılma oluşmasına sebep olur. Bu sebeple alaşımda bulunma oranı %2'yi aşmamaktadır (Barber 2004).



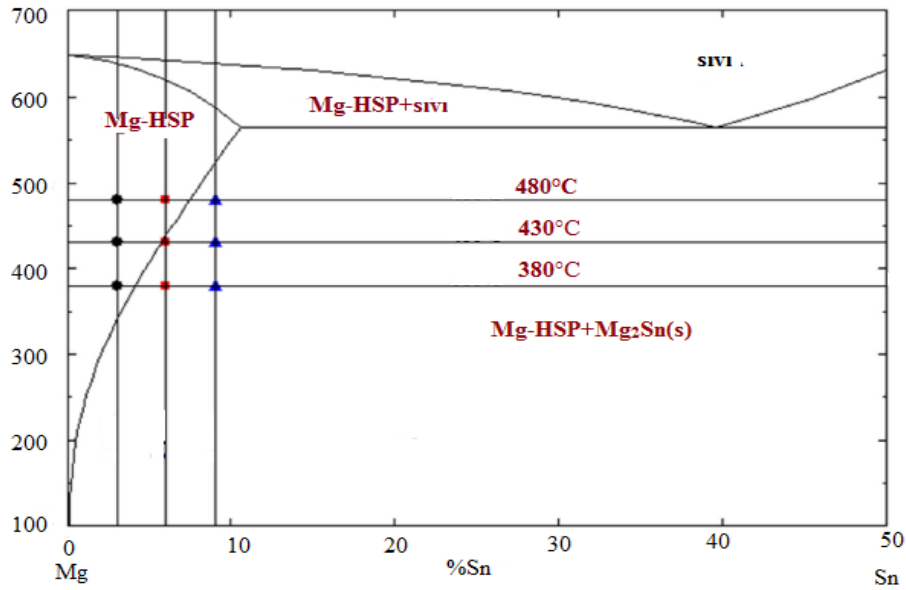
Şekil 2.5 Mg- Zn ikili denge diyagramı (Dev vd. 2019).

Demir, magnezyumun korozyon direncini zayıflattığı için zararlı bir katkı elementidir. Magnezyum ile çelik kalıplar arasında güçlü tepkimeler oluşmasına sebep olur. Bu sebepler doğrultusunda, Fe içeriği %0,01-0,03 aralığını geçmemelidir. Şekil 2.6'da Mg-Fe denge diyagramı gösterilmektedir (Kerenciler 2014, Çelik 2014).

Kalay, Mg'a oranla daha düşük derecede ergime gösterir ve akıcılığı daha düşüktür. Sn; Al ile birleşik yaparak alaşımının süneklik özelliğini artırmaktadır. Alaşımın sıcak işlemler altında ve dövme işleminde görülen çatlama karşı eğilimini azaltmaktadır. Bu sayede alaşımın işleme ve plastik şekil verilebilme özelliklerinde iyileşme sağlanmaktadır (Çelik 2014). Şekil 2.7'de Mg-Sn denge diyagramı gösterilmektedir (Dev vd. 2019).



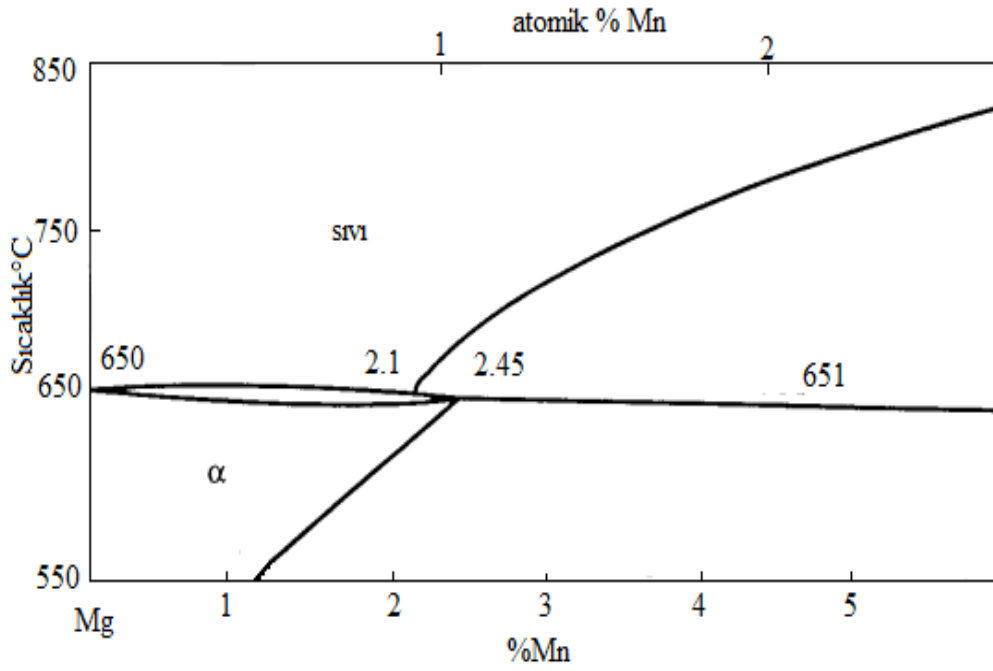
Şekil 2.6 Mg-Fe denge diyagramı (Çelik 2014).



Şekil 2.7 Mg-Sn denge diyagramı (Dev vd. 2019).

Şekil 2.8’de Mg-Mn ikili faz diyagramı referans alındığında manganez; magnezyum içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahip olan bir alaşım elementidir. Bu sebeple kullanım miktarı kısıtlıdır. Mg alaşımlarına eklenen Mn, Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarının tuzlu su şartlarındaki korozyon dayanımını iyileştirmektedir.

Fe-Mn çökeltilerinde ise çökelen zararlı Fe ve diğer elementler ile Al-Mn-Fe birleşik partikülleri oluşturmaktadır. Böylece Fe'nin zarar verici etkileri kontrol altına alınarak Mg alaşımının korozyon direnci artırılmaktadır. Mn ilavesi çekme mukavemetini önemli ölçüde etkilemeden magnezyumun akma noktasını bir miktar artırmaktadır. Mn 'ın Mg içerisindeki çözünürlük değeri sıcaklığa bağlı olarak %3,4' e kadar çıkabilmektedir. Ortamda Al olması durumunda Mg içerisindeki çözünürlüğü %0,3 ile sınırlı kalmaktadır (Schwam vd. 2000, Gupta ve Sharon 2011, Kerenciler 2014).



Şekil 2.8 Mg-Mn ikili faz diyagramı (Schwam vd. 2000).

Magnezyum alaşımları, ASTM A275 standardizasyon sistemi ile belirtilmiştir. Çizelge 2.4'de alaşım elementlerinin gösterimi, Çizelge 2.5'de ise Mg alaşım serilerinin ASTM standartlarıyla gösterimi verilmiştir. Bu isimlendirme sisteminde iki harf ve iki sayı yazılmaktadır. Bu iki harf, alaşım içerisinde en fazla ihtiva eden elementleri belirtirken, rakamlar ise bu alaşımların tam sayı cinsinden yüzde miktarıdır. Üçüncü kısımda ise ana alaşım elementi oranları aynı olan alaşımlar arasındaki farkı belirtilir (Altay 2012, Kala 2014, Kerenciler 2014).

**Çizelge 2.3** Alaşım elementlerinin Mg metaline etkisi (Kerenciler 2014, Kala 2014, Öztekin 2016, Gerengi vd. 2017).

<b>Element</b>	<b>Korozyon özellikleri</b>	<b>Döküm özellikleri</b>	<b>Mekanik özellikler</b>
Al	Korozyon direncini artırır	Döküle bilirligi artırır	Sertlik artırır
Cu	Korozyon direncini azaltır	Döküle bilirligi artırır	Yüksek sıcak dayanımı
Zn	Cu olduğu yerde eklenir, Korozyon direncini artırır	Akışkanlık verir	Ortam sıcaklığına dayanım
Zr	Korozyon direncini artırır	Tane inceltici etki	Çekme dayanımını artırır
Si	Fe ile birlikte korozyon direncini azaltır	Döküle bilirligi artırır	Yüksek sıcak dayanımı
RE	Korozyon direncini artırır	Döküle bilirligi artırır	Çökelme sertleşmesini iyileştirir

**Çizelge 2.4** Alaşım elementlerinin standart gösterimi. (ASM 1998, Kala 2014, Öztekin 2016, (İnt. Kyn. 1).

<b>Element adı</b>	<b>Simgesi</b>
Alüminyum	A
Bizmut	B
Bakır	C
Kadmiyum	D
Toprak alkali	E
Demir	F
Toryum	H
Stronsiyum	J
Zirkonyum	K
Lityum	L
Manganez	M
Nikel	N
Kurşun	P
Gümüş	Q
Krom	R
Silikon	S
Tin	T
Gadolinyum	V
İtrium	W

**Çizelge 2.5** Mg alaşım serilerinin ASTM standartlarıyla gösterilmesi (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn. 2).

Seri adı	Seri içeriği	Örnek
AE Serisi	Mg, Al ve RE alaşımları	AE44
AJ Serisi	Mg, Al ve Sr alaşımları	AJ52
AM Serisi	Mg, Al ve Mn alaşımları	AM50
AS Serisi	Mg, Al ve Si alaşımları	AS31
AZ Serisi	Mg, Al ve Zn alaşımları	AZ31B
EQ Serisi	Mg, RE, Ag ve Cu alaşımları	EQ21
EZ Serisi	Mg, RE ve Zn alaşımları	EZ33A
HM Serisi	Mg, Th ve Mn alaşımları	HM21A
HZ Serisi	Mg, Th ve Zr alaşımları	HZ32A
QE Serisi	Mg, Ag ve RE alaşımları	QE22A
QH Serisi	Mg, Ag ve Th alaşımları	QH21
WE Serisi	Mg, Y ve RE alaşımları	WE54
ZC Serisi	Mg, Zn ve Cu alaşımları	ZC71
ZK Serisi	Mg, Zn ve Zr alaşımları	ZK20
ZT Serisi	Mg, Zn ve Th alaşımları	ZT32

Mg alaşımları, dökme ve dövme alaşımlar olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir. Şekil 2.6 'da en yaygın Mg döküm ve dövme alaşımları gösterilmiştir. Mg, hekzagonal kristal kafes yapısına sahiptir. Hekzagonal kristal kafes yapısına sahip olması sebebiyle, yapının plastik deformasyonu, kübik kafes yapısına sahip olan çelik, bakır, alüminyum gibi metallere göre daha karmaşıktır. Bu sebeple döküm alaşımları daha fazla tercih edilmektedir. Dövme alaşımları 2003 yılından beri kullanımı hızlanmıştır (Kala 2014, İnt. Kyn. 1).

**Çizelge 2.6** En yaygın kullanılan Mg döküm ve dövme alaşımları (İnt. Kyn. 1).

En yaygın kullanılan Mg döküm ve dövme alaşımları	
Döküm alaşımları	AZ63, AM60, AZ91, AZ81, AM50, HZ32, HK31, QE22, WE54, ZE41, ZK51, ZK61, ZC63
Dövme alaşımları	AZ80, HM21, AM40, AM60, K1A, ZK60, ZC71, AZ61, HK31, AM50, M1A, M1, ZE41, ZM21

### 2.1.3 AZ31 Magnezyum Alaşımı

AZ31 alaşımı, Al ile yapılan en popüler Magnezyum alaşımlarından biridir. Yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip olduğu için alüminyum alaşımlarına bir alternatiftir. Diğer magnezyum sınıflarına kıyasla yaygın olarak bulunur (İnt. Kyn. 4). Düşük yoğunluğa sahip olması ve oda sıcaklığında mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle hafiflik ve dayanımın arandığı başta uçak imalat endüstrisi olmak üzere birçok sektör için potansiyele sahiptir (Dziubinska vd. 2015).

Çizelge 2.7’de AZ31 Mg alaşımlarının içeriği ve mekanik özellikleri verilmiştir. Bu özellikleri sebebiyle kompleks parçaların yanı sıra donanımlar, fiktürler, optik tezgâhlar, titreşim test ekipmanı gibi malzemenin boyutsal kararlılık özelliğinden faydalanılan bileşenlerin üretilmesine imkân sağlar. Bazı ark kaynağı yöntemleriyle kaynak edilebilirler. Stres giderme tavlama ve tam tavlama işlemine tabi tutulabilirler (Alkan 2018, İnt. Kyn. 3). AZ31 Mg alaşımları düşük maliyetli olmasının yanı sıra daha çok levha formunda kullanılmaktadır (Kazan 2019).

**Çizelge 2.7** AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri (Callister ve Rethwisch 2013, İnt. Kyn.1).

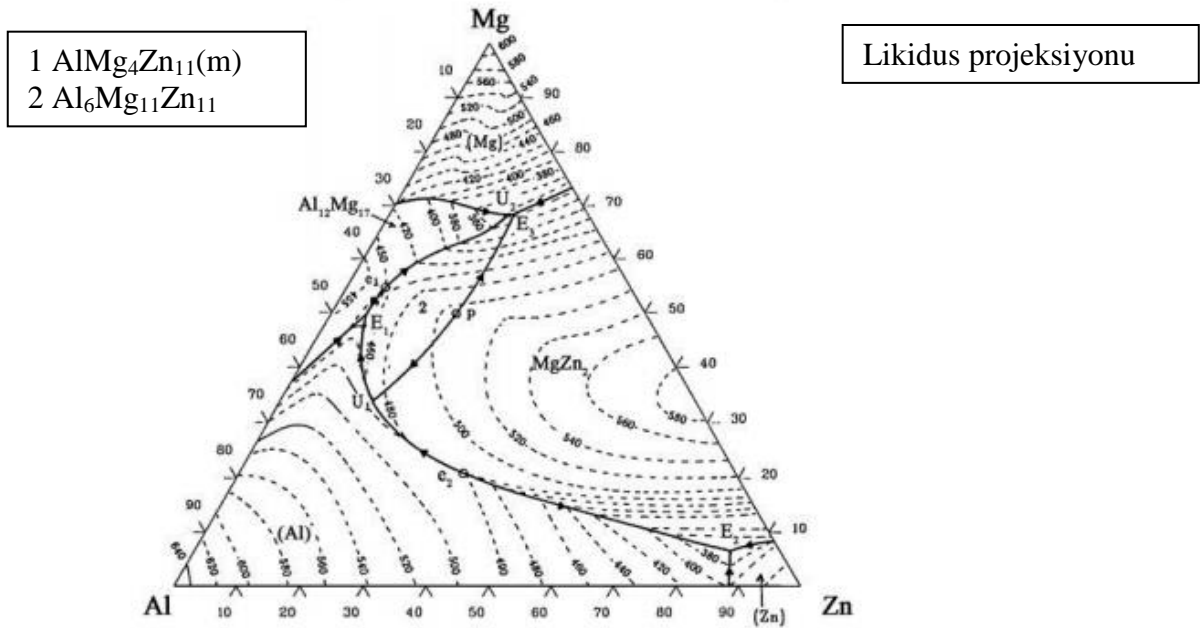
<b>AZ31 bileşimi ve mekanik özellikleri</b>			
Bileşim	%94,4 Mg(min.), 3,0 Al, 0,20 Mn(min.), 1,0 Zn, 0,1 Si(max)		
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,77	Kırılma tokluğu (Mpa)	28
Elastik modül (Gpa)	45	Çekme dayanımı (Mpa)	290-262
Akma dayanımı (Mpa)	200-220	Isıl genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /°C)	26
Poison oranı	0,35	Isı iletim katsayısı (W/m.K)	96 <sup>a</sup>
Özgül ısı (J/m.K)	1024	Elektrik özdirenci (Ω.M)	9,2x10 <sup>-8</sup>

Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminde 12 intermetalik bileşik bulunmaktadır ve 14 katı faz bulunmaktadır. Çizelge 2.8’de yüksek ergime derecesine sahip olan bazı intermetalik fazlar gösterilmiştir.

Bu fazlar arasından  $\tau$  ve  $\eta$  fazları, yüksek çözünme sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle yüksek sıcaklık dayanımı aranan çalışma alanlarında kullanılma potansiyeline sahiptirler (Schwam vd. 2000, Kazan 2019). Şekil 2.9’da Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı verilmiştir. Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminde 12 intermetalik bileşik bulunmaktadır ve 14 katı faz bulunmaktadır. Çizelge 2.8’de yüksek ergime derecesine sahip olan fazların bir kısmı gösterilmiştir. Bu fazlar arasından  $\tau$  ve  $\eta$  fazları, yüksek çözünme sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle yüksek sıcaklık dayanımı aranan çalışma alanlarında kullanılma potansiyeline sahiptirler (Schwam vd. 2000, Kazan 2019).

