

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ FARKLI
MALZEMELERLE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI VE ÜZERİNE
YAPILAN ARK PVD KAPLAMALARIN KOROZYON DAYANIMINA
ETKİSİ**

Emre AYKAN

**Danışman
Prof. Dr. Bekir YALÇIN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2018**



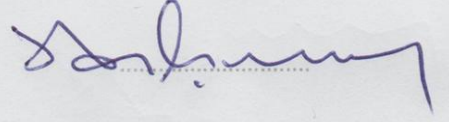
© 2018 [Emre AYKAN]

TEZ ONAYI

Emre AYKAN tarafından hazırlanan "**AZ91 Magnezyum Alaşımının Aşınma Davranışının Farklı Malzemelerle Deneysel Karşılaştırılması ve Üzerine Yapılan Ark PVD Kaplamaların Korozyon Dayanımına Etkisi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

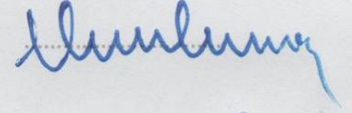
Danışman

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Nihat YILMAZ
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Gültekin BASMACI
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi



Enstitü Müdürü

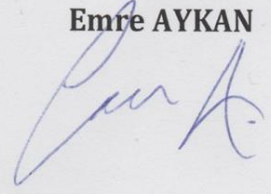
Prof. Dr. Yasin TUNCER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Emre AYKAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.2. Aşınma Türleri.....	2
1.2.1. Adhezif aşınma	2
1.2.2. Abrasif aşınma.....	3
1.2.3. Koroziif aşınma.....	4
1.2.4. Kazımalı (fretting)aşınma	4
1.2.5. Yorulma aşınması (pitting)	5
1.2.6. Erozyon aşınması	6
1.3. Korozyon Türleri.....	6
1.3.1. Kimyasal korozyon.....	6
1.3.2. Homojen dağılımlı elektrokimyasal korozyon.....	7
1.3.3. Galvanik elektrokimyasal korozyon	7
1.3.4. Çukurcuk elektrokimyasal korozyonu	8
1.3.5. Aralık elektrokimyasal korozyonu	9
1.3.6. Tanelerarası elektrokimyasal korozyon.....	9
1.3.7. Gerilmeli elektrokimyasal korozyon	10
1.4. Korozyonun Önlenmesi ve Ark PVD Yöntemi	11
1.4.1. Yüzey kaplamaları ile koruma	13
1.5. Katodik Ark PVD Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Özellikleri.....	18
1.6. Magnezyum ve Alüminyum Alaşımları ile Epoksi Kompozitinin Özellikleri.....	19
1.6.1. AZ91 Magnezyum alaışımının özellikleri	19
1.6.2. Alüminyum alaşımlarının özellikleri.....	23
1.6.3. Epoksi malzemesinin özellikleri.....	26
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1. Materyal.....	43
3.2. Yöntem	44
3.2.1. AZ91 magnezyum alaışımı deney numunelerinin ark PVD kaplanması... ..	44
3.3. Aşınma Deneyleri	48
3.4. Korozyon Deneyleri.....	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
4.1. Seramik Film Kaplamaların Tabaka Kalınlığı ve Mikrosertlikleri.....	56
4.2. Korozyon Deney Sonuçları.....	60
4.3. Aşınma Deney Sonuçları.....	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	84
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	92

EKLER.....	102
EK A. Korozyon Tafel Eğrileri.....	102
EK B. Aşınma Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri	108
ÖZGEÇMİŞ	113



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞININ FARKLI MALZEMELERLE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI VE ÜZERİNE YAPILAN ARK PVD KAPLAMALARIN KOROZYON DAYANIMINA ETKİSİ

Emre AYKAN

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, AZ 91 magnezyum (Mg) alaşımının aşınma dayanımı, cam takviyeli plakalı Epoksi kompoziti ve Etial 150 alüminyum (Al) alaşımının aşınma dayanımları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan literatür araştırmasından sonra magnezyum alaşımının korozyon dayanımının düşük olduğu görülmüş ve bu alaşımın üzerine TiN, AlTiN ve ZrN seramik film kaplamaların korozyon dayanımına etkisi deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen AZ91 Mg alaşımı yüzeyine, “Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme (Ark PVD)” yöntemiyle farklı bias voltajı, tutma süresi ve tutma sıcaklığı kaplama parametreleri uygulanarak TiN, AlTiN ve ZrN kaplama yapılmıştır. Yüzeye kaplanan ince film tabakasının yapısal karakterizasyonu ile korozyon özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, AZ91 Mg alaşımına uygulanan TiN, AlTiN ve ZrN seramik film kaplamaların aşınma dayanımına etkisinin olmadığı ve bu kaplamaların daha çok AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımını ciddi bir şekilde arttırdığı görülmüştür. Yapılan korozyon deneylerinde, TiN kaplı AZ91 Mg alaşımının en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu, sırasıyla AlTiN kaplama ve ZrN kaplamanın takip ettiği görülmüştür. Üçüncü aşamada; kaplamasız haldeki AZ91 Mg alaşımının, Etial 150 Al alaşımı ve FR-4 cam takviyeli Epoksi kompozitinin tribolojik özellikleri 60 HRC sertliğe sahip çelik bilya kullanılarak lineer karşıt hareketli aşınma deneyleri ile kuru şartlarda incelenmiştir. Sonuçta, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvvetleri ve aşınma izi boyutları ile birlikte yüzey morfolojileri elde edilmiş ve FR-4 cam takviyeli Epoksi kompozitinin diğer malzemelere göre daha iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, serbest atmosfer ortamında oksidasyona uğramış MgO’lu AZ91 Mg alaşımının tribolojik karakteristiğinin, FR-4 cam takviyeli Epoksi kompozite yakın olduğu ve Etial 150 Al alaşımında da en yüksek sürtünme katsayısı ve kütle kaybı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AZ91 Mg alaşımı, Al alaşımı, epoksi, aşınma, korozyon, PVD

2018, 113 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPARING THE WEAR BEHAVIOUR OF MAGNESIUM ALLOY TO DIFFERENT MATERIALS AND INVESTIGATION EFFECT OF ARC PVD COATING ONTO AZ91 MAGNESIUM ALLOY ON CORROSION STRENGTH

Emre AYKAN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Manufacturing Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Bekir YALÇIN