**Çizelge 2.8** Yüksek ergime derecesine sahip olan bazı intermetalik fazlar (Schwam vd. 2000, Kazan 2019).

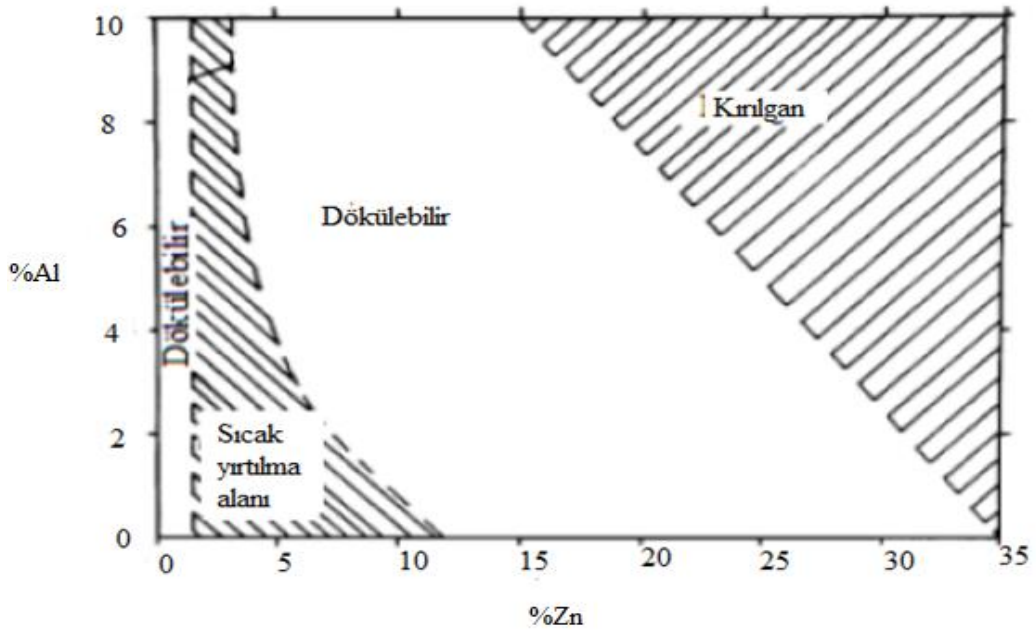
Faz	Sembol	Ergime derecesi
$Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$	$\tau$	<535
$MgZn_2$	$\eta$	<590
$Mg_{17}Al_{12}$	$\gamma$	<460
$Al_{12}Mg_5Zn_2$	$\Phi$	393-535



**Şekil 2.9** Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı (Zhang ve Couture 1998, Kazan 2019).



Mg-Al-Zn üçlü sisteminin en önemli avantajı dökülme kabiliyetinin iyi olmasıdır. Fakat 120 °C altında olan sıcaklıkta zayıf sürünme direnci göstermektedir (Kazan 2019). Şekil 2.10'da Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminin dökülebilirlik durumu gösterilmektedir. Mg-Al-Zn alaşımları endüstride önemli bir yere sahiptir. Mg alaşımlarının; ağırlıkça hafiflik, iyi mukavemet değerine sahip olması ve korozyon dayanımının iyi olması gibi özelliklerin birleşimine sahip olmasıyla beraber, Al+Zn alaşım oranı %10 u geçmemektedir (Atalay 2006).



Şekil 2.10 Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminin dökülebilirliği (Zhang ve Couture 1998, Kazan 2019).

Diyagramın bölgeleri ele alınacak olursa 4 bölgeden oluştuğu görülmektedir;

- AZ alaşımları düşük Zn içerikli dökülebilir bölgede yer almaktadır. Bu bölgede  $Mg_{17}Al_{12}$   $\alpha$  (Mg) ve fazları vardır.
- $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  intermetalik bileşiği yüksek Zn içerikli dökülebilir bölgededir (Kazan 2019).

#### 2.1.4 AZ91 Magnezyum Alaşımı

AZ91 (Mg-%9Al-%1Zn) serisi alaşımlar, en çok tercih edilen ticari Mg alaşımlarıdır. Çizelge 2.9'da AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri gösterilmektedir. İyi dökülebilme, mekanik özelliklerinin iyi olması, plastik şekil verilebilme gibi özellikleri, tercih edilmesindeki önemli etkenlerdendir. AZ91 alaşımı, korozyon direnci, iyi mekanik özellikler ve iyi dökülebilirlik kombinasyonu sağlasa da sürünme direnci zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet değerlerinde düşüş görülmektedir. Bu düşüş sebebiyle 120 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanıma uygun değildir (Zhang ve Couture 1998, Kazan 2019).

AZ91 alaşımı, özellikle otomotiv sektöründe kokil kalıp döküm şeklinde kullanıldığından, alaşımın özelliklerini iyileştirmek için çeşitli çalışmalar ve mikroalaşımlama işlemleri yapılmaktadır. Bu alaşımlama işleminden biri olan Ca ilavesi ile AZ91 alaşımının sıcaklıkta çalışma kabiliyetinin iyileştiği (130-150 °C) saptanmıştır. Ancak bu alaşım miktarı %0,2'yi aştığı durumda alaşıma kırılabilirlik verdiği sonucu elde edilmiştir. Oda sıcaklığı koşullarında, en iyi sürünme direnci sergilediği sonucu elde edilmiştir (Zhang 2000, Çelik 2014).

**Çizelge 2.9** AZ31 Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri (Callister ve Rethwisch 2013, İnt. Kyn.1).

<b>AZ91 bileşimi ve mekanik özellikleri</b>			
Bileşim	89.0 Mg (min.), 9,0 Al, 0.13 Mn (min.), 0,7 Zn, 0,1 Si (max)		
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,81	Elektrik özdirenci (Ω.M)	17x10 <sup>-8</sup>
Elastik modül (Gpa)	45	Çekme dayanımı (Mpa)	165-230
Akma dayanımı (Mpa)	97-150	Isıl genleşme katsayısı (10 <sup>-6</sup> /°C)	26
Poison oranı	0,35	Isı iletim katsayısı (W/m.K)	72a

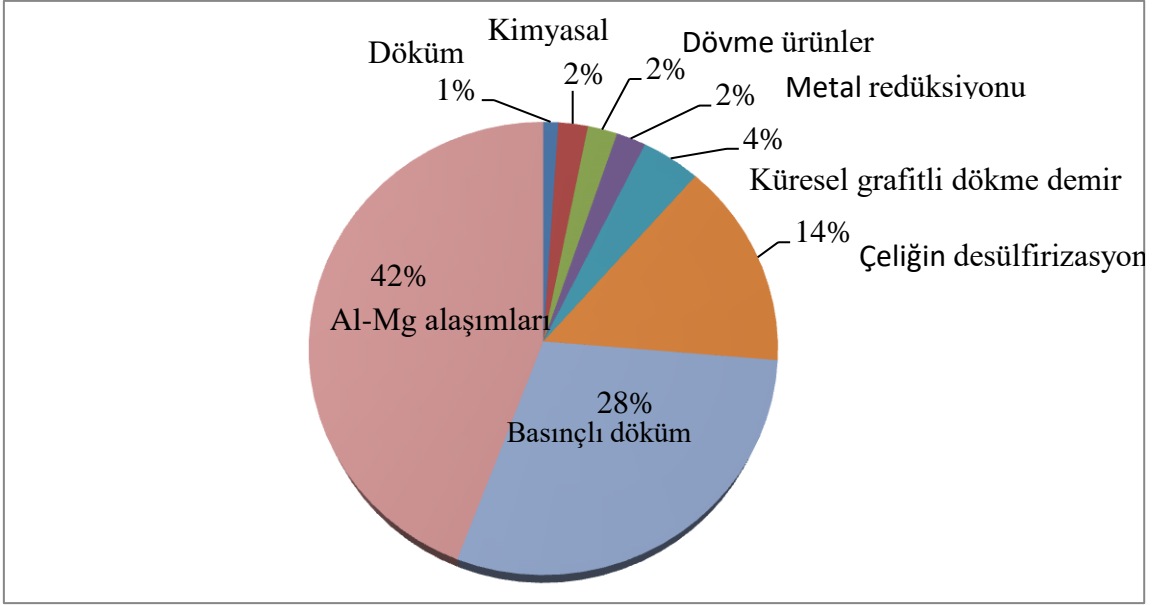
### 2.1.5 Magnezyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum alaşımları dünya çapında çeşitli farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Genel mukavemetten ödün vermeden ağırlık azaltma istenen yerlerde tercih edilen bir malzemedir. Titreşim sönümleme kapasitesi, yüksek hızlı bileşenlerin iç kuvvetlerinin azaltılması gereken uygulamalarda faydalıdır.

En yaygın uygulama alanları şunlardır:

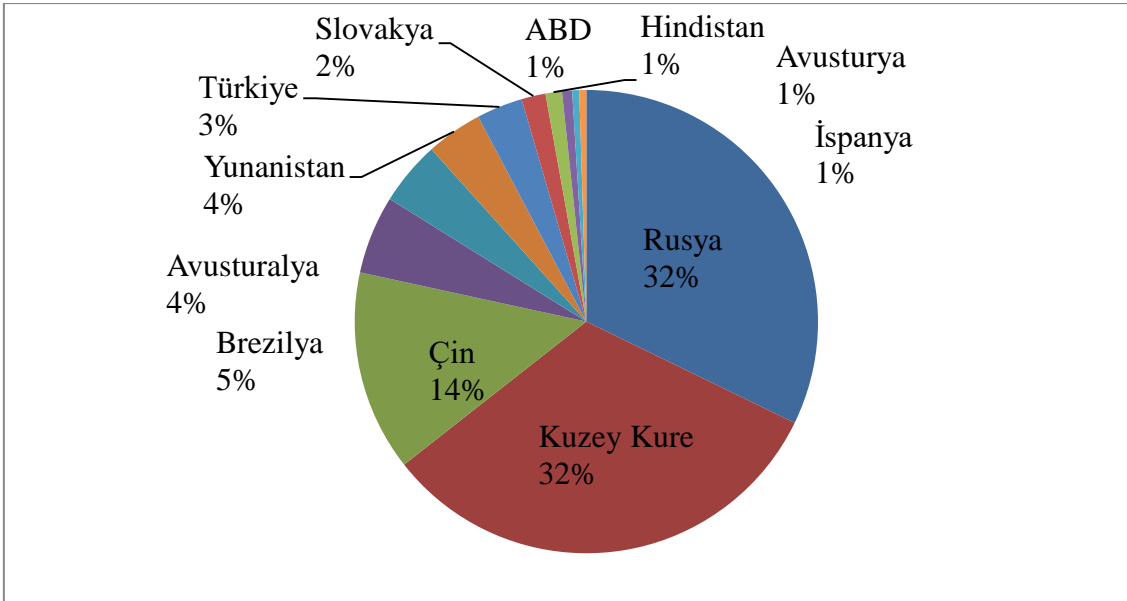
- Savunma ve havacılık alanında; uçak motoru bağlantıları, kontrol menteşeleri, yakıt depoları ve kanatları, jet motoru fan çerçeveleri, uçak ve helikopter şanzıman muhafazaları, uzay aracı ve füzeler,
- Ağırlık tasarrufu en önemli etken olmakla birlikte otomotiv sektöründe; tekerlekler, muhafazalar, şanzıman kutuları, motor blokları, direksiyonlar ve kolonlar, koltuk çerçeveleri, vites kutusu, IP kirişleri, sürücü hava yastığı yuvaları, yakıt deposu kapakları,
- Elektronik alanında; dizüstü bilgisayarlar, televizyonlar, cep telefonları, kameralar, taşınabilir medya cihazı muhafazaları,
- Hafiflik ve darbe direnci sebebiyle spor ekipmanlarında; golf sopaları, tenis raketleri, ok yaylarının sapları, bisiklet çerçeveleri, patenler, tonoz direkleri,
- Zehirli etkisinin olmaması sayesinde medikal alanda; implantlar ve koruyucu kaplamalarda kullanılır.

Şekil 2.11'de Magnezyumun kullanım alanlarının yüzdelik dağılımı gösterilmektedir. Bu alanlarla ilişkili olarak; gözlük çerçevesi, tüfek dürbünleri, zincirli testereler, el makası, el matkapları, havalı çivi tabancaları ve ot kırıcılar gibi elde taşınan aletler ve cihazlar magnezyum uygulamaları için mükemmel adaylardır. Magnezyum ayrıca elektrikli süpürgeler gibi küçük ev aletlerinde de yerini buldu. Dökme demir yapımında ve uranyum başta olmak üzere çeşitli metallerin tuzlarından saflaştırılması işleminde kullanılır. Şömine tuğlaları, aydınlatma ampulleri, renk maddeleri ve filtrelerin yapımında da yeri vardır. Yeşil bitkilerde bulunan klorofil yapısında da yer alır. Ayrıca havai fişeklerin patlarken ortaya çıkardıkları renkleri vermek için de çeşitli bileşiklerle birlikte kullanılır (Kumar vd. 2015, İnt. Kyn.5, İnt. Kyn.6).



Şekil 2.11 Magnezyumun kullanım alanları (Emley 1966).

Şekil 2.12’de; 2019 yılı itibariyle ülkelerin manyezit rezervleri gösterilmektedir (İnt. Kyn.8). Magnezyumun ticari üretimi 1886 yılında Almanya ‘da başlamıştır. 1916 yılına kadar üretim yapan tek ülke Almanya olmuştur. İngiltere, Amerika, Rusya, Fransa ve Kanada’da askeri uygulamalar ve işaret fişekleri için kullanılmıştır. Şu anda Çin, önde gelen magnezyum tedarikçisidir (Kumar vd. 2015).



Şekil 2.12 Dünya çapında büyük ülkelerin 2019 yılı itibariyle manyezit rezervleri (İnt. Kyn. 8).

## 2.1.6 Alüminyum Oksit Kaplamaların Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

Alüminyum oksit; bilinen ismiyle alümina, alüminyum ve oksijenin tepkimeye girmesi sonucu oluşan kimyasal bir bileşiktir. Dünyada en fazla tercih edilen oksit maddeler arasında yer almaktadır. Bayer prosesi ile üretilen alüminyumun %93 'lük kısmı Al üretiminde kullanılırken, kalan yüzdelik kısım kalsine Alümina ve özel Alümina üretimi için kullanılmaktadır. Çizelge 2.10'da  $Al_2O_3$  'in genel özellikleri verilmiştir. Sertliği sebebiyle aşındırıcı malzeme olarak, ergime noktasının yüksek olması sebebiyle de refrakter malzemesi olarak tercih edilmektedir (İnt.Kyn.10).

$Al_2O_3$ , elektrik yalıtkanlığı özelliğine sahiptir. Ancak termal iletkenliği yüksektir. Suda çözünmez. Metalik alüminyumun hava şartlarına karşı direnci alümina ile doğrudan etkilidir. Alümina, metalik alüminyumun üzerinde yaklaşık 4nm kalınlığında pasivizasyon tabakası oluşturur. Bu katman, metali oksidasyondan korur. Korozyon direnci bakımından saf alüminyuma kıyasla çok daha iyidir (İnt.Kyn.10).

**Çizelge 2.10**  $Al_2O_3$  'in genel özellikleri.

$Al_2O_3$	
Yoğunluk	3,95g/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	2,072 °C (3,762 °F; 2,345 K)
Kaynama noktası	2,977 °C (5,391 °F; 3,250 K)
Termal iletkenlik	30 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Termal genleşme katsayısı	7,3.10 <sup>-6</sup> /K
Koku	Kokusuz
Çözünmez	Çözünmez

Alümina; fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle şeffaf zırh üretimi, cam endüstrisi, seramik endüstrisi, birincil alüminyum üretimi, seramik kesici üretimi, refrakter endüstrisi, plastik için dolgu maddeleri, endüstriyel katalizör, boyar madde, fiber kompozit, aşınma koruyucu kaplama, elektrik yalıtımı gibi alanlarda kullanılmaktadır (İnt.Kyn.10, İnt.Kyn.11).