In this master science thesis study, the wear strength of AZ91 magnesium (Mg) alloy, glass-fiber Epoxy composite and Etial 150 aluminum (Al) alloy compared experimentally. After doing literature surveys, the weak corrosion resistance of AZ91 Mg alloys are shown so that the effect of TiN, AlTiN and ZrN hard ceramic film layers to corrosion resistance were experimentally obtained. In this context, this study consists three step. Firstly, TiN, AlTiN and ZrN coatings are coated by using, "Cathodic Arc Evaporation Physical Vapour Deposition (Arc PVD)" with different bias voltage and deposition time coating parameters onto AZ91 magnesium alloy which has fabricated with high pressure die casting methode. Characterization of thin film layer and corrosion features were investigated. Secondly, none wear resistance contribution was observed of TiN, AlTiN and ZrN hard ceramic film layers to AZ91 magnesium alloy but it was observed that TiN, AlTiN and ZrN hard ceramic film layers dramatically increased corrosion resistance of AZ91 magnesium. According to corrosion experiment results, TiN coated AZ91 magnesium alloy showed the highest corrosion resistance, AlTiN and ZrN coatings followed this situation, respectively. Thirdly, the tribological features of uncoated AZ91 magnesium alloy, Etial 150 aluminum and glass-fiber Epoxy composite were investigated under reciprocating wear test condition by using steel ball which has 60 HRC hardness. For wear experiments results, coefficient of friction, wear track depth, wear track width, wear track area and surface morphology were assessed. it has been observed that FR-4 glass-fiber epoxy composite showed better tribological performance when compared to the those of other materials. Besides, MgO layered AZ91 Mg alloy by oxidized under outside atmosphere in terms, has showed smiliar tribological characteristic with FR-4 glass-fiber Epoxy composite. Etial 150 aluminum alloy has showed highest coefficient of friction and wear loss.

Keywords: AZ91 Magnesium alloy, aluminum alloy, epoxy, wear, corrosion, PVD

2018, 113 pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, yakın ilgisini esirgemeyen, bilgilerinden son derece yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Bekir YALÇIN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam kapsamındaki deney çalışmalarımda bana yardımlarını esirgemeyen bilgilerinden faydalandığım, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nden Yr. Doç. Dr. Sinan TEMEL hocama ve Uzm. Dr. Fatma Özge GÖKMEN hanıma, Celal Bayar Üniversitesi DEFAM personeli Uzm. Burak ASLIŞEN beye, Karabük Üniversitesi'nden Arş. Gör. Mehmet Emre TURAN hocama, İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. İsmail DUMAN, Arş. Gör. Faiz MUHAFFEL ve Ar. Gör. Erkan KAÇAR hocalarıma, Bursa Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. Deniz UZUNSOY hocama, Ionbond TİNKAP çalışanlarına ve malzeme mühendisi Dr. Cenk TÜRKÜZ Bey' e teşekkürü bir borç bilirim.

4145-YL1-14 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, lisansüstü öğrenimim süresince, maddi ve manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen, annem Gülfiye AYKAN ve babam Kenan AYKAN 'a teşekkürlerimi sunarım.

Emre AYKAN
ISPARTA, 2018

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Adhezif Aşınma a) metal-metal etkileşimi sonucu, b)Metallerin izafi hareketlerine bağlı olarak pürüzlülük tepelerinin ortadan kaldırılması, c) Metallerdeki çıkıntıların teması ile gerçekleşen bağ oluşumu	3
Şekil 1.2. Abrasif Aşınma a) İki ve üç elemanlı aşınmanın oluşumu, b) Yüzey taşlama işleminde yüzeyden kaldırılan partiküllerin aşınma etkisi, c) Sert partiküllerin yüzeyde oluşturduğu kazıyıcı etki	3
Şekil 1.3. Korozif Aşınma	4
Şekil 1.4. Kazımalı (fretting) aşınma.....	5
Şekil 1.5. Yorulma (pitting) aşınması a) Temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçları, b)Yüzeyin aşınma sonrası görüntüsü	5
Şekil 1.6. Erozyon aşınması türleri.....	6
Şekil 1.7. Paslanmaz çelikte oluşan taneler arası korozyon.....	10
Şekil 1.8. Tane sınır kırılması/ Tane içi kırılma.....	11
Şekil 1.9. Fiziksel buhar biriktirme türleri	14
Şekil 1.10. Ark izi ve plazma oluşumunun şematik gösterilişi	16
Şekil 1.11. Katodik ark PVD sistemi.....	17
Şekil 1.12. AZ91 alaşımının yapısı.....	20
Şekil 3.1. Aşınma ve korozyon deney numunelerinin talaşlı imalat yoluyla elde edildiği ilk numuneler, a) AZ 91 Mg alaşımı, b) Etial 150 Al alaşımı, c) FR-4 cam takviyeli plakalı epoksi malzeme	44
Şekil 3.2. Korozyon deney numunesinin geometrisi	45
Şekil 3.3. Ark PVD kaplama ünitesi.....	45
Şekil 3.4. Yüzey film kaplaması kapılan AZ91 Mg alaşımı deney malzemeleri	47
Şekil 3.5. Sertlik deney cihazı	48
Şekil 3.6. UTS Tribometer T20 marka lineer aşınma test cihazı ve aşındırma prensibi.....	48
Şekil 3.7. Aşınma deney numuneleri	49
Şekil 3.8. Aşınan yüzeyleri incelemede kullanılan optik mikroskop	50
Şekil 3.9. Korozyon verilerinin alındığı potansiyostat/galvanostat cihazı ve deney düzeneği	52
Şekil 3.10. Elektrokimyasal korozyon ölçüm prensibi	52
Şekil 3.11. Elektrokimyasal korozyon düzeneği	53
Şekil 3.12. Deney cihazıyla yapılan örnek bir çalışmaya ait polarizasyon diyagramı.....	54
Şekil 3.13. Kaplamalı numunelerin görüntülendiği SEM cihazı.....	54
Şekil 4.1. Seramik film kaplamalı numunelerin mikrosertlikleri.....	57
Şekil 4.2. Seramik film kaplamaların tabaka kalınlıkları (nanometre).....	57
Şekil 4.3. TiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımının SEM ve EDX görüntüsü	58
Şekil 4.4. AlTiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımının SEM ve EDX görüntüsü.....	59
Şekil 4.5. ZrN kaplı AZ91 magnezyum alaşımının SEM ve EDX görüntüsü	59
Şekil 4.6. Kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımına ait SEM görüntüsü.....	60
Şekil 4.7. TiN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü.....	61
Şekil 4.8. AlTiN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü	61

Şekil 4.9. ZrN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü	62
Şekil 4.10. Kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	63
Şekil 4.11. T1 şartlarıyla TiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi.....	64
Şekil 4.12. AT3 şartlarıyla AlTiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi.....	65
Şekil 4.13. Z1 şartlarıyla ZrN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi.....	66
Şekil 4.14. Kaplamasız (K1) ve kaplamalı AZ91 magnezyum alaşımının korozyon dayanımı.....	67
Şekil 4.15. Yüzeylerde oluşan korozyon büyümelerine örnekler a) Kaplamasız (K1) b) TiN kaplamalı (T2), c) AlTiN kaplamalı (AT2) ve d) ZrN kaplamalı (Z3)	68
Şekil 4.16. 0,1 N aşındırma yükü ile tek strokta (10 mm) tüm film kaplamalarda oluşan aşınma hasarı	69
Şekil 4.17. Aşınma iz profilinin şematik gösterimi	70
Şekil 4.18. 0,1 m/s kayma hızı ile 500 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm ²).....	71
Şekil 4.19. MgO tabakalı AZ91 magnezyum alaşımının EDX grafiği ve SEM görüntüsü.....	72
Şekil 4.20. 0,4 m/s kayma hızı ile 1000 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm ²).....	73
Şekil 4.21. 0,75 m/s kayma hızı ile 2000 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm ²).....	74
Şekil 4.22. Dinamik sürtünme katsayısı diyagramı a) AZ91, b) MgO' lu AZ91.....	75
Şekil 4.23. Dinamik sürtünme katsayısı diyagramı a) FR-4 cam takviyeli epoksi, b) Etial 150 alüminyum.....	76
Şekil 4.24. Dinamik sürtünme kuvveti (Fs) diyagramı a) AZ91, b) MgO' lu AZ91	76
Şekil 4.25. Dinamik sürtünme kuvveti (Fs) diyagramı a) FR-4 cam takviyeli epoksi, b) Etial 150 alüminyum.....	77
Şekil 4.26. Ortalama sürtünme katsayısı eğilimleri a) 0,1 m/s hızla 500 m kayma mesafesinde, b) 0,4 m/s hızla 1000 m kayma mesafesinde, c) 0,75 m/s hızla 2000 m kayma mesafesinde	79
Şekil 4.27. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik yüzey görüntüsü.....	81
Şekil 4.28. Etial 150 alüminyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü. ...	81
Şekil 4.29. AZ91 magnezyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü.....	82
Şekil 4.30. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin aşınmış yüzey görüntüsü.....	83
Şekil A.1. T2 Deney No lu TiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	102

Şekil A.2. T3 Deney No lu TiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	103
Şekil A.3. AT1 Deney No lu AlTiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	104
Şekil A.4. AT2 Deney No lu AlTiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	105
Şekil A.5. Z2 Deney No lu ZrN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	106
Şekil A.6. Z3 Deney No lu ZrN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi	107
Şekil B.1. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 10 N yük – 0,75 m/s hız – 2000 m sürtünme mesafesi...	108
Şekil B.2. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi.....	108
Şekil B.3. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük – 0,1 m/s hız – 500 m sürtünme mesafesi.....	108
Şekil B.4. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre 30 N yük – 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesindeki optik aşınmış yüzey görüntüleri	109
Şekil B.5. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük – 0,1 m/s hız – 500 m sürtünme mesafesi.....	109
Şekil B.6. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 30 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 10 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi.....	109
Şekil B.7. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi.....	110
Şekil B.8. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük – 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,75 m/s hız – 2000 m sürtünme mesafesi....	110
Şekil B.9. AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük – 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 10 N yük – 0,75 m/s hız – 2000 m sürtünme mesafesi.....	110
Şekil B.10. AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi.....	111
Şekil B.11. AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük – 0,1 m/s hız – 500 m sürtünme mesafesi, c) 30N yük - 0,4 m/s hız – 1000 m.....	111
Şekil B.12. MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre 30N yük – 0,75 m/s hız – 2000 m sürtünme mesafesindeki yüzey görüntüleri	111

Şekil B.13. MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,1 m/s hız – 500 m sürtünme mesafesi.....	112
Şekil B.14. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük – 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi.....	112
Şekil B.15. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre aşınmış yüzey görüntüleri a) 30 N yük – 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük – 0,75 m/s hız – 2000 m sürtünme mesafesi	112



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Kaplamaların karakteristik özellikleri	18
Çizelge 1.2. %3-6 NaCl içeren çözeltide farklı metallerin korozyon potansiyelleri	22
Çizelge 1.3. Alüminyum ve bazı alaşımlarının farklı korozyon ortamlarındaki durumları.....	26
Çizelge 3.1. AZ91 magnezyum alaşımının kimyasal içeriği (%).....	43
Çizelge 3.2. Etial 150 alüminyum alaşımının kimyasal içeriği (%).....	43
Çizelge 3.3. FR-4 cam takviyeli plakalı epoksinin kimyasal içeriği (%)	43
Çizelge 3.4. Kaplama parametreleri	46
Çizelge 3.5. Kaplama proses parametreleri.....	47
Çizelge 3.6. Aşınma deney parametreleri	49
Çizelge 3.7. Aşınma deney planı.....	50
Çizelge 3.8. Korozyon deney parametreleri.....	51
Çizelge 4.1. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin kodlanması.....	56
Çizelge 4.2. Aşınma deneyleri sonrası ölçülen aşınma iz boyutları ve iz alanı	70
Çizelge 4.3. Aşınma deneyleri sonrası sürtünme kuvveti değerleri	78
Çizelge 4.4. Aşınma deneyleri sonrası sürtünme katsayısı değerleri	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Ag	Gümüş
Cu	Bakır
Fe	Demir
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Sn	Kalay
Ni	Nikel
Zn	Çinko
Pb	Kurşun
P	Fosfat
Ti	Titanyum
Cl	Klor
Na	Sodyum
Vn	Vanadyum
dk	Zaman
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
EDX	Energy dispersive x-ray spectroscopy
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
E	Potansiyel
İ	Akım yoğunluğu
HV	Vickers sertliği
HRC	Rockwell sertliği
HRM	Rockwell sertliği
Ecorr	Korozyon potansiyeli
Icorr	Akım yoğunluğu
ASTM	American society for testing and materials
Mpa	Megapascal
V	Volt
A	Amper
N	Newton yükü
Hz	Hertz frekansı
ml	Mililitre
PH	Konsantrasyon
Nm	Nanometre
Kgf	Kilogram-kuvvet
°C	Sıcaklık
ρ	Yoğunluk
μm	Mikron

1. GİRİŞ

Çağımız teknolojisiyle üretilip değişik alanlarda hizmet sağlayan makine sistem ve ekipmanları, ciddi manada iyi seviyede imal edilmiş olsalar dahi, hem kullanılan malzemeden hem de endüstriyel koşullarından kaynaklanan olumsuz faktörler nedeniyle zamanla iş yapabilme işlevlerini yitirmektedirler. Bu sonucu hazırlayan en önemli etkenlerden başlıcası korozyon ve aşınmadır.