### **2.1.7 Titanyum Dioksit Kaplamaların Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları**

Günümüzde 100'den fazla titanyum alaşımı bulunmaktadır, ancak bunlardan sadece 20 ila 30'u ticari statüye ulaşmıştır. Bu alaşımlardan %50'den fazla kullanımı ile Ti6Al-4V ilk sırada yer almaktadır. Geriye kalan %20 ila 30 ise alaşımsız titanyumdur (Leyens ve Peters 2003).

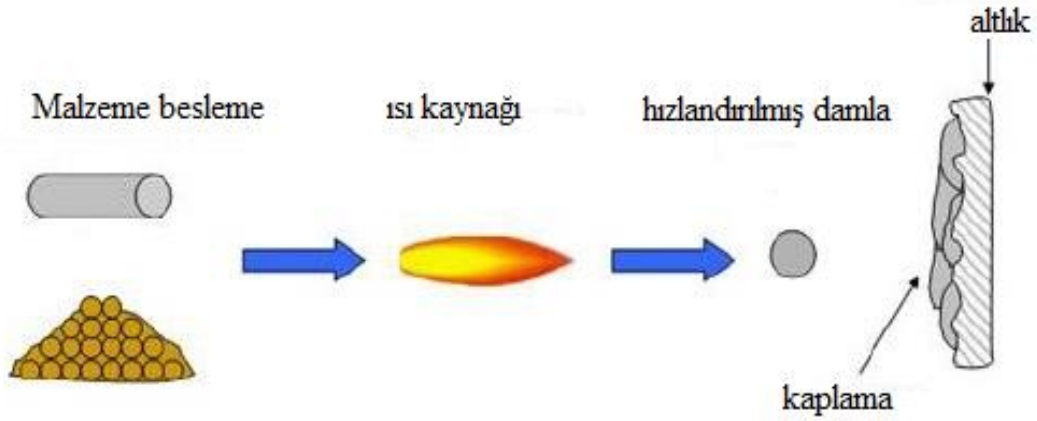
Titanyum dioksit, doğal olarak oluşan bir mineraldir ve titanyumun oksitlenmiş halidir. Beyaz ve opaktır. Rutil ve anataz en önemli kristal formları arasındadır. Belirgin bir kokusu yoktur. Bu özellikleri sebebiyle toz formundaki hali opaklık ve beyazlık verici madde olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra porselenlerde ağartıcı olarak kullanılmaktadır ve parlaklık ve asit dayanımı özelliklerini iyileştirmektedir. Fotokatalitik aktivitesi sebebiyle ultraviyole ışınlar karşısında kendini temizleme yeteneğine sahiptir. Kaplama, boya, mürekkep, diş macunu, gıda boyası gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Gardon ve Guilemany 2014, İnt.Kyn.14).

Birçok metal oksit arasında fonksiyonel kaplamaların elde edilmesinde TiO<sub>2</sub> oldukça önemlidir. TiO<sub>2</sub> pigmentleri, kaplamalarda çözünmezler, kaplama bölgesine dağılırlar. Bu sebeple, fiziksel, kimyasal ve fotokimyasal performans özellikleri kimyasal bileşim yüzeyinden belirlenmektedir (İnt.Kyn.15).

### **2.2 Termal Püskürtme Yöntemleri**

Termal sprey; metalik veya metalik olmayan kaplamaları uygulamak için, mevcut kaplama teknolojileri arasında yaygın kullanım alanı bulmuş ve çok sayıda farklı yöntemin oluşturduğu bir kaplama teknolojisi ailesinin genel adıdır. Bu kaplama yönteminde ana amaç, belirlenen yüzeyde aşınmaya dayanıklı ve koruyucu aynı zamanda da ince bir tabaka elde edebilmektir. Bu işlemler, alev püskürtme, elektrik ark püskürtme ve plazma ark püskürtme olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır.

Şekil 2.13’de termal sprej kaplama yöntemi prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Bu proseste; enerji kaynakları yardımıyla kaplama malzemesi (toz, tel veya çubuk formunda ) yarı erimiş duruma getirilmektedir. Elde edilen ısıtılmış parçacıklar, proses gazları veya atomizasyon jetleri yardımıyla altlık malzeme üzerine itilmektedir. Çarpmanın ardından parçacıklar yüzey ile bir bağ oluşturarak kalınlık oluşumuna sebep olmaktadır ve katmanlı bir yapı oluşturmaktadır. Sonrasında da çok yüksek soğuma hızları ile soğutulularak ve kaplama oluşumu tamamlanmaktadır Başarılı bir kaplama ile aşınmaya uğramış parçaları yeniden istenen ölçülerine geri getirmek, genel korozyondan korunma sağlamak, aşınma dayanımı artırmak gibi birçok olumlu etki aynı zamanda sağlanabilmektedir (Davis 2004).



Şekil 2.13 Termal sprej kaplama prensibi şematik görünümü (İnt. Kyn.12).

Altlık malzeme düşük bir termal yüke maruz kalmaktadır. Bu sayede, erime noktası çok yüksek olan malzemeler bile parçanın özelliklerini değiştirmeden ince işlenmiş veya tamamen ısıl işlem görmüş parçalara uygulanabilmektedir. Bir diğer avantaj ise, birçok durumda parça boyutlarını veya özelliklerini değiştirmeden hasar görmüş veya aşınmış olan kaplamalar soyularak yeniden kaplama yapılabilir. Dezavantaj olarak ise biriktirme işleminin görüş hattı sınırlı olması durumu söylenebilir. Sadece tabancanın gördüğü alan kaplanabilir. Termal sprej kaplama yöntemi; uzay teknolojisi, petrol ve havacılık gibi endüstrilerde kullanım alanı bulmaktadır. Tıbbi aletler, türbin motor bileşenleri, implant protezleri, kâğıt makineleri, baskı ruloları, petrokimyasal pompa ve valfler, iletişim, elektronik, pişirme gereçleri gibi birçok alanda sayısız ürün örnek olarak verilebilir (Davis 2004).

### **2.2.1 Alev Püskürtme Yöntemi**

Alev sprej kaplama yöntemi, bilinen en eski termal sprej kaplama yöntemidir. Yaklaşık 100 yıl önce icat edilmiştir ve modernleştirilmiş haliyle günümüzde hala kullanılmaktadır. Diğer yöntemlere nazaran en basit ve en ucuz yöntemdir. Toz, çubuk ve tel besleme kullanılabilir. Besleme stoğu malzemesi, yakıtın asetilen, hidrojen veya propan olabileceği bir oksijen yakıt alevinde eritilerek altlık malzemeye doğru hızlandırılması prensibine dayanmaktadır. Hammadde enjeksiyonu, torç tipine bağlı olarak aksel veya radyal olabilir. Ana proses parametreleri 120–250 mm aralığında püskürtme mesafesi, açık atmosferde püskürtme ve maksimum 250 °C'ye ulaşan yüzey sıcaklıklarıdır.

Sermaye ihtiyacının düşük olması ve kullanımının basit olması, dolgu oranının yüksek olması ve bakım masrafının düşük olması en önemli avantajları arasında yer almaktadır. Fakat aynı zamanda; nispeten yüksek gözenekli yapı, darbeye ve noktasal yüklemelere karşı düşük direnç göstermesi, metal esaslı bileşenlerde yüksek oksidasyon sınırlı kalınlık elde edilmesi (0,5 mm- 3,5 mm) ve düşük çalışma sıcaklığı gibi olumsuz özelliklere de sahiptir (Davis 2004, Roberge 2008, Espallargas 2015).

### **2.2.2 Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi**

Elektrik ark püskürtme yöntemi, aralarında oluşturulan bir elektrik arkı yardımıyla parçacıklar halinde eritilen teller, altlık malzeme üzerine püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Elektrik ark spreji yönteminde sıcak gaz jetleri yoktur. Diğer termal püskürtme işlemleri ile ayrılan özelliği; parçacıklar ark bölgesinde oluştuktan veya atomize edildikten hemen sonra damlacık/parçacık sıcaklıkları düşmeye başlamaktadır ve eridikçe tel uçlarını bırakmaktadır. Diğer işlemlerde artan ve ısıtma üreten bekleme süresi, elektrik ark sprej prosesinde parçacıkların soğutulmasına hizmet etmektedir. Çünkü atomize edici jetler yalnızca parçacıkları kaplanacak yüzeye doğru hızlandırmak için kullanılmaktadır.



Elektrik ark püskürtme yöntemi uygulamalarında yüksek dolgu oranlarına ulaşılabilmektedir. Altlık malzeme daha az ısıya maruz kaldığı için daha düşük gerilme oluşmaktadır. Bu nedenle termal verimlilik olarak diğer yöntemlerden daha üstündür. Temel proses parametreleri olarak; 50–170 mm aralığında püskürtme mesafesi, açık atmosferde püskürtme, kontrollü atmosfer ve vakum, elektriksel olarak iletken malzemeler (örn. Zn, Al, Mo ve NiCr alaşımları) veya Tungsten gibi seramik fazlar içeren özlü teller verilmektedir.

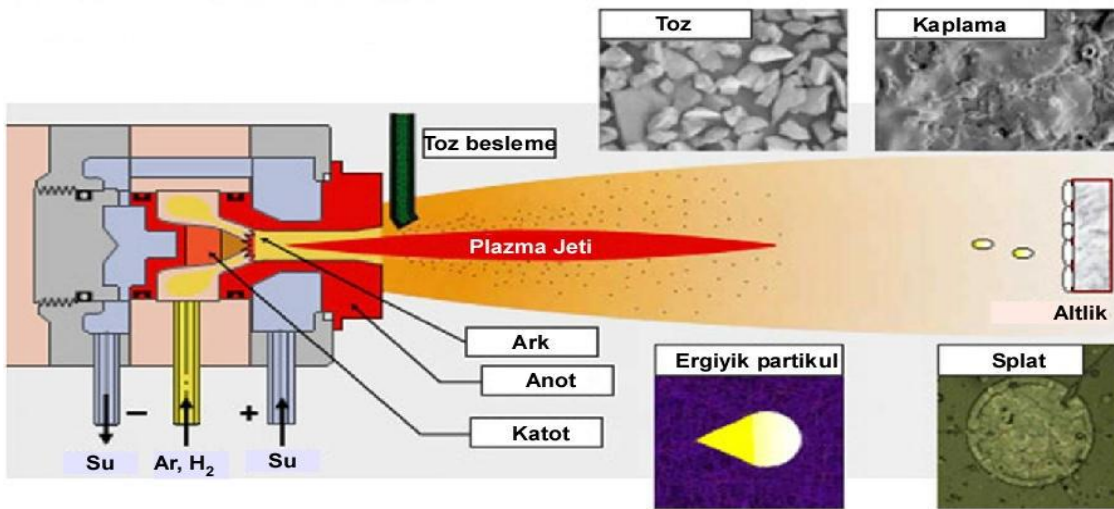
Elektrik ark püskürtme, bakır ve çinko gibi basit metalik kaplamalar ve bazı demir alaşımları için kullanılabilir. Bu yöntem, maksimum 1,5 mm çapında elektriksel olarak iletken, yumuşak telin kullanılması ile sınırlıdır, bu sebeple karbürler, nitrürler ve oksitler püskürtülemezler. Daha kalın kaplamaların yapılabilme kabiliyeti, metalik olmayan malzemelerin üzerine (plastik, seramik, cam) kaplama yapılabilmesi, yoğun kaplama oluşturulabilmesi de önemli avantajları arasındadır. Erozyona ve sürtünmeye karşı dayanım elde edilmek istene kaplama proseslerinde elektrik ark sprej yöntemi tercih edilebilmektedir (Davis 2004, Roberge 2008, Espallargas 2015).

### **2.2.3 Plazma Sprej Püskürtme Yöntemi**

Plazma terimi yüksek sıcaklıkta atomların iyonizasyonu için serbestçe eşit yoğunlaşma bulunan pozitif ve negatif şarjların taşındığı bir toparlanma durumunu ifade eder. 12000 K veya daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında plazma çekirdek bölgesi meydana gelir, fakat nozula olan uzaklığın bir fonksiyonu olarak bu bölge aniden azalma gösterir. Toz parçacıkları bir taşıyıcı gaz vasıtasıyla plazma jeti içerisine beslenir, plazma jeti içerisinden geçen toz parçacıkları ergir veya yarı ergir ve kaplanacak yüzeye doğru hızlıca hareket ederek çarparak yüzeyde katı duruma gelir. Toz parçacıklarının hızı toz besleme hızına bağlı olarak 600 m/s değerine kadar ulaşabilmektedir. Fiziksel olarak proses birçok operasyon parametresi ile kontrol edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü, porozite oranı, yapışma mukavemeti, kalınlık gibi birçok kaplama karakteristiği bu parametrelerin tercihi ile değişebilir (İnt. Kyn.13).

Şekil 2.14’de plazma sprej kaplama yöntemi proses şeması gösterilmektedir. Bu processte; plazma püskürtme tabancasında, plazma torku bir anot (bakır veya grafit) ve bir katot (tungsten) tarafından üretilir. Anot ve katot arasında eriyen elektrik ark deşarjı, atmosferde genişleyen ve bir jet oluşturan gazı (veya gaz karışımını) iyonize eder. Hammadde malzemesi (toz) içine enjekte edilir. Jet, hızlandırılarak alt tabakaya doğru itilir. Ana işlem parametreleri 60-130 mm aralığında olup açık havada püskürtme, kontrollü atmosferde veya vakum ve toz hammadde 20-90 mm boyut aralığında olabilmektedir. Kaplamadaki artık gerilmeleri önlemek için seramik malzemeleri püskürtürken alt tabakanın sıcaklığı 100-200 ° C aralığında tutulmalıdır (Espallargas 2015). Argon ve Hidrojen kullanan bir tabanca tasarımında ortalama kullanım ömrü 8-10 saat olurken, farklı bir tasarımda bu süre 100-160 saat aralığında olabilmektedir. Argon / Helyum tabancası tasarımları, bazı çalışma koşullarında birkaç yüz saatlik ömür beklentilerine sahipken, diğer yüksek enerjili Argon / Helyum anotları sadece 80 saat sürebilir. Artan entalpi sırasına göre ortak plazma gazı kombinasyonları şunlardır:

- Argon (Ar)
- Argon/helyum (Ar / He)
- Argon/hidrojen (Ar/H<sub>2</sub>)
- Azot (N<sub>2</sub>)
- Azot/hidrojen (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) (Davis 2004).



Şekil 2.14 Plazma sprej yöntemi proses şeması (Pawlowski 2008).

Bir plazma püskürtme ünitesi güç kaynağı, gaz kontrol birimi, soğutma sistemi, toz besleme sistemi ve bir plazma tabancası gibi ekipmanlardan oluşmaktadır. Sistemin en önemli parçası plazma tabancasıdır. Plazma alevi bir doğru akım aksının tungsten katot ile plazma tabancası içinde bulunan bir bakır nozul arasında hareket etmesi ile üretilir. Oluşan elektrik arkı argon, hidrojen, helyum, nitrojen gazları veya bir gaz karışımı ile nozul içerisinde dengede tutulur. Gaz akışı vasıtasıyla plazma jeti sıcaklığı artırılır, hızlandırılır ve bu gazların bir kısmı plazma jetini oluşturmak için ark içerisinde iyonize olur (Pawłowski 2008).

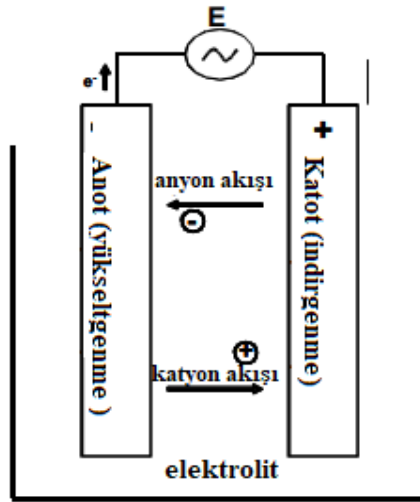
Plazma püskürtme metalik ve metalik olmayan toz malzemelerini kapsayan çok geniş bir plazma püskürtme malzeme çeşitliliğinde kullanılabilir. Ni, Co esaslı yüksek erime noktasına sahip oksidasyona ve korozyona dirençli metalik kaplamalar, WC-Co-Cr vb. aşınmaya dirençli kaplamalar ve alümina gibi seramik kaplamalar plazma püskürtme yöntemi ile başarılı şekilde üretilebilir. Plazma sprej, yanmalı proseslerin aksine refrakter metaller ve seramikler benzeri çok yüksek erime noktalı malzemeleri püskürtebilme avantajına sahiptir. Plazma püskürtmeli kaplamalar, diğer termal püskürtme işlemlerinden genellikle çok daha yoğun, daha güçlü ve daha temizdir. Plazma sprej kaplama prosesi ile çok yönlü ve çok daha geniş yelpazede ürünlere uygulamalar yapılabilmektedir. Plazma püskürtme işleminin bazı göreceli dezavantajları ise yüksek maliyet ve işlemin karmaşıklığıdır (İnt. Kyn.9).