1982 senesinde Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü, korozyon ve aşınmadan dolayı zararın gayri safi millihâsılanın %6'sını (178,5 milyar dolar) meydana getirdiğini beyan etmiştir (Üneri, 2004). Dünya çelik üretiminin "1,4 milyar" tonu geçtiği günümüzde, korozyon ve aşınma, demir-çelik esaslı ürünlerin israfında en başta gelen yerini muhafaza etmektedir. Dünya genelinde gerçekleşen istatistiklerde "toplam yıllık korozyon kaybı" 4,4 trilyon dolara ulaştığı belirtilmekte olup, makine elemanlarının ortalama %70'inin işe yaramaz duruma gelmesinin ana nedeni aşınma olarak ifade edilmektedir (Çakır, 2013). Bu bağlamda, aşınma ve korozyonun oluşum mekanizmalarını yavaşlatmak veya azaltabilmek için aşınma ve korozyon oluşum mekanizmalarının iyi anlaşılması gerekmektedir (Ludema, 1996).

Aşınma kavramı, DIN 50320 ve ASTM G40-05 standartlarına göre; kullanılan malzemelerin, diğer malzemelerle içinde bulunduğu teması akabinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük malzemelerin ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması olarak aktarılmaktadır (Bağcı 2010; Ludema, 1996). Bu olay nihayetinde malzemede oluşan yüzey farklılığı, farklı nedenlerle ya da parçanın zorlanma durumuyla yakından ilgilidir. Mekanik bir etkinin ortaya çıkması, sürtünmenin meydana gelmesi (izafi hareket), yavaş ve devamlı bir hareketin gerçekleşmesi, malzemenin dış yüzeyinde farklılıkların görülmesi ve istenilmediği halde oluşan aşınma durumunun meydana gelmesi için gerek ve yeter koşullar olarak kabul edilmektedir (Bağcı, 2010; Ludema, 1996).

Aşınma; malzeme, yüzeylerin biçimi, kullanılan yağlayıcılar, sisteme etki eden hız, sıcaklık, kayma yüzeyleri arasındaki temas basıncı, çalışma süresi, aşındırıcıların yüzeye temas etme durumu, sertlik vs. gibi birçok nedene göre değişmektedir. Kompleks bir olay olmasından kaynaklı laboratuvar şartlarından elde edilen sonuçlara dayanarak uygulamadaki aşınma seviyesini tahmin edecek net bir bağıntı henüz ortaya konmamıştır. Bu nedenle aşınma üzerine pek çok araştırma yapılmış ve belli sonuçlar elde edilmiş olmakla beraber bu konuda yapılan araştırmalar daha da derinlemesine devam etmektedir. Temas yüzeylerinde gözlemlenen fiziksel ve kimyasal farklılıkların fazlalığıyla pratikte bir aşınma hali değil birden fazla aşınma hali ile karşılaşmaktadır. Adezyon, abrazyon, yorulma, mekanik korozyon ve erozyon aşınması en yaygın karşı karşıya kalınan aşınma çeşitleridir (Bağcı, 2010; Üneri, 2004).

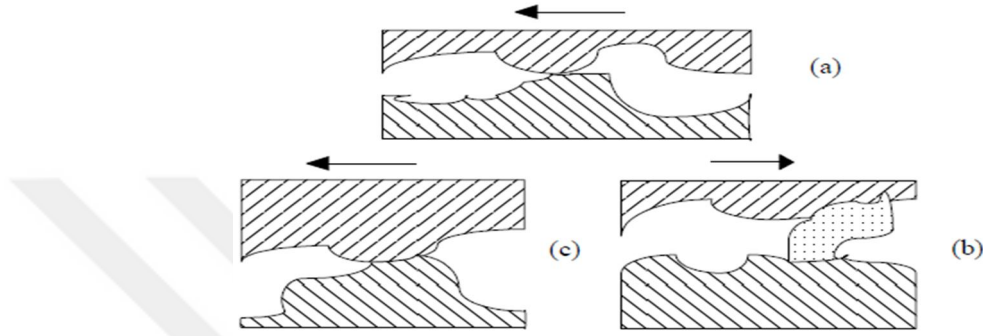
Korozyon kavramı incelendiğinde ise, farklı bakış açılarına göre pek çok tanım yapılabilmektedir. Basit manada, metal donatıların istenmeyen yükseltgenmesi, genel olarak malzemelerin, özel olarak metal ve alaşımların çevrenin çeşitli etkileriyle kimyasal ve elektrokimyasal değişme ya da fiziksel çözünme sonucu aşınma durumu “ korozyon” olarak anılmaktadır (Üneri, 2004). Korozyon olma durumu çok yavaş süregelen bir olay olmasından, zararlı sonuçlarının ortaya çıkması ciddi manada çok uzun zaman alabilmektedir. Bu bağlamdaki bazı yaklaşımlara göre, korozyonun devlete maliyeti gayri safi millihasilatın %3,5-5,0' ine erişmektedir. Bu değer Türkiye genelinde %4,5 civarında olduğu öngörülmektedir. Bunu yanı sıra ülkemizde korozyon kaynaklı iş kazaları oluşmakta fakat hala bu konu ile ilgili yeterli ve aydınlatıcı istatistiki ve bilimsel çalışmalar yapılmamaktadır (Bildik, 2014; Bilir, 2015; Üneri, 2004).

1.2. Aşınma Türleri

1.2.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, çok yaygın bir şekilde karşı karşıya kalınan aşınma şeklidir ve kaynak bağı teorisi ile belirtilmektedir. Bilhassa kayma sürtünmesi yapan ve metalografik yapıları birbirini anımsatan metallerin kaynaklaşmasından