## **2.3 Magnezyum ve Alaşımlarında Korozyon**

### **2.3.1 Korozyon**

Birçok malzeme farklı ortamlarda çeşitli etkileşimlere uğrarlar. Bu tür etkileşimler sonucunda malzemenin süneklik, dayanım gibi mekanik özelliklerinde ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler ve bozunumalar meydana gelmektedir. Malzeme işlevini yitirmekte ve kullanım dışı kalabilmektedir. Bu malzeme ve özellik kayıpları ise uygulamalarda istenmeyen durumlara neden olabilmektedir.

Korozyon, genel tabiri ile bir metalin tahrip edici ve istenmeyen, metali çözünmeye maruz bırakan reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. Reaksiyonun gerçekleştiği ortama bağlı olarak korozyon iki ana gruba ayrılmaktadır. Reaksiyon eğer gaz ortamında oluşuyorsa kimyasal korozyon, sulu ortamda oluşuyorsa elektrokimyasal korozyondur (Callister ve Rethwisch 2013, Kazan 2019). Şekil 2.15 'de elektrokimyasal korozyon hücresi şematik olarak gösterilmektedir (Hobbs 2006).



Şekil 2.15 Elektrokimyasal hücre korozyon hücresi.

Bütün metaller, doğada bulunan en düşük enerjili formuna dönüşme eğilimindedir. Mineral halde bulunan metal cevherleri, birçok metalürjik işlemde geçerek formuna dönüşmektedir. Uygun şartlar oluşması durumunda doğadaki saf haline geri dönmek için üzerlerinde bulunan enerjiyi geri vermektedirler. Bu sebeple korozyon mekanizmalarında serbest enerji azalması olmaktadır. Bu serbest enerji değişimi ile metallerin korozyon eğilimi doğrudan ilişkilidir (Hobbs 2006).

Çizelge 2.11'de deniz suyundaki pek çok ticari alaşım ve metalin bağıl olarak reaktifliğini (reaksiyona girme kabiliyetini) göstermektedir (Callister ve Rethwisch 2013). Listenin üst sıralarında yer alan alaşımlar reaktif olmayan ve katodik alaşımlardır. En alttakiler ise anodiktir ve voltaj üretmez. Sonuç olarak doğada bulunan tüm metaller oksit, hidroksit, silikat, karbonat gibi bileşikler halinde bulunmaktadır.

İstisnai olarak altın ve platin doğada metalik halde bulunur ve birçok farklı ortamda oksitlenmeye dirençlidirler (Callister ve Rethwisch 2013).

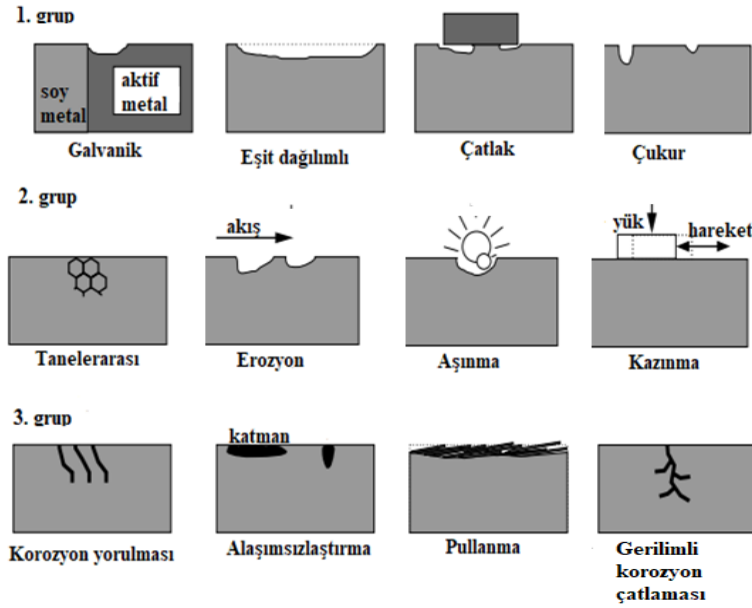
**Çizelge 2.11** Bazı metal ve ticari alaşımların bağıl reaktiflik değerleri.

<b>Aktiflik durumu</b>	<b>Malzeme adı</b>
İnertlik artar ↑ (katodik)	Platin
	Altın
	Grafit
	Titanyum
	Gümüş
	316 Paslanmaz çelik (pasif)
	304 Paslanmaz çelik(pasif)
	İnkone(80Ni-13Cr-7Fe) (pasif)
	Nikel(pasif)
	Monel (70Ni-30Cu)
	Bakır-Nikel alaşımları
	Bronzlar (Cu-Sn alaşımları)
	Bakır
	Pirinçler (Cu-Zn alaşımları)
	İnkone(aktif)
	Nikel(aktif)
	Kalay
Aktiflik artar ↓ (anodik)	Kurşun
	316 Paslanmaz çelik (aktif)
	304 Paslanmaz çelik (aktif)
	Dökme demir
	Demir ve çelik
	Alüminyum alaşımları
	Kadmiyum
	Ticari saflıkta alüminyum
	Çinko
	Magnezyum ve Magnezyum alaşımları

### 2.3.2 Magnezyum ve Alaşımlarında Korozyon Mekanizmaları

Magnezyum; dünyada çok yaygın olarak bulunması, hafifliği, işlenme kabiliyeti gibi olumlu özellikleri ile birçok alanla kullanılmaktadır. Buna rağmen pratikte kendisinden daha yüksek ağırlığa sahip olan Alüminyumun gölgesinde kalmıştır. Bu durumun sebeplerinin arasında korozyon direnci önemli bir yer tutmaktadır.

Mg 'un aşınma ve korozyon direnci oldukça düşüktür. Tatlı su, yağ asitleri, seyreltik alkaliler, saf halojenli organik bileşikler, etilen glikol çözeltisi, hidroflorik asit alifatik ve aromatik hidrokarbonlar ve kuru florlu hidrokarbonlara karşı direnç göstermektedir. Oda sıcaklığında gaz formda olan klor, brom, iyot, flor gibi gazlar magnezyuma saldırmaz. Fakat nemli, asidik veya nötr ortamlarda uzun süreli direnç gösteremez.



**Şekil 2.16** Ana korozyon grupları ( 1.Grup: Çıplak göz ile görülebilen korozyon türleri, 2.Grup: Özel ekipman ile görülebilecek korozyon türleri, 3.Grup: Mikroskop ile görülebilecek korozyon türleri).

Birçok tuz çözeltisi, metanol ve etanol, halojenli bileşikler, çoğu mineral asitler veya sıcaklık ve nem bulunan ortamlarda deniz suyu tarafından korozif saldırıya uğrar. Reaktiflik özelliği sebebiyle pil anodu olarak kullanılmaktadır Birçok metal için anodik olduğundan genellikle kurban anot olarak kullanımı yaygındır ve birçok malzemeye koruma sağlamaktadır. Ancak bu durum Mg alaşımlarında farklılık gösterebilmektedir. Malzeme yüzeyinde Mg (OH)<sub>2</sub> film tabakasının dengede olması halinde korozyon direnci yumuşak çeliklerden daha iyi seviyede olmaktadır (Schweitzer 2007). Günümüzde bilinen ve en sık karşılaşılan çeşitli korozyon mekanizmaları, tespit edilme yöntemleri esas alınarak şekil 2.16'da gösterilmiştir (Kaftan 2006).

### 2.3.3 Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon; birbirinden farklı elektrokimyasal potansiyele sahip iki ya da daha fazla metalin, aşındırmaya uygun bir elektrolitin bulunması durumunda oluşan korozyon çeşididir. Bir başka ifadeyle belirtilecek olursa, temas halinde bulunan farklı metal ve alaşımların aynı ortama maruz kalması durumunda ortaya çıkan korozyon çeşididir. Galvanik hücrelerde enerji kaynağı kimyasal değişimdir. Bu sebeple galvanik hücrenin oluşumunun neden olduğu ve akım bulunan korozyona galvanik korozyon denilmektedir. Metaller arasındaki potansiyel fark, korozyonun oluşması için itici güçtür.

Belirli bir ortamda uygulama için malzeme seçimi yapılmadan önce ortamın pasif ya da aktif durumda olup olmayacağı belirlenmelidir. Korozyon mekanizmasında; elektrot ile irtibatla bulunan iki farklı malzemedan daha az asil olan ve aktif durumda olan anot haline gelmektedir ve paslanmaya meyillidir. Daha soy olan metal ise katottur. Katodik malzeme korozyona en az uğrayan taraftır. Çizelge 2.12’de en sık karşılaşılan galvanik hücreler verilmiştir. Galvanik hücredeki paslanma meyili, metalin galvanik serideki konumu ile belirlenir. Birbirine yakın konumda olan metaller, minimum seviyede korozyon riski taşır (Ahmad 2006, Kaftan 2006).

**Çizelge 2.12** En sık karşılaşılan galvanik hücreler.

<b>Galvanik ikili</b>	<b>Korozyona uğrayan</b>
Çelik ve bakır yüzey	Çelik
Çelik ve alüminyum	Alüminyum
Çelik ve kurşun	Çelik
Yeni ve eski boru	Yeni boru

Galvanik korozyon, çok sık görülmekte olduğu için çok sayıda örneğine rastlamak mümkündür. Resim 2.1’de galvanik korozyon vaka örneği görülmektedir (Pedferri 2018). Bunlardan bazıları şu şekildedir:

- Çelik borular ile pirinç bağlantı elemanlarının galvanik korozyona uğraması,
- Gemi gövdeleri ile bronz veya pirinç pervanelerin temas etmesi ile oluşan galvanik korozyon,

- Kusurlu yapılan kaplama sebebiyle bakır kaplı çelikte görülen galvanik korozyon,
- Özgürlük heykelinde görülen galvanik korozyon,
- Toprağa gömülü telefon kablolarında bulunan alüminyumda görülen galvanik korozyon (Ahmad 2006).

Galvanik korozyon mekanizması bazı durumlarda fayda elde edilecek şekilde kullanılabilir. Kurban anot yöntemiyle ana malzemeye kendinden daha aktif bir metal bağlanarak katodik koruma yapılmaktadır. En çok kullanılan galvanik anotlar; Magnezyum anot, Alüminyum anot ve Çinko anottur (Team 1999).

Magnezyum ve alaşımları, galvanik korozyona karşı oldukça hassastır. Cu, Ni, Fe gibi elementler, yüksek hidrojen potansiyeline sahip olmaları sebebiyle Mg için uygun verimlilik sağlayan birer katotturlar (Kazan 2019).



**Resim 2.1** Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde galvanik korozyon vaka çalışması.

Galvanik korozyon, Mg alaşımlarında ortak görülen bir korozyon tipidir. Örneğin, hafif güç iletme parçalarında ve otomotiv gövdelerinde Mg parçalar çelikler ile birleştirildiğinde veya kaynak yapıldığında galvanik korozyon meydana gelebilir. İnsan vücudunda bulunan sıvılarda, bozunabilen Mg vidalar titanyum ve paslanmaz çelikten yapılmış kemik plakalarına bağlandığında önemli derecede galvanik korozyon meydana gelmektedir (Zeng vd. 2018).



### 2.3.4 Eşit Dağılımlı Korozyon

Eşit dağılımlı korozyon; en sık karşılaşılan korozyon çeşididir. Aynı zamanda, malzemede en fazla ağırlık kaybının yaşandığı korozyondur. Fakat diğer korozyon çeşitlerine göre daha az endişe duyulmaktadır. Çünkü ortalama korozyon hızının her yerde aynı olduğu kabul edilir, parçada eşit derecede ağırlık kaybı yaşanır ve korozyon hızı tahmin edilebilmektedir. Bu sayede, aktif ortamlarda bulunan ve korozyona uğrayan malzemelerin ömrü hakkında yakın tahminler yapılabilir.

Atmosferik korozyon, eşit dağılımlı korozyonun en yaygın örneğidir. Asidik çözeltilerde bulunan paslanmaz çelik, CO<sub>2</sub> içeren ortamda bulunan karbon çeliği, tüm pH aralığı boyunca kurşun, düşük ve yüksek pH çözeltilerinde bulunan Alüminyum, karbonatlı beton, toprak ve deniz suyu, eşit dağılımlı korozyon vakalarına örnek olarak gösterilebilmektedir. Resim 2.2'de Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan, ahşap bir kiriş içinde 150 yıl kalan bir karbon çelik çivinin yerel korozyonu görülmektedir (Pedefferri 2018). Eşit dağılımlı korozyondan korunabilmek için farklı koruma yöntemleri uygulanarak malzemenin korunması sağlanabilmektedir (Kaftan 2006, Schweitzer 2007, Pedefferri 2018).



**Resim 2.2** Ahşap bir kiriş içinde 150 yıl kalan bir karbon çelik çivinin yerel korozyonu. Kirişin dışındaki kavisli bölge daha belirgin bir incelme yaşamıştır.

### 2.3.5 Çatlak Korozyonu

Çatlak korozyonu, oksijen konsantrasyonlarındaki bölgesel farklılıklardan kaynaklanan, zarar verici bir korozyon çeşididir. Güçlü ve hızlı bir şekilde bölgesel alanlara odaklanır. Genellikle ilk aşamalarda görünmesi zordur. Resim 2.3'de Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan bir çatlak korozyonu vaka çalışması örneği gösterilmiştir (Pedferri 2018). Çatlak korozyonu en çok deliklerde, conta yüzeylerinde, bağlantı noktalarında ve bağlantı elemanlarının alt bölgelerinde görülmektedir. Parçalarda bulunan birleştirilmiş yüzeyler arasındaki boşluklar, çatlak korozyonu için ideal yerlerdir ve ortadan kaldırılması imkânsızdır. Ayrıca, korozyon direnci yüzey oksit filmlerine göre gelişen alüminyum ve paslanmaz çelik gibi metaller, özellikle klorür iyonları içeren deniz suyu gibi ortamlarda, çatlak korozyonuna elverişlidir.

Çatlak korozyonunun en büyük tehlikelerinden birisi gövde bileşenlerini delebilecek olmasıdır. Bu denli büyük zararlardan korunabilmek için çatlak korozyonu ile mücadele edilmesi gerekmektedir. Bunun en etkin yollarından bazıları; tasarım aşamasında çatlak ve boşlukları en aza indirilmesi, parça hizmete girdikten sonra ise yüzeylerin temiz tutulması ve düzenli bakımların yapılmasıdır (Team 1999, Schweitzer 2007).

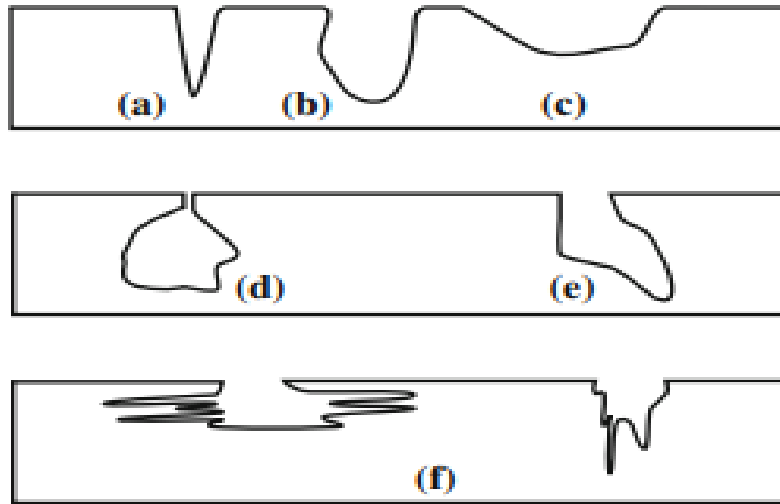


**Resim 2.3** Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan çatlak korozyonu vaka çalışması.

### 2.3.6 Çukur Korozyonu

Çukur korozyonu; çoğunlukla klorürlerin sebep olduğu yerel bir korozyon mekanizmasıdır ve diğer korozyon mekanizmalarıyla ilişkilidir. Çukur korozyonu, çatlak korozyonunun kendiliğinden başlayan şeklidir. Çukurlar, çapları ile derinlikleri eşit yarıklardır. Çukurlar genellikle metalin homojen olmaması sebebiyle başlamaktadır. Bu süreç, hızlı bir şekilde yayılan ve nihayetinde metali delen çukur oluşturmaktadır (Team 1999). Çukur oluşumu, tespit edilmesi ve tahmin edilmesi zor olan bir korozyon çeşididir. Bu sebeple tek tip korozyon hasarlarından daha tehlikelidir. Malzeme kaybı az olmasına karşın, küçük bir çukur tüm sistemde arızaya ve pahalı ekipman maliyetlerine sebep olabilmektedir (Roberge 2008).

Çukur korozyonu, Mg alaşımlarında en sık rastlanan korozyon çeşididir. Mg alaşımın yüzeyinin özel mikro yapı özellikleri ve kimyasal bileşimi, çukurun oluşumunu belirlemektedir. Şekil 2.17’de çukur korozyon çeşitleri şematize edilerek gösterilmiştir (Pedferri 2018). Ayrıca, tane boyutu, ısıl işlem durumu, kimyasal bileşim ve morfoloji de Mg alaşımlarının korozyonu üzerinde etkili olmaktadır (Zeng vd.2018).



**Şekil 2.17** Çukur korozyon çeşitleri a) dar, derin b) eliptik c) geniş d) yeraltı e) alttan kesme f) mikro yapısal yönelim.

### 2.3.7 Taneler Arası Korozyon

Taneler arası korozyon; bir metalin tane sınırları boyunca korozyona maruz kaldığı lokal bir saldırı şeklidir. Görsel olarak her zaman tespit edilememektedir. Malzeme yapısında bulunan alaşım elementlerinin konsantrasyonunun yeterli seviyeye gelmesiyle ikinci faz veya bileşen tane sınırına çökebilmektedir. Tane sınırlarına çökelen intermetalik fazlar, yapıyı hassas ve reaktif bir hale getirmektedir. Tane sınırları ile bitişik taneler arasındaki korozyon potansiyeli bakımından bir fark meydana gelmektedir. Bu fark iki bölge arasındaki kimyasal bileşim farkından meydana gelmektedir ve korozyon için itici gücü oluşturmaktadır. Bu tip bir saldırı, özellikle mekanik özellikler için çok tehlikeli olabilmektedir. Çok fazla malzeme kaybı yaşanmamasına rağmen; tane sınırlarında meydana gelecek olan korozyon, tanelerin ayrılmasına neden olabilmektedir ve bu da mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Malzemenin mekanik direnci azalabilmekte ve bazı gerilmeli ortamlarda gerilmeli korozyon çatlamasına sebep olmaktadır. Şekil 2.18 'de gösterilen taneler arası korozyon vaka çalışması, örnek olarak gösterilebilmektedir (Pedferri 2018). Mg ve alaşımları, taneler arası korozyon mekanizmasına çoğunlukla duyarlıdır. Taneler arası korozyon, çoğu zaman ısıya duyarlılıkla doğrudan ilişkilidir. Isı varlığı bulunan kaynak işlemi ve ısı işlem uygulamaları sonrasında meydana gelebilmektedir (Kaftan 2006 , Pedferri 2018, Zeng vd. 2018, Kazan 2019).



**Şekil 2.18** Politecnico di Milano Polilapp Korozyon Müzesi'nde bulunan taneler arası korozyon vaka çalışması.

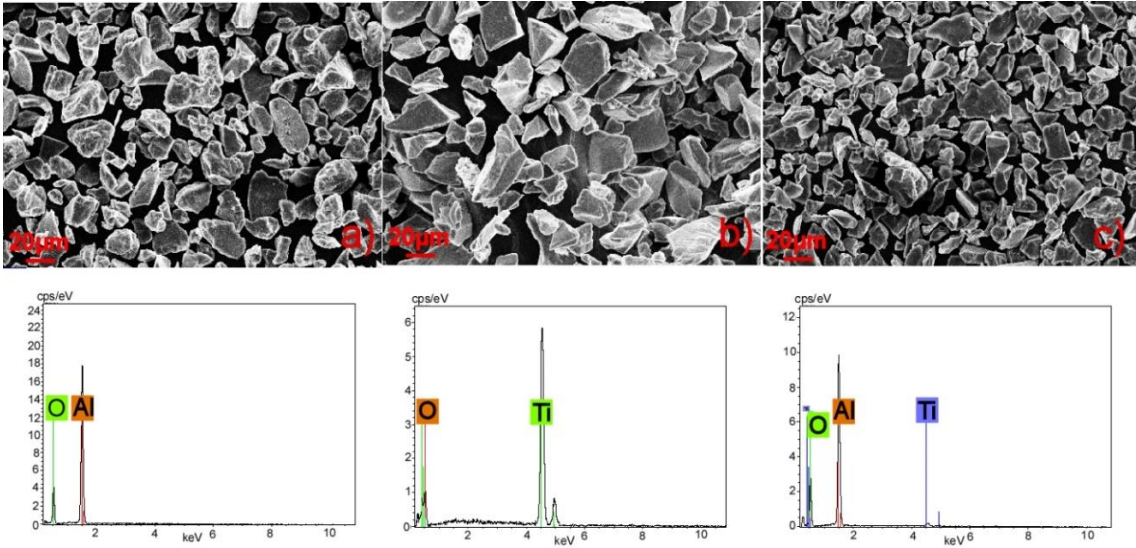
### 2.3.8 Korozyonlu Yorulma

Dinamik veya değişken gerilmeler altında olan parçalarda hasar meydana gelmesi durumuna yorulma denilmektedir (Callister ve Rethwisch 2013). Bir metal, döngüsel olarak stres altında kalması halinde çatlayarak kırılabilmektedir (Roberge 2008). Malzemeler hareketli korozyon ortamlara maruz kalabilmektedir. Böyle ortamlarda malzemeler dinamik yüklerle maruz kalmaktadır. Bunların bir sonucu olarak malzemede yoğunlaşan dinamik yükler çatlak başlangıcı oluşturmaktadır. Gerçekleşen bu duruma “korozyonlu yorulma” denilmektedir. Örnek verilecek olursa Mg alaşımları,  $\text{CaCl}_2$  ve  $\text{NaCl}$  çözeltilerinde buldukları durumlarda normal ortamda buldukları duruma kıyasla daha düşük yorulma ömrüne sahiptirler. Malzemelerde bulunan yüzey pürüzlülüğü veya çentik gibi faktörler, malzemenin korozyon yorgunluğuna duyarlılığı artırmaktadır. Şiddetli çentikler çoğu zaman tek başına yorulma ömrü üzerinde korozyondan daha fazla etkiye sahip olabilmektedirler (Jones 1996, Çim 2018). Mg alaşımları farklı yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntem farklılıkları da korozyonlu yorulma üzerinde etki sahibi olmaktadır. Örneğin döküm yöntemiyle üretilmiş olan bir Mg alaşımı ile ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş olan bir Mg alaşımının korozyon ortama maruz kalmaları durumunda, farklı dayanım değerlerine sahip oldukları bilinmektedir (Kerenciler 2014).

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Altlık Malzeme ve Kaplama Tozları

Bu çalışmada altlık malzeme olarak  $1 \text{ cm}^2$  boyutlarında saf Mg, AZ31 ve AZ91 Mg alaşımı levhalar kullanılmıştır. Kaplama üretim işlemine geçmeden önce altlık malzemeler çift taraflı bant yardımıyla bir plakaya yapıştırılmış ve kumlama işlemine tabii tutulmuştur. Böylece kumlama işlemi sebebiyle oluşması muhtemel farklı yüzey pürüzlülük seviyelerinin önüne geçilmiştir.



Şekil 3.1 Kaplama tozlarına ait SEM resimleri ve EDS analiz sonuçları, a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , b)  $\text{TiO}_2$ , c)  $\text{Al}_2\text{O}_3+\%3\text{TiO}_2$

Kumlama işleminde 50-80 mesh alümina kumu numune yüzeylerinde 200 mm mesafeden  $90^\circ$  açıyla püskürtülmüştür. Kumlanarak yüzeyi pürüzlendirilen numuneler kumlama kaynaklı kirlilikleri gidermek amacıyla teknik etanol içerisinde ultrasonik temizleyicide 30 dak. Temizlenmiştir. Temizlenen numuneler döner tabla tutucuya yerleştirilmiş ve kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

Kaplama malzemesi olarak Metco tarafından ticari olarak sunulan Metco 105 NS  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Metco 102  $\text{TiO}_2$  ve Amdry 6200  $\text{Al}_2\text{O}_3+\%3\text{TiO}_2$  tozları kullanılmıştır. Tozlara ait SEM resimleri ve EDS analiz sonuçları Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Altlık malzemelerin kimyasal kompozisyonları (Ağırlıkça %).

Spektrum	Al	Zn	Mg	Diğer(Mn, Si vb.)	Toplam
AZ 31	2,48	0,76	94,27	2,49	100
AZ 91	8,84	0,92	86,88	3,36	100
Mg			99,68	0,32	100

### 3.2 Kaplamaların Üretimi

Tozların açılı ve köşeli morfolojide olduğu görülmektedir. Ayrıca EDS analizlerinde impürite yabancı elementlere rastlanmamıştır.



**Resim 3.1** Metco 9MB plazma tabancası.

Kaplamaların üretiminde Sulzer Metco 9 MB plazma tabancası kullanılmış ve 730C nozul olarak seçilmiştir. Mg altlık malzemeler üzerine Metco 9MB plazma tabancası kullanılarak plazma püskürtme işlemi ile püskürtülmüş ve kaplamalar başarılı şekilde üretilmiştir.

Resim 3.1’de Metco 9MB plazma tabancası görülmektedir. Kaplama tabancası üç eksenli bir CNC robota bağlanarak istenen hız ve hareket ayarlanmıştır. Çizelge 3.2 ‘de plazma püskürtme işlem parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 3.2** Plazma püskürtme parametreleri.

	Akım (A)	Birincil gaz akış hızı, Ar (L/dak.)	İkincil gaz akış hızı, H <sub>2</sub> (L/dak.)	Toz besleyici gaz hızı, Ar (L/dak.)	Püskürtme mesafesi(mm)	Tabanca hızı (mm/dak)	Döner tabla hızı (Hz)
Parametreler	500	42,5	7	6,4	75	200	50

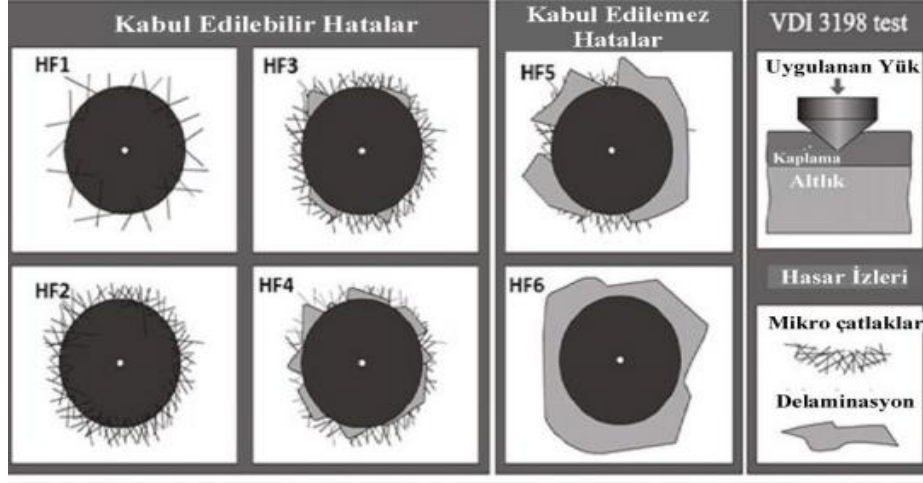
### 3.3 Yapısal Karakterizasyonlar

Kaplamaların mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu ile incelenmişken, faz yapıları kaplama yüzeyinden X-Işınları difraksiyonu alınarak incelenmiştir. Kesit mikro yapılarının incelenmesi için kaplamalı numuneler standart metalografik işlemlere tabii tutulmuştur. Kaplamalar soğuk bakalite alınmış ve büyükten başlayarak sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi tamamlanan numunelerin yüzeyleri 3µm' lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Hazırlanan numunelerin kesitten LEO 1430 VP marka taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Tozların ve kaplamaların faz yapılarının belirlenmesinde X-ışınları difraksiyonları ise  $2\theta=10-90^\circ$  aralığında ve 5°/dak. Tarama hızında Cu-K $\alpha$  radyasyon kullanılarak kaplama yüzeylerinden yapılmıştır.

### 3.4 Daimler-Benz Rockwell-C Adezyon Testleri

AZ31 altlık üzerine kaplamaların yapışma davranışının karakterize edilmesi için; 980 N yük altında Daimler-Benz Rockwell-C indentasyon testi (VDI 3198) uygulanmıştır. Test sonuçlarından elde edilen kaplama mukavemet değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunup bulunmadığı değerlendirilmiştir. Bu standarda uygun olan ve olmayan hatalar Şekil 3.2 'de gösterilmektedir. Buna göre adezyon bakımından 1-4 şekiller kabul edilebilir düzeyde iken 5 ve 6 ise kabul edilemez olarak değerlendirilmiştir.

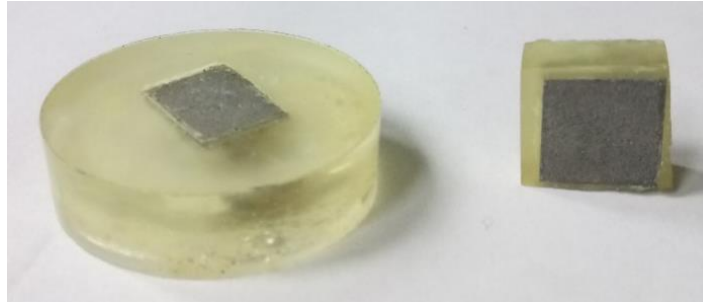




Şekil 3.2 VDI 3198 girinti testi ve hataların görünüşleri (Claveria vd. 2019).

### 3.5 Elektrokimyasal Korozyon Testleri

Kaplanan numuneler enine kesilerek, kesit yüzeyleri 120-1200 grit zımparadan geçirilerek, 1  $\mu\text{m}$ 'luk alümina ile parlatma işlemine tabi tutularak, metalografik olarak hazırlanmıştır. Resim 3.2'de bakalite alınmış korozyon deneyi numunesi gösterilmektedir. Üretilen kaplamalar kesitten ve yüzeyden elektron mikroskobu ile incelenecek ve XRD ile faz yapıları belirlenecektir. %3,5'lik NaCl çözeltisi içerisinde kaplamaların elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.2 Bakalite alınmış korozyon deneyi numunesi.

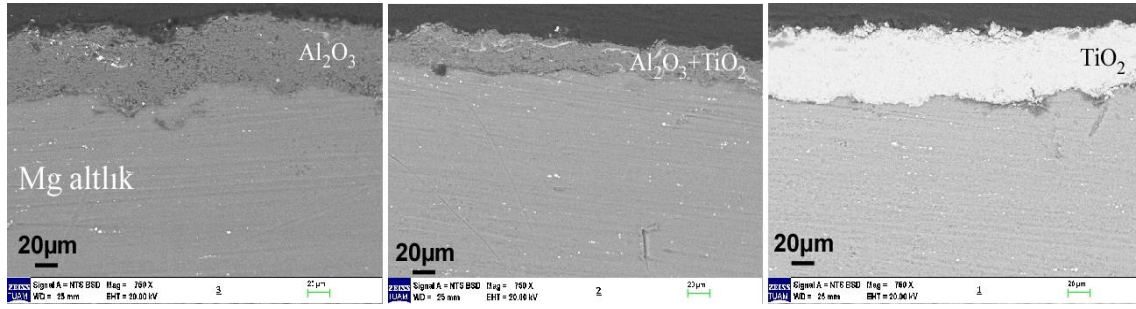
Elektrokimyasal korozyon deneyleri Gamry referance 600 potansiyostat/galvanostat ZRA ve Echem Analyst Soft yazılımı ile karakterize edilecektir. Korozyon deneylerine başlamadan önce kaplanan numuneler 35°C'de 15 dak. Aseton, 15 dk. Etanol ve 15 dak. çift distile edilmiş su ile ultrasonik olarak temizlendikten sonra 50°C'de Etüv de 1 saat bekletilerek kurutulmuştur.