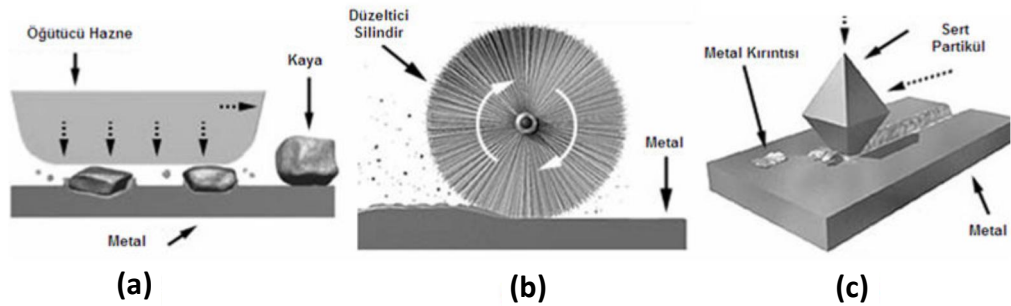
oluşmaktadır (Gürleyik, 1986). İyi düzeyde parlaklık kazandırılmış olan yüzeylerde dahi çok küçükte olsa bazı kısımları birbirine temas etmektedir. Çok ufak yüklemeler altında bile bu noktalarda meydana gelen gerilmeler malzemenin akma sınırını geçebilir. Yüzeyde oluşan oksit kısmı parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma oluşmaktadır. Kayma hareketi durumunda bu noktaların kesilmesi sonucunda yenme ve aşınma olayı gerçekleşmektedir (Bağcı, 2010; Gürleyik, 1986)(Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Adhezif aşınma; a) Metal-metal etkileşimi, b) Metallerin izafi hareketine bağlı olarak pürüzlülük tepelerinin ortada kaldırılması, c) Metallerdeki çıkıntıların teması ile gerçekleşen bağ oluşumu (Gürleyik, 1978)

1.2.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, yırtılma ya da çizilme aşınması olarak da isimlendirilmektedir. Bu aşınma durumu genel manada, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınçla birlikte etkileşip sert partiküllerin malzeme alanından parça koparması biçiminde gerçekleşmektedir (Akkurt, 1990).

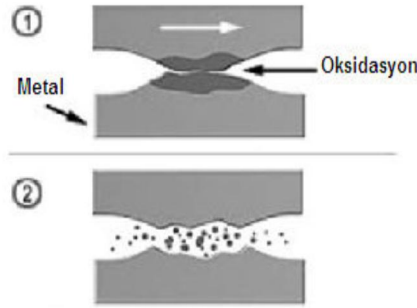


Şekil 1.2. Abrazif aşınma; a) İki ve üç elemanlı aşınmanın oluşumu, b) Yüzey taşlama işleminde yüzeyden kaldırılan partiküllerin aşınması, c) Sert partiküllerin yüzeyde oluşturduğu kazıma (Akkurt, 1990)

Bu sert partiküller, yüzeyler içerisinde kazıyıcı bir etki meydana getirerek eğeleme ve taşlama benzeri bir malzeme eksikliğinin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 1.2).

1.2.3. Korozi aşınma

Malzemelerin yüzeyleri, hava ile reaksiyon gerçekleştirerek aşınmanın fazla şiddetli bulunmasını engelleyen oksit ve başka tabakaları oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bilhassa kimyasal maddelerin bulunmuş olduğu ortamda çalışma gösteren makine elemanlarının yüzeyleri bahsi geçen bu maddelerle reaksiyona girerek ince ve sert tabakalar meydana getirirler. Değişken yüklere maruz kalan bu sert tabakalar ilk olarak kırılır ve kırılan parçacıklar yerinden koparak aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar sert bir tabaka oluşmakta, yük altında bu tabaka tekrar kırılmakta ve böylelikle tekrarlı olarak süregelen olay oksidasyon aşınması olarak belirtilmektedir (Şekil 1.3). Ayrıca, hava rutubetinin de korozi aşınma ile ilgili etkisi olduğu öngörülmektedir (Taşçı, 1993).

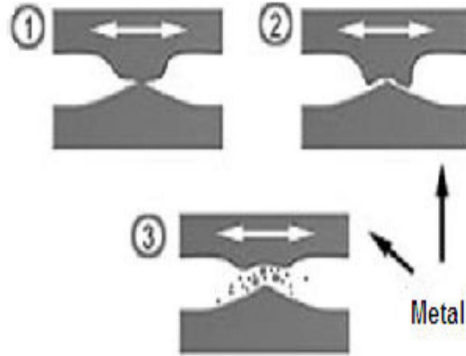


Şekil 1.3. Korozi aşınma (Taşçı, 1993)

1.2.4. Kazımalı (Fretting) aşınma

Bu aşınma şekli, mikro derecedeki kaynaşmanın olduğu adheziyeli aşınmaya benzerlik göstermekte fakat bu aşınmadan da birbirine göre hareket sağlamayan yüzeyler üzerinden meydana gelmesi yönünden farklılık göstermektedir. Titreşimli ortamda çalışma kaydeden somun, perçin benzeri

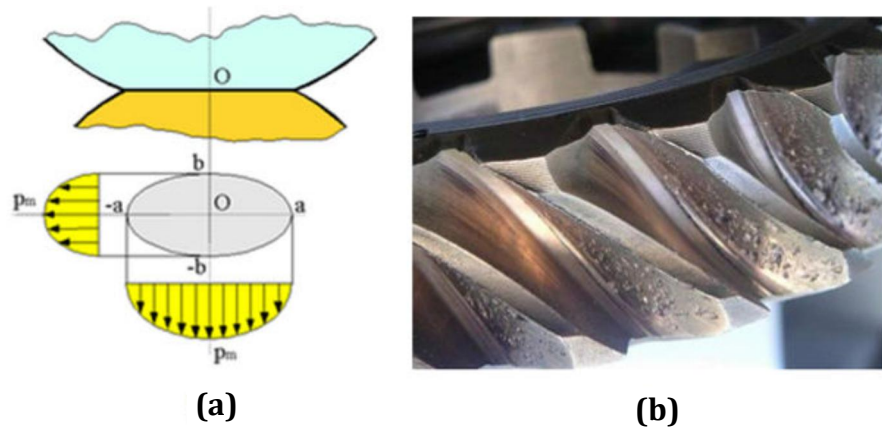
bağlantı elemanları ve otomobil şaftlarının birleşme oluşturduğu kısımlarda (Şekil 1.4) ve yataklarında fazlasıyla rastlanılan bir hasar şeklidir (Bağcı, 2010).