Temizlenen numuneler %3,5 NaCl çözeltilisinde 1 saat bekletilerek kararlı hale gelmesi sağlanmış ve arkasından aynı çözeltilide 37 °C de potansiyodinamik korozyon deneyleri başlatılmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl, karşıt elektrot olarak ise 1 cm<sup>2</sup>'lik Pt levha kullanılmıştır. Elde edilen akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinden korozyon akımı (I<sub>corr</sub>), korozyon hızı, Polarizasyon direnci (R<sub>p</sub>) ve korozyon potansiyeli (E<sub>corr</sub>) değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra korozyon akımının yüzey alanına bölünmesiyle korozyon akım yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) bulunmuştur.

## 4. DENEYSEL BULGULAR

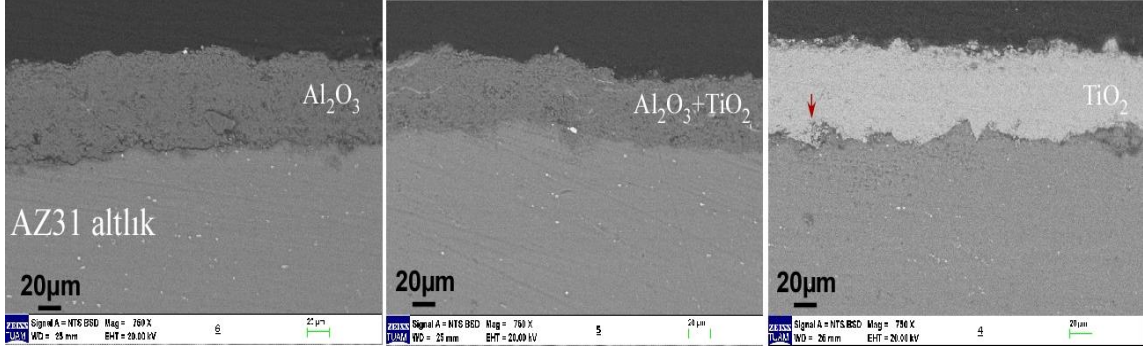
### 4.1 Mikroyapısal Karakterizasyon

Şekil 4.1’de Mg altlık üzerine plazma püskürtme ile üretilmiş seramik kaplamalara ait kesit SEM resimleri verilmiştir. Tüm kaplamalar altlık malzemeye kusursuz olarak yapışmıştır. Kaplama altlık ara yüzeylerinde boşluk, çatlak gibi istenmeyen etmenlere rastlanmamıştır. Kaplama mikro yapıları plazma püskürtme ile üretilmiş seramik kaplamaların geleneksel mikro yapı özelliklerini taşımaktadır. Tüm kaplamalar için mikro-poroziteli bir mikro yapıdan söz edilebilir.  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  kaplamaların kalınlıkları yaklaşık  $60\mu m$  civarında iken,  $Al_2O_3+\%3TiO_2$  kaplamanın kalınlığı  $40\mu m$  civarındadır.



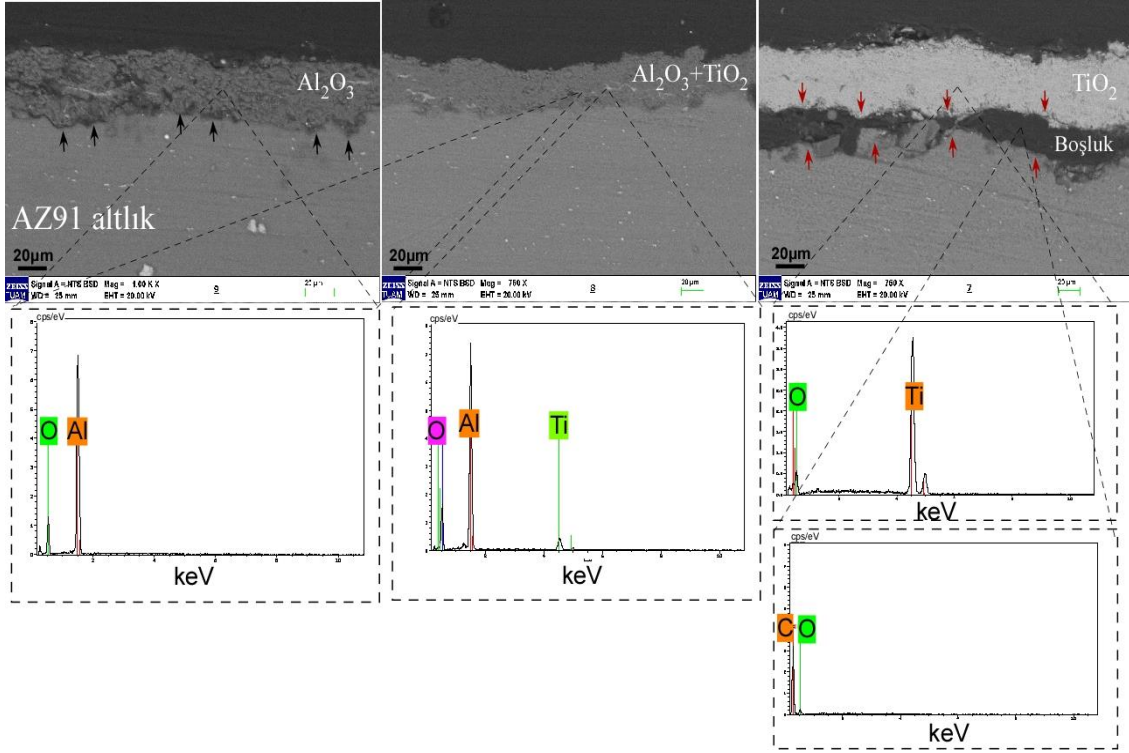
Şekil 4.1 Mg altlık üzerine üretilmiş kaplamaların kesit SEM resimleri.

Şekil 4.2’de ise AZ31 altlık üzerine üretilmiş kaplamalara ait kesit SEM resimleri verilmiştir. Kaplamaların altlık malzemeye yapışma davranışları göz önüne alındığında, çatlaksız ve boşluksuz bir kaplama-altlık ara yüzeyi olduğu söylenebilir. Bu durumda kaplamalar için iyi bir yapışma rejiminden söz edilebilir. Kaplama mikro yapıları plazma püskürtme ile üretilmiş kaplamaların mikro yapısal özelliklerini taşımaktadır. Seramik katmanlar rastgele dağılmış mikro poroziteler içermektedir. Kaplama kalınlıkları irdelendiğinde  $60-70\ \mu m$  aralığında bir kaplama tabakası biriktiği söylenebilir.



Şekil 4.2 AZ31 Mg alaşımı üzerine üretilmiş kaplamaların kesit SEM resimleri.

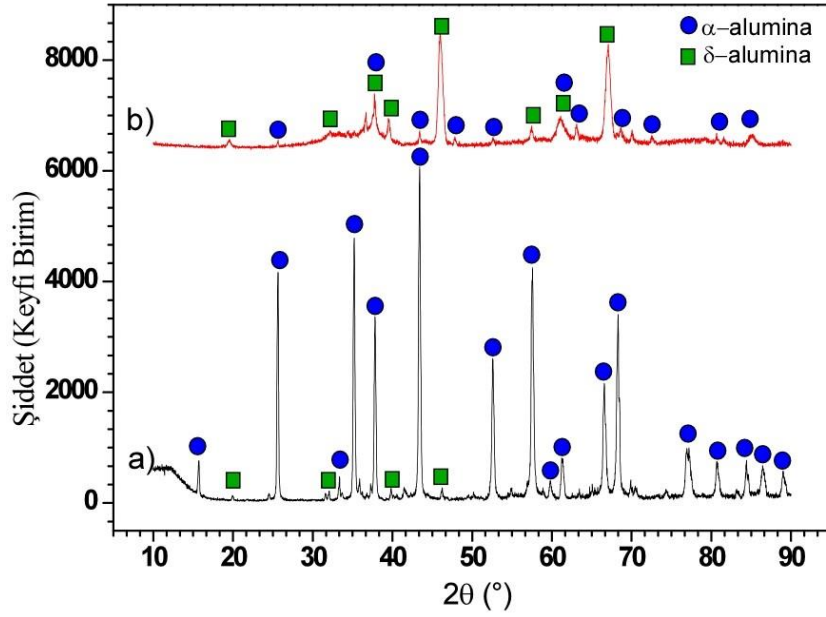
Şekil 4.3'te AZ91 magnezyum alaşımı üzerine üretilmiş seramik kaplamaların kesit mikro yapıları görülmektedir. Diğer altlıklar üzerine üretilmiş kaplamalar ile karşılaştırıldığında, AZ91 üzerine üretilmiş  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{TiO}_2$  kaplamaların mikro yapılarının istenmeyen karakterde olduğu değerlendirilebilir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ +%3 $\text{TiO}_2$  kaplamada ise diğer altlıklarda olduğu gibi düzenli bir mikro yapı söz konusudur.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamada altlık-kaplama ara yüzeyinde yer yer çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bu çatlaklar siyah oklar ile işaretlenmiştir. Ayrıca kaplama tabakası içerisinde de çatlaklar söz konusudur. Bu çatlaklar kaplama üretimi esnasında oluşabilirken, numune hazırlama esnasında da oluşabilmektedir.  $\text{TiO}_2$  kaplamada ise altlık-kaplama ara yüzeyinde yapışma rejimini olumsuz etkileyecek büyük boşlukların varlığı belirlenmiştir. Bu boşluklardan EDS alındığında bu bölgelerin C ve O elementleri içerdiği anlaşılmıştır. Kaplama üretimi esnasında altlık malzemelerin  $500^\circ\text{C}$ 'lere ısınması ve hızlı soğuma sonucu meydana gelen termal genişleme uyumsuzlukları ile oluşan gerilmeler ara yüzeylerde çatlaklar oluşmasına neden olmuştur. Bu çatlaklar SEM karakterizasyonu için numune hazırlama aşamasında ilerlemiş ve soğut bakalite alma işlemi esnasında bu boşluklara bakalit dolmuştur. Kaplama tabakalarından alınan EDS analizlerinde ise istenmeyen herhangi bir elemente ait piklere rastlanmamıştır.



Şekil 4.3 AZ91 Mg alaşımı üzerine üretilmiş kaplamalara ait SEM resimleri ve EDS analizi.

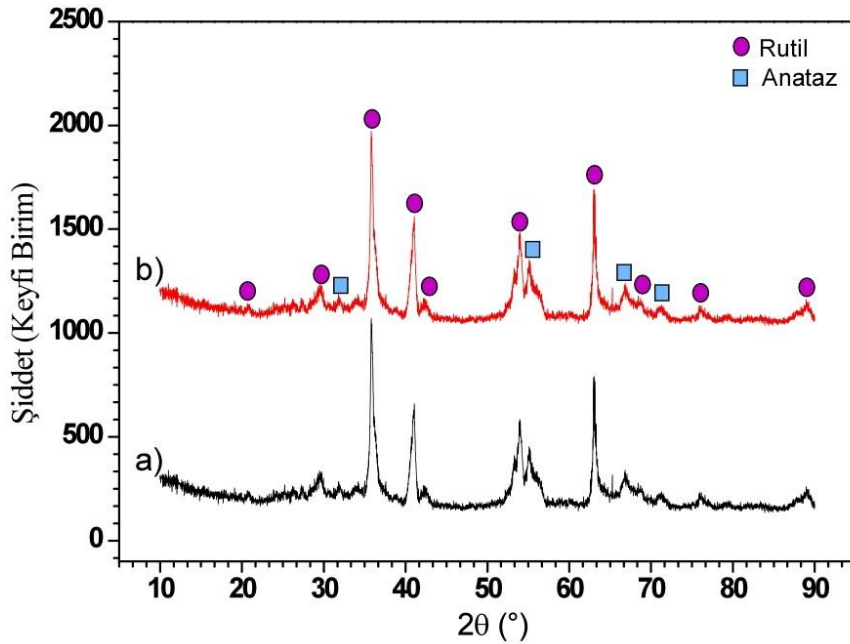
## 4.2 X Işınları Difraksiyon Analizi

Şekil 4.4'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu ve bu tozun plazma püskürtme ile üretilmiş kaplamasına ait XRD kırınım grafikleri verilmiştir. XRD grafikleri değerlendirildiğinde tozun alfa alümina ağırlıklı bir faz yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Az da olsa toz yapısında delta alümina fazı da mevcuttur. Tozun püskürtülmesi sonucu ise faz yapısında yüksek plazma entalpisi ve hızlı soğuma nedeniyle ciddi bir dönüşüm meydana gelmiştir. Ayrıca pik yükseklikleri azalmış ve kristalin fazlar amorf yapıya doğru geçiş yapmışlardır. Püskürtme sonrası delta alümina pikleri yükseklikleri artarken, alfa alümina pik yükseklikleri azalmıştır. Kaplama faz yapısı amorf faz, alfa ve delta alümina fazlarını içermektedir.



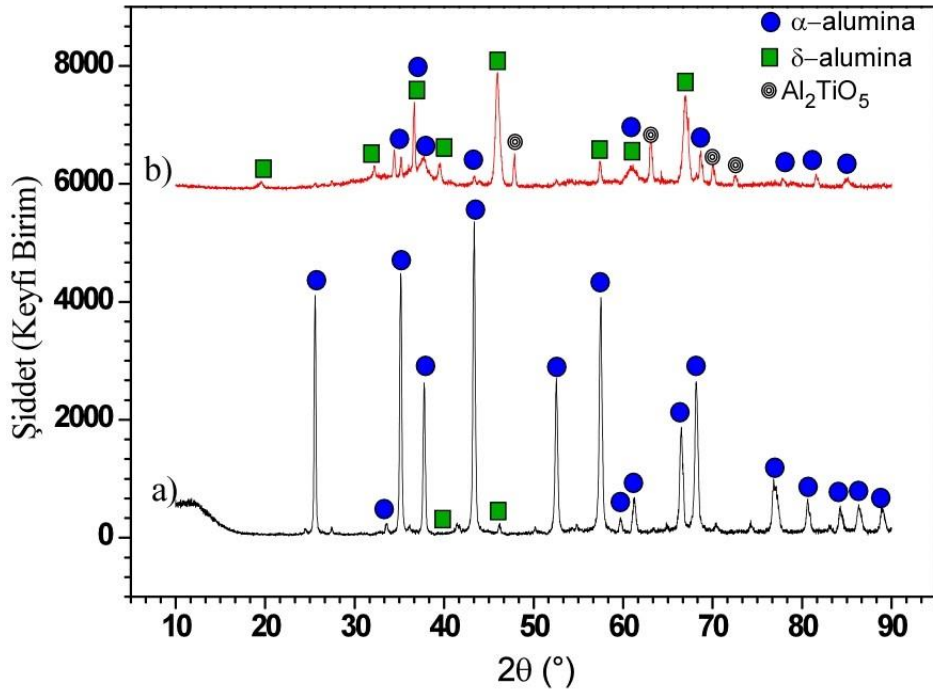
Şekil 4.4  $Al_2O_3$  tozun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği.

Şekil 4.5'te verilen  $TiO_2$  tozu ve kaplamasına ait XRD kırınım desenleri görülmektedir. Tozun faz yapısı rutil ve anataz olmak üzere iki faz içermektedir. Püskürtme sonrası kaplama faz yapısı toz ile karşılaştırıldığında ise ciddi bir farktan söz etmek mümkün değildir. Plazma püskürtme sonrası herhangi bir faz dönüşümü meydana gelmemiştir. Kaplama da tozda olduğu gibi anataz ve rutil fazlarını ihtiva etmektedir.



Şekil 4.5  $TiO_2$  tozun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği.