Şekil 1.4. Kazımalı (fretting) aşınma (Bağcı, 2010)

1.2.5. Yorulma aşınması (Pitting)

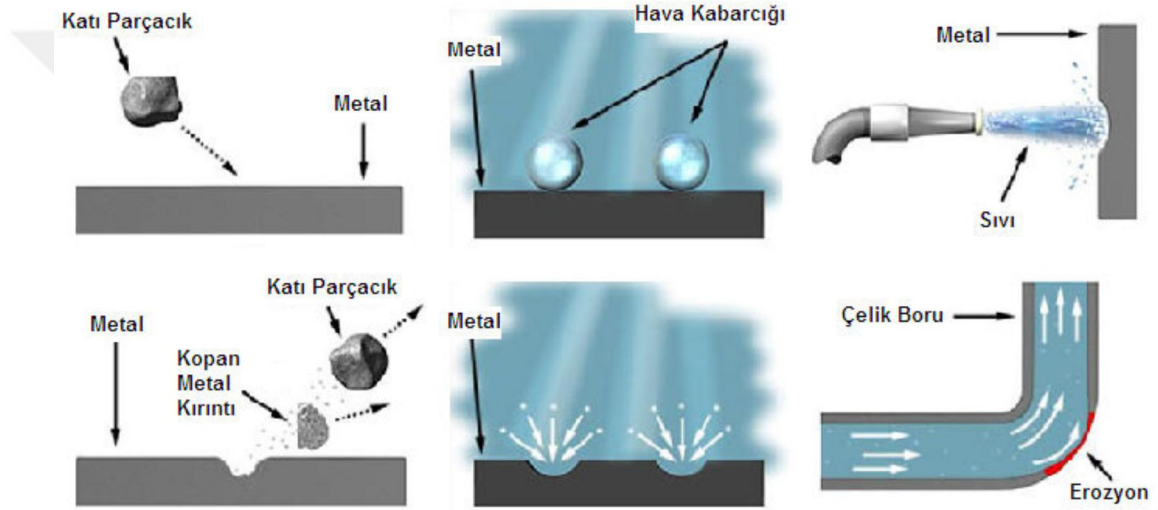
Bu tip aşınma temas alanlarında çok ufak çukurcukların meydana gelmesi biçiminde kendini göstermektedir (Ay, 2008). Bilhassa rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmalarına benzer makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi gerçekleştiren parçaların yüzeylerinde ortaya çıkmakta ve temel olarak bir malzeme yorulması olayı olarak görülmektedir. Bu elemanlarda temas alanları çok ufak olmasından kaynaklı yüzeylerde Şekil 1.5' de görüleceği üzere Hertz basınçları oluşmaktadır (Ay, 2008; Bağcı, 2010; Temiz, 2003).



Şekil 1.5. Yorulma (pitting) aşınması; a) Temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçları, b) Yüzeyin aşınma sonrası görüntüsü (Bağcı, 2010)

1.2.6. Erozyon aşınması

ASTM G76-95 standardına göre; belirli seviyede hıza sahip olan katı parçacıkların, bir yüzeye çarpması halinde yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybının oluşması sonucu erozyon aşınması şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 1.6). Bu duruma ilave olarak da, bir sıvı içerisinde hareketini sağlayan sert partiküllerin, malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kaymasına ve yuvarlanmasına bağlı olarak fazla miktarda parça koparması sonucunda da erozyon aşınması oluşmaktadır (Bağcı, 2010; Yıldızlı vd., 2016).



Şekil 1.6. Erozyon aşınması türleri (Yıldızlı vd., 2016)

1.3. Korozyon Türleri

1.3.1. Kimyasal korozyon

Metal malzemenin doğrudan korozyon yapıcı elementlerle elektron alış verişinde bulunup iyonlaşması ile meydana gelen korozyon türüne “kimyasal korozyon” denir. Kimyasal korozyon genellikle yüksek sıcaklıkla meydana gelmektedir. Bundan dolayı bu korozyon türü, yüksek fırınlarda yapılan tavlama veya haddehanelerde yapılan sıcak biçimlendirme işlemleri sırasında meydana gelmektedir. Kimyasal korozyonda genellikle korozyon etkili madde oksijendir.

Oksijen ile bileşik yapan metal malzemelerin üzerinde oksit tabakası denilen koyu renkli kabuk (tufal) oluşmaktadır (Bağcı, 2010; Çelikkalp, 2011). Örneğin; magnezyumda, $2 \text{ Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MgO}$ (Magnezyum oksit) reaksiyonu sonucu yüzeyde magnezyum oksit meydana gelmektedir. Bu durumun, bazı uygulamalarda avantaj teşkil ettiği söylenebilir (Bağcı, 2010; Çelikkalp, 2011).

1.3.2. Homojen dağılımlı elektrokimyasal korozyon

En yaygın şekilde gözlemlenen bir korozyon şekli olup, metal üzerinde pek çok miktarda olan ve birbirine yakın durumda konumlanan mikroanot ve mikrokatot bölgesi içerisindeki elektrokimyasal etki ile oluşmaktadır. Katot ve anot kısımlarının devamlı yer değiştirilmeleri sebebiyle metal kısmı homojen olarak korozyona uğramakta ve korozyon hızının her alanda sabit olarak bulunduğu kabul edilir. Bu tür korozyon çoğunlukla atmosfere ya da homojen alanlarda bulunan alaşımsız çelikler, az alaşımlı çelikler, çinko, galvanizli çelikler ve bazı ölçüde de bakır ve bakır alaşımlarında gözlemlenmektedir. Homojen bir dağılımı olan korozyon diğer korozyon çeşitlerinden daha fazla metal hasara neden olmaktadır. Fakat, bu korozyonun hızı basit deneylerle netleştirilemediğinden korozyon alanına bırakılan komponentlerin ömürleri ile ilgili tahminlerde bulunabilir. Bu durumdan ötürü homojen dağılımlı korozyondan çok fazla korkulmamaktadır. Bu korozyon yüzey kaplama, katodik koruma veya korozyon önleyici madde kullanmak şartıyla kontrolü sağlanabilir (İnce vd., 2004; Korozyon Kimyası, 2016; Metallerin Korozyonu, 2016).

1.3.3. Galvanik elektrokimyasal korozyon

Galvanik tip korozyon, korozyon alanında birbiri ile temas halinde olan farklı çeşitten metal ya da alaşımların temas alanlarında meydana gelir. Galvanik korozyonda aktif biçimde bulunan metalde korozyon hızlı şekilde olurken, daha soy olan metallerin korozyonu yavaşlamakta ya da tamamen önlenmektedir. Mesela; deniz suyu içerisinde pirinç parçalarla temas halinde olan çelik

vidalarda ya da bir su ısıtıcısındaki bakır ve çelik boruların bağlantı kısımlarında bu tür korozyon oluşmaktadır (ASM Handbook, 1992; Taşçı, 2000).

1.3.4. Çukurcuk elektrokimyasal korozyonu (Pitting)

Çukurcuk korozyonu, metal malzeme üst kısmının çok dar kısımlarında çukurcuk (pit) meydana gelmesine zemin hazırlayan bir korozyon şeklidir. Korozyonla meydana gelen çukurcukların büyüklüğü ve sıklığı malzeme ve ortama göre farklılık göstermektedir. Çukurcuk korozyonu akabinde oluşan toplam malzeme kaybı, homojen dağılımlı korozyon sonucunda oluşan malzeme kaybindan çok daha azdır. Fakat, ilgili korozyonuna maruz kalan komponentler çok kısa zamanda delinerek kullanılmaz biçime gelebilmektedirler. Bu duruma ilaveten, çukurcuk diplerinde oluşan gerilme yığılmaları, malzemenin çatlamasına zemin hazırlayabilmektedir. Metal malzemelerde bozunumaya sebebiyet vermesi halinde, yaygın olması ve kontrolünün önemli ölçüde zor olması benzeri nedenlerden dolayı çukurcuk korozyonu en tehlikeli korozyon türlerinden bir tanesi olarak kabul edilmektedir (Eker, 2009; Muratoğlu, 2008; Ok, 2012).

Çukurcuk korozyonu genellikle klor ve brom iyonları içeren nötr alanlarda görülmektedir. Sodyum klorür ve oksijen bakımından iyi bir derecede olan deniz suyu çukurcuk korozyonu için en uygun ortamı oluşturmaktadır. Mesela; deniz suyuna atılan paslanmaz çelikler kısa bir süre içinde çukurcuk korozyonuna maruz kalarak bozunuma uğramaktadırlar. Ortamın durgun şekilde olması çukurcuk korozyonunu ivedileştirirken, hareketli olması bu korozyonu aksatmaktadır. Şöyle ki; deniz suyunun pompalanmasında kullanılan paslanmaz çelikten oluşturulmuş komponentler devamlı çalışma koşullarında korozyona tam direnç oluştururken, çalışma durdurulduktan sonra çok çabuk korozyona uğramaktadırlar (Denizdekiler, 2017; Eker, 2009).

1.3.5. Aralık elektrokimyasal korozyonu

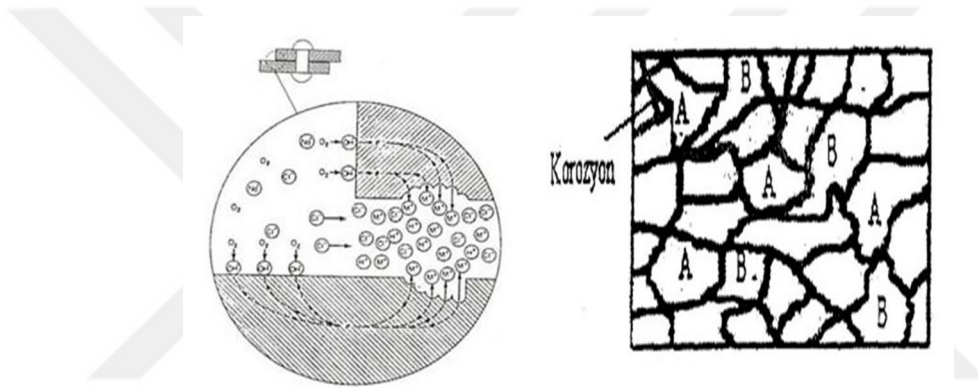
Malzeme ya da malzemelerden imal edilen farklı mekanizmalarda mevcut olan dar aralık veya alanlarda oluşan korozyon çeşididir. Aralığı meydana getiren eleman ya da komponentlerin her ikisinin de metal olması gerekli görülmemektedir. Komponentlerden yalnızca bir tanesi lastik ya da cam şeklinde olabilir. Bu korozyon; komponentlerde mevcut olan çatlaklarda kir ve tufal tabakalarının alt kısmında ya da makine parçalarının montajında bertaraf edilmeyen dar bölge ve aralıkların içinde başlamaktadır. Göz önünde mevcut olmayan alanlarda meydana geldiği için çok kolay bir şekilde fark edilme durumu mümkün olmayabilir. Bu korozyon, aralık içerisindeki elektrolitte oksijenin az olması sebebiyle oluşmaktadır. Bu korozyonda elektrolit kılcalık etkisi ile aralığın içine girer. Korozyon, aralığın içinde ve dışında oksijen reaksiyonu ile başlar ve aralığın içindeki oksijeni tamamen tüketir. Aralığın dışı hava ile temas halinde olduğundan bu alanda mevcut olan elektrolit oksijen açısından çok daha zengindir. Fakat, elektrolit aralığın hava almasını yani oksijenin aralığa girmesinin önünde engel oluşturur. Bu durumda elektrolit iç yapısındaki oksijen oranında farklılık oluşmaktadır. Aralık haricinde bulunan bölge oksijeni bol olmasından kaynaklı katot, aralık içinde kalan bölge ise oksijeni az olduğundan anot görevi yapmaktadır. Bu durumdan ötürü de söz konusu aralık korozyona uğramaktadır (Bağcı, 2010; Eker, 2009; Ok, 2012; Üçüncü, 2006).

1.3.6. Tanelerarası elektrokimyasal korozyon

Korozyon olayının malzemenin tane sınırlarına yakın alanlarında yoğunluk göstermesi akabinde ortaya çıkan bir bozunma şeklidir. Bu korozyon, metal veya alaşımların tane sınırlarıyla başka alanları arasında bir gerilim farkının oluşması halinde görülmektedir. Bu tür korozyon, bir katı çözelti içerisinde bir fazın çökmesi akabinde oluşur. Tane sınırlarındaki çökmenin çok hızlı olması sebebiyle tane sınırlarına yakın alanlar çökeltiyi meydana getiren element açısından fakirleşir. Bu durum tane sınırları ile diğer alanlar arasında

bir gerilim farkı meydana getirir. Bunun sonucunda tane sınırları tercihli olarak korozyona uğrar (Aydoğdu ve Aydınol, 2005; Evci, 2016; Sarıköse, 2015).

Bu tür korozyon daha çok ostenitik paslanmaz çelikler ve alüminyum-bakır alaşımlarında gözlemlenmektedir. Bu korozyon sonucunda taneler bütünlük ve şekillerini korurken, taneler arasındaki bağ bozunuma uğrar. Mesela; taneler arası korozyona uğrayan ostenitik paslanmaz çeliği elle ezerek toz haline getirmek mümkündür. Kaynar durumdaki sülfat-sülfürik çözeltisinde tutulan bir paslanmaz çelikte oluşan taneler arası korozyon Şekil 1.7’de görülmektedir (Doruk, 1982; Eker, 2009).