Şekil 4.6’da verilen  $\text{Al}_2\text{O}_3+\%3\text{TiO}_2$  tozu ve plazma püskürtme ile üretilmiş kaplamasına ait XRD kırınım grafikleri verilmiştir. Toz faz yapısı değerlendirildiğinde alfa alümina ağırlıklı bir faz yapısı mevcuttur. Düşük yüksekliklerde ise delta alümina pikleri yerleşmiştir. Plazma püskürtme sonucu ise malzemede ciddi bir faz dönüşümü meydana gelmiştir. Yüksek plazma sıcaklığı ve partiküllerin altlık malzemeye ulaştığında hızlı soğuması sonucu alfa alümina fazının amorf faza dönüştüğü söylenebilir. Alfa alümina pik yükseklikleri azalırken bir miktar alfa-delta alümina dönüşümü meydana geldiği için delta alümina pik yükseklikleri artmıştır. Ayrıca plazma püskürtme ile kaplama birikimi esnasında  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  reaksiyonu sonucu  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  fazı meydana gelmiştir (Toma vd. 2010).

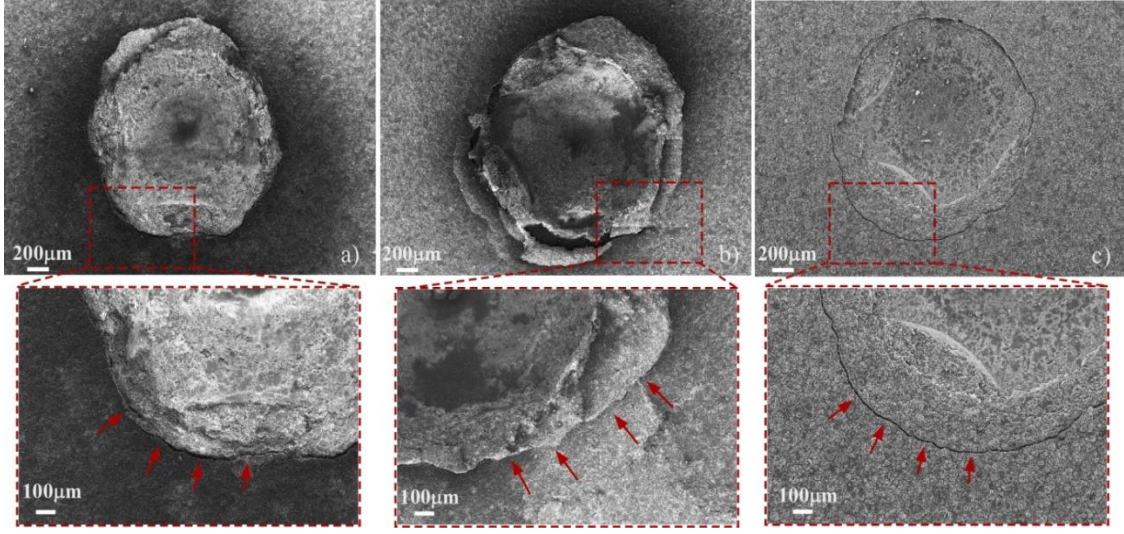


Şekil 4.6  $\text{Al}_2\text{O}_3+\%3\text{TiO}_2$  tozunun(a) ve kaplamanın (b) XRD kırınım grafiği.

### 4.3 Daimler-Benz Rockwell-C Adezyon Testleri

Şekil 4.7’ de Rockwell C adezyon testleri sonucu elde edilen indentasyon bölgelerinin SEM resimleri verilmiştir. Kaplamaların hepsi kabul edilebilir seviyede hasarlar sergilemiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{TiO}_2$  de meydana gelen hasar birbirine benzerdir.





**Şekil 4.7** Rockwell C indentasyon bölgelerinin SEM resimleri a)  $Al_2O_3$ , b)  $Al_2O_3+TiO_2$ , c)  $TiO_2$ .

Bu kaplamalarda indentasyon kuvveti ile kaplamalarda dışı doğru bir yığılma meydana gelmiştir. Kaplama tabakasında bir ayrılma ve çatlak oluşumu yoktur.  $Al_2O_3+TiO_2$ 'de ise indenterin battığı bölgede daire şeklinde çatlak oluşmuştur. İndentasyon kuvveti ile kaplamada çok az plastik deformasyon meydana gelmiştir.

Tüm bu değerlendirmelere göre tüm kaplamaların kabul edilebilir seviyede yapışma mukavemetine sahip olduğu değerlendirilebilir. Hasarlar VDI-3198 standardına göre HF3-HF4 sınıfındadır.

#### 4.4 Elektrokimyasal Korozyon Test Sonuçları

Çizelge 4.1'de korozyon deneyleri esnasında alınan ölçümlerden hesaplanan korozyon değişkenleri verilmiştir. Hesaplanan değerler incelendiğinde  $I_{corr}$  korozyon akımının beklenildiği gibi altlık malzemede en yüksek olduğu görülmektedir. Kaplama uygulaması ile korozyon akımı değeri düşüş göstermiştir. Kaplamalar arasında ise en yüksek korozyon akımı değeri  $TiO_2$  kaplamada hesaplanmışken, en düşük korozyon akımı değeri  $Al_2O_3+%3TiO_2$  kaplamada hesaplanmıştır.  $R_p$  değeri ise  $E_{corr}$  korozyon potansiyeline bağlı olarak altlık malzemenin kaplanması sonucu artmıştır. En düşük  $R_p$  değeri altlık malzemede iken, en yüksek  $R_p$  değeri  $Al_2O_3+%3TiO_2$  esaslı kaplamada ölçülmüştür.

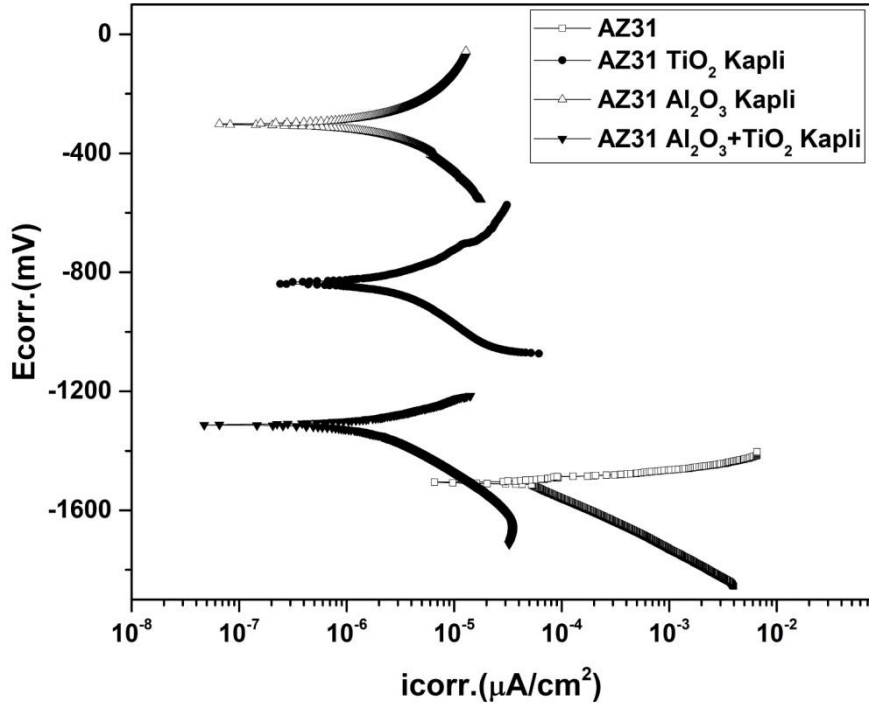


Hesaplanan korozyon hızları değerlendirildiğinde ise beklenildiği gibi kaplama üretimi sonucu ciddi bir düşüş meydana gelmiştir. Tüm kaplamaların korozyon hızı altlık malzemedeki düşüktür. Kaplamaların korozyon hızı değerlendirildiğinde ise en yüksek korozyon hızına TiO<sub>2</sub> kaplama en düşük korozyon hızına ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%3TiO<sub>2</sub> kaplama sahiptir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%3TiO<sub>2</sub> kaplama faz yapısındaki Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> fazı TiO<sub>2</sub> katkısız Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaya göre korozyon hızında büyük bir düşüğe neden olmuştur büyük bir düşüğe neden olmuştur.

**Çizelge 4.1** AZ31 altlık ve seramik kaplamalara ait korozyon değişkenleri.

<b>%3,5 NaCl çözeltisinde</b>	<b>AZ31 Altık</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub></b>
I <sub>corr.</sub> (μA)	48,90	30,10	9,130	2,410
E <sub>corr.</sub> (mV)	-1510	-836	-303	-1310
Korozyon oranı (mpy)	39,11	18,36	6,691	1,379
R <sub>p</sub> (kΩ)	0,0766	12,42	15,97	17,71

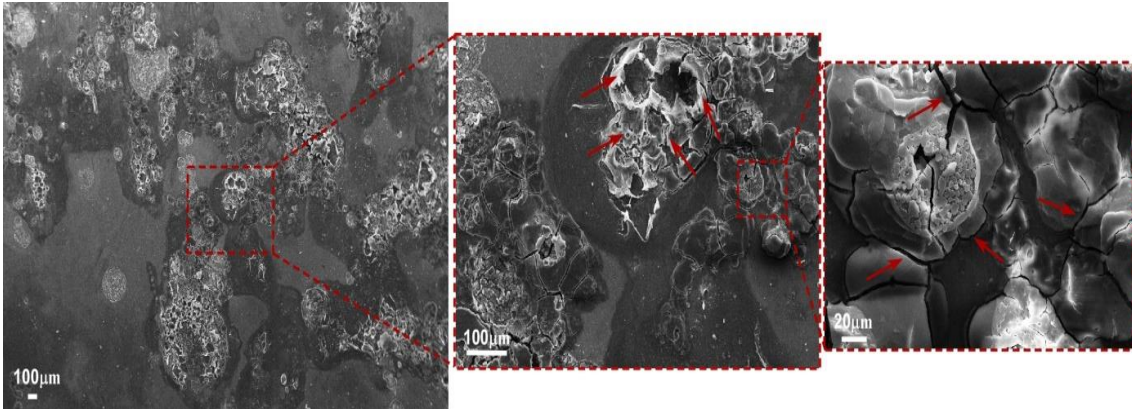
Şekil 4.8’de ise korozyon deneyleri esnasında alınan ölçümler ile çizdirilen Tafel polarizasyon eğrileri görülmektedir. Tafel bölgelerinin eğimsel rejimi ve polarizasyon bölgelerinin değişimi Çizelge 4.1’de verilen korozyon hızları değişimi ile uyumludur. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> kaplamaların anodik polarizasyon eğriler eğimi daha yüksek iken, AZ31 altlık ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%3TiO<sub>2</sub> kaplamada katodik polarizasyon eğrilerinin eğimi yüksektir. Yani AZ31 altlık ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%3TiO<sub>2</sub> korozyona uğramasında indirgenme reaksiyonları baskın iken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> kaplamada indirgenme ve oksitlenme gibi yükseltgenme reaksiyonları da etkilidir.



Şekil 4.8 AZ31 altlık ve kaplamaların Tafel polarizasyon eğrileri.

#### 4.5 Korozyon Testleri Yapılan Kaplamaların İncelenmesi

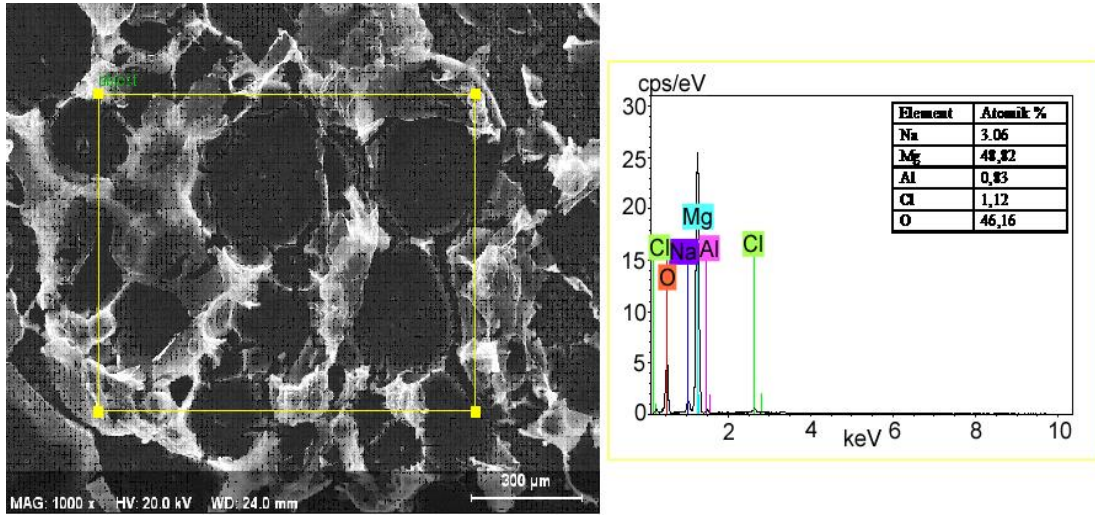
Şekil 4.9’da %3,5 NaCl ortamında yapılan elektrokimyasal korozyon testleri sonrası AZ31 Mg alaşımı altlığa ait yüzey SEM resimleri görülmektedir. Yüzey SEM resimlerinden anlaşılacağı üzere kaplamasız AZ31 altlık malzeme yüzeyinde oldukça fazla korozyona uğramış bölge ve korozyon çatlakları göze çarpmaktadır. Altlık malzeme yüzeyinde bu karakteristikte fazlaca korozyon ürünü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9 AZ31 korozyon testi sonrası SEM görüntüleri

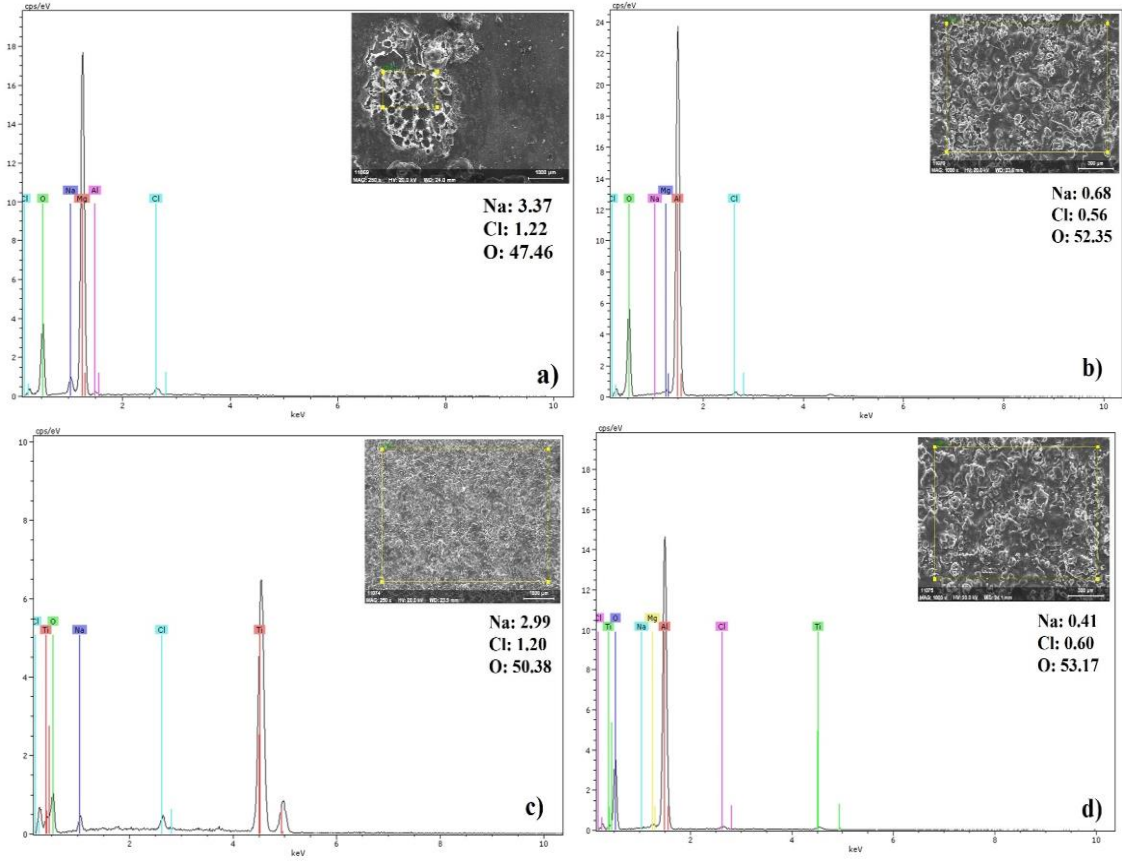
Mg tabanlı alaşımlarda NaCl ortamında korozyonun iki aşamada meydana geldiği bilinmektedir. Denklem 4.1’de verildiği üzere, Mg çözeltideki su ile reaksiyona girerek Mg (OH)<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> gazı üretir. Ardından, Denklem 4.2’deki gibi, çözelti ile temas eden yüzeyde oluşan Mg (OH)<sub>2</sub> çözeltideki Cl iyonları ile reaksiyona girerek MgCl<sub>2</sub> ve OH gazı oluşturur. Buna ilaveten, atmosfer şartlarında yüzeyde oluşan pasif MgO film tabakası da H<sub>2</sub>O ile reaksiyona girerek Mg (OH)<sub>2</sub> oluşumunu destekler. Böylece yüzeyde Mg ve O iyonlarınca zengin bir korozyon ürünü meydana gelir. Ayrıca bu dehidrasyon çatlak oluşumuna da neden olur (Bakhsheshi-Rad vd. 2007).

Şekil 4.10’da ise kaplama yüzeyinde bulunan korozyon ürünlerinden alınan alan EDS analizi görülmektedir.



Şekil 4.10 Korozyon ürünleri alan EDS analiz sonuçları.

EDS analizi yukarıda bahsedilen korozyon mekanizmasını desteklemektedir. AZ31 altlık yüzeyinde oluşan korozyon ürünleri Mg ve O elementlerince zengindir. Korozyon ürünlerinin bulunduğu bölgede atomik olarak %48,82 Mg iyonları, %46,16 O iyonları mevcuttur (Bakhsheshi-Rad vd. 2007).



**Şekil 4.11** % 3.5 NaCl çözeltisinde Korozyondan sonra a) Mg alaşımı, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı Mg alaşımı, c) TiO<sub>2</sub> kaplı Mg alaşımı, d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiO<sub>2</sub> kaplı Mg alaşımı EDX analizleri.

Şekil 4.11 incelendiğinde çözeltide bulunan Na ve Cl iyonları metal yüzeyine absorbe olduğu görülmektedir. Korozyon hızları ile yüzeye absorbe olan Na ve Cl iyonlarının oranları doğru oranlıdır. En iyi korozyon direncine sahip olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> kaplı kaplanmış olan magnezyum alaşımında Na ve Cl iyonları kendi içlerinde kıyaslandığında en az oranlara ve en çok oksijen miktarına sahiptir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> kaplı kaplanmış olan numune de yüzey absorbe olan Na ve Cl oranları sırayla at. % Na:0.41 ve Cl: 0.60 iken en kötü korozyon direncine sahip olan işlemsiz magnezyum alaşımında oranlar at. % Na:3.37 ve Cl: 1.22'dir. Kaplanmamış olan magnezyum alaşımında yüzeydeki oksijen miktarı 47.46 iken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> kaplı kaplanmış olan magnezyum alaşımında yüzeydeki oksijen miktarı 53.17'dir. Bu durum da yüzeyde oksijen miktarının artmasıyla, yüzeydeki filmin pasifleşmesine katkıda bulunmuştur. Bu pasivasyonu sağlayan, film tabakası yapışkan, gözeneksiz, kimyasal olarak inert olması gerekir.

Kaplama üzerinde koruyucu bir film tabakası varsa, altlık malzeme ciddi zarar görmez korozyon veya çukurlaşma olmaz, ancak oluşan film tabakası kusurlar içeriyorsa veya süreksiz ise altlık malzeme korozyona uğrayacaktır. Çukurlaşma, metalin kusurlarda çözünmesi ve çıplak metal maruz kaldığında yüzey filmi içindeki kusurlar elektrolitteki agresif anyonlara bağlıdır. Çukurlaşmaya neden olmak için, anyonlar gibi Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, vb. ilk önce metal yüzeyine adsorbe olurlar. Daha sonra bu anyonlarla, metal yüzeyinde bulunan kusurlarda metalin aktif çözünmesi başlatırlar. Fazlardan birinin farklı kimyasal bileşime veya mikro yapıya sahip olduğu ikinci fazların varlığı veya mikro hücrelerin oluşumu, bu fazlardan biri katot, diğeri ise aktif anot görevi görecektir. Bu, aktif anot gibi davranan fazlardan birinin tercihli çözünmesine neden olacak ve alaşım içinde tercihli, lokalize çözünmeye neden olacaktır. Al içeren alaşımlar, koruyucu bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alümina tabakası oluşturarak korozyona karşı korunur (Gonzalez-Rodriguez vd. 2007).

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada; Mg ve AZ31 ve AZ91 alaşımları plazma püskürtme tekniği ile  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  esaslı seramikler ile kaplanmış ve bu kaplamaların yapısal karakterizasyonları yapılarak, korozyon davranışları incelenmiştir. Elde edilen karakterizasyon sonuçları neticesinde aşağıda verilen genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Kaplamaların kesitlerinden alınan SEM resimleri sonucunda Mg ve AZ31 altlıklar üzerine  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  esaslı seramikler başarılı şekilde kaplanmıştır. AZ91 altlık için ise  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  kaplamalarda, kaplama-altık ara yüzeylerinde yapışma mukavemetini olumsuz etkileyecek çatlak, boşluk vb. yapılara rastlanmıştır. Bu durum altlık malzemelerin farklı termal genleşme katsayısına sahip olmaları nedeniyledir.  $Al_2O_3+3TiO_2$  ise AZ91 altlık üzerine başarılı şekilde kaplanmıştır. Kaplamaların tümü plazma püskürtme ile üretilmiş geleneksel kaplama mikro yapısına sahiptir.
- Kaplama ve kaplama tozlarının faz yapıları incelendiğinde  $Al_2O_3$  ve  $Al_2O_3+3TiO_2$  esaslı seramiklerden plazma püskürtme sonrası ciddi bir faz dönüşümü meydana geldiği belirlenmiştir.  $TiO_2$  seramiklerde ise böyle bir durum söz konusu değildir.  $Al_2O_3-TiO_2$  seramiklerde meydana gelen reaksiyon sonucu ise  $Al_2TiO_5$  fazı oluştuğu gözlenmiştir.
- AZ31 Mg alaşımı üzerine yapılan kaplamaların yapışma davranışları VDI 3198 standardına göre kabul edilebilir seviyededir.
- Kaplamaların korozyon deneyleri neticesinde, kaplama uygulaması sonucu Mg esaslı malzemelerin korozyon hızı düşürülmüş olup, en düşük korozyon hızına  $Al_2O_3+3TiO_2$  kaplamanın sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek korozyon hızına ise  $TiO_2$  kaplama sahiptir.

İlerleyen dönemlerde kaplamaların daha korozif ortamlarda uzun süreli korozyon davranışlarının karakterize edilmesi ve kaplamaların yapışma mukavemetlerini arttırmak için uygun bir bağ katman tasarımı araştırılabilir. Ayrıca kaplamaların korozif ortamlarda ve çeşitli gerilimler altında mekanik özelliklerinin araştırılması da bu kaplamaların Mg ve alaşımlarının kaplanmasında kullanımının uygunluğu konusunda araştırmacılara fikir verecektir.

## 6. KAYNAKLAR

- Ahmad Z, 2006, Types of Corrosion: Materials and Environments, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Burlington, Butterworth-Heinemann Elsevier , 121-270.
- Alkan K, 2018, Multiscale In-Situ Forming Analysis of AZ31 Magnesium Alloy Under Different Strain Paths, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, M.Sc. Thesis, 124p, Ankara.
- Altay M, 2012, AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektriksel Parametrelerin Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 55s ,İstanbul.
- Atalay O, 2006, Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,70s, İstanbul.
- Bakhsheshi Rad H, Hamzah E, Tok H, Asgarani M, Jabbarzare S, & Medraj M, 2007, Microstructure in Vitro Corrosion Behaviorand Cytotoxicity of Biodegradable Mg-Ca-Zn And Mg-Ca-Zn-Bi Alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 1-14.
- Barber L P, 2004, Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys, Worcester Polytechnic Institüe , M.Sc. Thesis, 108p , Worcester.
- Boyer R, Collings E, Welsch G, 1994, Materials Properties Handbook, Titanium Alloys, Asm International,1176p, Ohio.
- Callister W, Rethwisch D, 2013, Materials Science and Engineering and Introduction, Çev.: Bindal C, Çev.: Genel K, Nobel Yayıncılık, 1000s, Ankara.
- Can A, Kandemir K, 2013, Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 , 37-45.

- Candan Ş, Kuşdemir H, Türkmen M, Koç E, Ünal M, Candan E, 2009, AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine Ti Elementinin Etkisi, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu,2009, Karabük, 1-14
- Claveria I, Lostale A, Fernandez A, Castel P, Elduque D, 2019, Enhancement of Tribological Behavior of Rolling Bearings By Applying A Multilayer Zn/Zrcn Coating, Coatings , 1-18.
- Committee A ,1998, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International,275p, Ohio.
- Çelik İ, 2018, Yüzey İşlemi Uygulanmış AZ31 Mg Alaşımının Yapısal Özelliklerinin ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,9, 136-142.
- Çelik M, 2014, AZ91 Magnezyum Alaşımında Soğuma Hızlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi,1-112, Bilecik.
- Çim S, 2018, AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Özelliklerinin Ti Mikro Alaşımlama İle Geliştirilmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-98, Bilecik.
- Davis J, 2004, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, 331p,Ohio.
- Dev A, Naskar N, Kumar N, Jena A, Paliwal, M, 2019, A Systematic Investigation of Secondary Phase Dissolution in Mg–Sn Alloys, Journal of Magnesium and Alloys, 7, 725-737.
- Dziubinska A, Gontarz A, Horzelska K, Piesko P, 2015, The Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Aircraft Brackets Produced by a New Forging Technology, 2nd International Materials Industrial and Manufacturing Engineering Conference, 2015, Bali, 1-5.
- Ekinci G, 2016, (Ti,V)N Kaplamalarının AZ1 Magnezyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-80, Kocaeli.



- Emley E, 1966, Principles of Magnesium Technology, Permosson Press, 1034p, London.
- Eroğlu G, şahiner M, 2018, Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 1-23, Ankara:
- Espallargas N (Ed.), 2015, Introduction to Thermal Spray Coating, Future Development of Thermal Spray Coatings , 1-13,Sawston.
- Gardon M, Gulemaný J, 2014, Milestones in Functional Titanium Dioxide Thermal Spray Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, 1-19, Barcelona.
- Gerengi H, Kaya E, Cabrini M, 2017, Magnezyumun (%99.95) Biyobozunur Malzeme Olarak Kullanılma Potansiyeli, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6, 10-25.
- Gupta M, Sharon N, 2011, Magnesium Magnesium Alloys and Magnesium Composites, Wiley,39-46, New York.
- Hobbs LW, 2006, Electrochemical Corrosion Gibbs Free Energy, Anodic Corrosion and The Emf Series, Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1-7.
- Baker H, Introduction to Magnesium Alloys,2017,ASM International, 210p Ohio.
- Jones D A,1996, Principles and Prevention of Corrosion-Cilt 2, Prentice Hall, 587p, Reno.
- Kainer K U, 2003, The Current State of Technology and Potential for Further Development of Magnesium Applications, Wiley-Vch, 295p,Weinheim.
- Kaftan M A, 2006, Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 3-49, Denizli.
- Kala A, 2014, Magnezyum Alaşımının İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Bilecik.
- Kaya Ö, Çakır K, Bozkurt Y, 2017, Plazma Püskürtme Yöntemiyle Çelik Levha Üzerine Farklı Alaşımın Kaplanması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve, 9, 37-42.

- Kazan D, 2019, AZ31 Magnezyum Alaşımlarına İlave Edilen Farklı Alaşım Elementlerinin Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 85s, Karabük.
- Kerenciler H, 2014, Magnezyum Alaşımlarında Yaşlanma Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Karabük.
- Kumar D, Sasanka C, Ravindra K, Suman K, 2015, Magnesium and Its Alloys in Automotive Applications, Columbia International Publishing American Journal of Materials Science and Technology, 4, 12-30.
- Leyens C, Peters M, 2003, Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications, Wiley-Vch, 513p, Köln.
- Moosbrugger C, 2017, Engineering Properties of Magnesium Alloys, Asm International, 175p, Ohio.
- Özden R C, 2015, Sıcak Haddelenmiş AZ91 Magnezyum Alaşımı Üzerine Uygulanan Akımsız Ni-P-W Kaplamanın Korozyon ve Aşınma Özellikleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi, 62s, Eskişehir.
- Öztekin K, 2016, Biyobozunur AZ31 Magnezyum Alaşımlarının Üretilerek Mekanik ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,104s, Hatay.
- Öztürk F, Kaçar İ, 2012, Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1, 12-20.
- Pawlowski L, 2008, The Science and Engineering of Thermal Spray Coating, Wiley-Vch, ,597p, New Jersey.
- Pedefferri P, 2018, Corrosion Science and Engineering, Springer Nature Switzerland,720p, Milan.
- Roberge P R, 2008, Corrosion Engineering Principles and Practice, The Mcgraw-Hill Companies,754p, United States.

- Schwam D, Wallace J, Zhu Y, 2000, Enhancements in Magnesium Die Casting Impact Properties, Case Western Reserve University, Department of Materials Science and Engineering, 160p, Ohio.
- Schweitzer P A, 2007, Fundamentals of Metallic Corrosion, Press Taylor and Francis Group, 752p, New York .
- Team L T, 1999, A Guide to Corrosion Protection, The Auto/Steel Partnership,1,1-16. Michigan.
- Toma F, Et A, 2010, Corrosion Resistance of Aps and Hvof Sprayed Coatings in The  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  System, Journal of Thermal Spray Technology, 19,137-147.
- Yiğit S, 2004, Kalsine Dolomitin Silikotermik Redüksiyonu İle Magnezyum Metal Üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü ,Yüksek Lisans Tezi ,77s, İstanbul.
- Yıldız M M, 2019, AS21 Magnezyum Alaşımlarının Farklı Oranlarda Kalay İlavesi İle Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Bartın.
- Z Zhang, 2000, Development of Magnesium Based Alloys for Elevated Temperature Applications, Faculte Des Sciences Et De Genie Universite , Ph.D Thesis,75p, Canada.
- Zeng R C, Yin Z Z, Chen X B, Xu D K, 2018, Corrosion Types of Magnesium Alloys. Intechopen, 25p, London.
- Zhang Z, Couture A, 1998, An Investigation of the Properties of Mg-Zn-Al Alloys, Scripta Materialia, 39, 45-53.

## İnternet Kaynakları

- 1- [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium\\_alloy](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_alloy), 15.05.2020
- 2- <https://avesis.yildiz.edu.tr/resume/downloadfile/isahin?key=408d4c57-3655-4ec0-bc1a-becc3eeb97>, 16, 15.05.2020
- 3- <https://www.aircraftmaterials.com/data/magnesium/az31b.html>, 17.05.2020
- 4- <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=355>, 20.05.2020
- 5- [https://www.intlimg.org/page/mg\\_applications\\_ima](https://www.intlimg.org/page/mg_applications_ima), (06.06.2020)
- 6- [https://tr.wikipedia.org/wiki/Magnezyum#Kullan%C4%B1m\\_alanlar%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Magnezyum#Kullan%C4%B1m_alanlar%C4%B1), (10.06.2020)
- 7- <https://www.statista.com/statistics/264953/global-reserves-of-magnesium-by-major-countries/>, 12.02.2021
- 8- <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>, 26.02.2021
- 9- <https://www.gordonengland.co.uk/ps.html>, 28.11.2021
- 10- <https://www.etialuminyum.com/urunler/aluminyum-oksit-alumina/>, 06.05.2021
- 11- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Titanyum>, 13.07.2021
- 12- Plazma Sprey | Era Metalürji, 08.10.2021
- 13- <http://www.pcimag.com/articles/100920-examining-interfacial-adhesion-ofbiomedical-coatings>, 10.05.201
- 14- <https://www.britannica.com/science/titanium-dioxide>, 26.11.2021
- 15- <http://www.tipure.com/en/site-search-results?q=pb&q=Titanium+Dioxide+For+Coatings>, 26.11.2021

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğba BAYRAM  
Doğum Yeri ve Tarihi : Gümüşhane, 20.08.1992  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) : 05419727066 tugbabayram92@hotmail.com  
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)  
Lise : Pagev Anadolu Meslek Lisesi , (2006 –2010)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji  
Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Bölümü, (2011-2017)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Anabilim Dalı, (2018-2022)