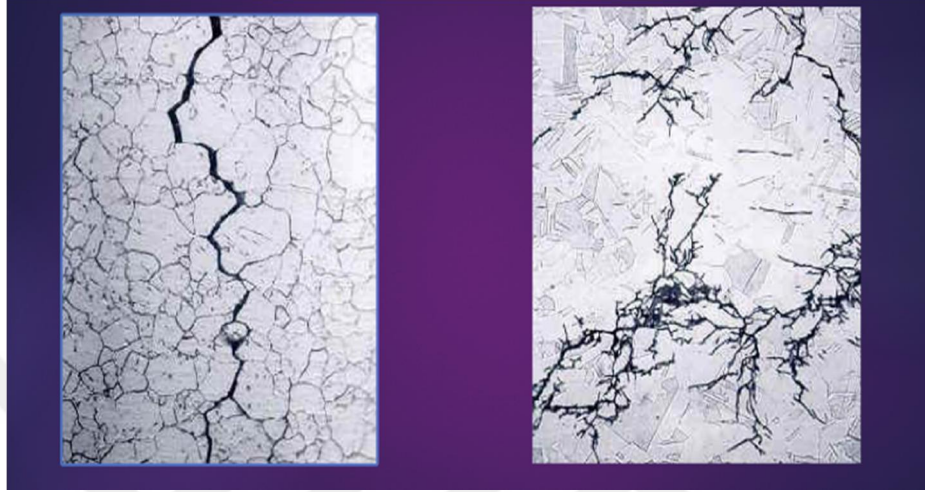


Şekil 1.7. Paslanmaz çelikte oluşan taneler arası korozyon (Doruk, 1982)

1.3.7. Gerilmeli elektrokimyasal korozyon

Gerilmeli korozyon, gerilme ve korozyonun meydana getirmiş olduğu etkisiyle metal parçalarda oluşan bozunma, olarak aktarılabilir. Bu korozyon tane sınırlarında çatlak meydana getirerek, parçaların dayanımını minimuma indirmektedir. Bozunma parça üst bölgesinde mevcut olan çatlaklarda ya da gerilme yığılmasına zemin hazırlayan diğer geometrik düzgünsüzlüklerde başlamaktadır. Gerilmeli korozyonun en net özelliği, kimyasal ve mekanik etkilerin birbirini destekler nitelikte olmasıdır. Gerilmeli korozyon, korozif ortamda bulunan korozyona duyarlı malzemelerde çekme gerilmesi etkisiyle çatlak oluşması ve ilerlemesi biçiminde oluşan bir olaydır. Gerilmeli korozyon kırılması Şekil 1.8’de görülmektedir. Oluşan çatlaklar hem gerilme, hem de

korozyonun etkisiyle belirli hızlarda malzemenin içine doğru ilerlemektedirler. Parçanın kesiti uygulanan yükü taşıyamayacak duruma geldiğinde ani kopma gözlemlenmektedir (Aydoğdu ve Aydınol, 2005; Bilir, 2015; Eker, 2009; Gündoğdu, 2017).



Şekil 1.8. Tane sınır kırılması / Tane içi kırılma (Tokluk, 2017)

1.4. Korozyonun Önlenmesi ve Ark PVD Yöntemi

Çalışan sistemlerde korozyona neden olan sebepler çok boyutludur. Korozyonu etkileyen bu sebeplerin belirlenmesi ve bunun için alınan önlemler, teknik ve ekonomik anlamda korozyon kayıplarının engellenmesine olanak vermektedir. Çalışan sistemlerde meydana gelen korozyonun engellenebilmesi için başlıca önlemler bulunmaktadır. Bunlar; sistemde kullanılan malzeme seçiminin korozyona dayanıklı olup olmadığına dikkat edilmesi, korozyona dirençli alaşım elementi ilavesinin yapılması, malzemeye ısıtılarak işlem uygulanarak korozyon direncinin artırılması, malzeme yüzeyine katodik ve anodik koruma yapılması veya yüzey kaplama gibi işlemlerin yapılmasıdır (ASM Handbook, 1992).

Korozyona dirençli malzemelerin seçilmesi ve kullanılacak olan malzemenin saf olması: Uygun malzemenin seçimi korozyona olan yönelimi korumada önem arz etmektedir. Özellikle korozyona uğrama hızının çok az veya çok fazla olan durumlarda bu durum ön planda olmaktadır. Korozyona uğrama hızının ani

değişimlerinde ana odak noktası bulunulan ortamın şartlarıdır. Korozyon oluşumunun yüksek olduğu ortamlarda yeterli malzeme kullanımının gerçekleştirilmesiyle ya da malzeme içerisindeki bileşimleri kontrol altında tutarak korozyona direnci sağlanabilir. Bu sebepten dolayı, bir çok uygulama içerisinde saf metal kullanılır ve malzemenin yüzeylerindeki homojensizlik indirgenerek korozyon direnci arttırılabilir. Böylece potansiyel fark oluşmayacağından dolayı korozyon önemli derecede engellenebilir (ASM Handbook, 1992; Şafak, 2008).

Alaşımların ilave edilmesi ve ısıtma işlemi uygulama: Alaşım elementi ilave ederek metallerde korozyon direnci artırılmaktadır. Malzemelere ilave edilen bazı alaşımların elementleri malzeme yüzeyindeki gözenekli yapıyı oksit filmleri meydana getirerek gözeneksiz yapıya çevirir veya gözeneksiz yapı meydana getirmesine yardım ederek oluşan alaşımların korozyon direncini arttırırlar. Örnek olarak; bakır esaslı alaşımlara ilave edilen mangan ve alüminyum, paslanmaz çeliğe ilave edilen molibden ve ayrıca alüminyum alaşımlarına ilave edilen magnezyumun bu malzemelerin korozyon direncini arttığı bilinmektedir. Ayrıca, alaşımların ilaveli malzemelerde korozyon hızına etki eden en önemli nedenlerden birisi, alaşımların elementleri malzemesinin homojen yapıda olmamasıdır. Özellikle döküm yolu ile imal edilen malzemelerin genelinde segregasyon olayı oluşmaktadır. Bu malzemelere homojenizasyon, çözündürme veya stabilizasyon gibi ısıtma işlemlerinin uygulanmasıyla iç yapılarının homojen olması ve korozyon dirençlerinin artırılması sağlanır (Kmycorrosionlab, 2013; Kuşdemir, 2008; Ok, 2012; Tamirci, 2017).

Katodik koruma: Korozyon direncini arttırmak için alınacak önlemlerin arasında en etkili olanı katodik korumadır (Stelektrik, 2017). Katodik korumanın temel ilkeleri elektro-kimyasal korozyon teorisine dayanmaktadır. Katodik koruma korozyona maruz kalan metalik malzemelerin katot olarak polarizasyonunu gerektirmektedir. Bu koruması sağlanacak metalik malzemenin daha aktif olan bir metalik malzemeyle eşleyerek yapılabileceği gibi dıştan akım uygulanmasıyla da gerçekleştirilebilmektedir (Abacı, 2013). Galvanik anotlar koruma sırasında belirli hızlar ile çözünmesiyle ağırlıklarını

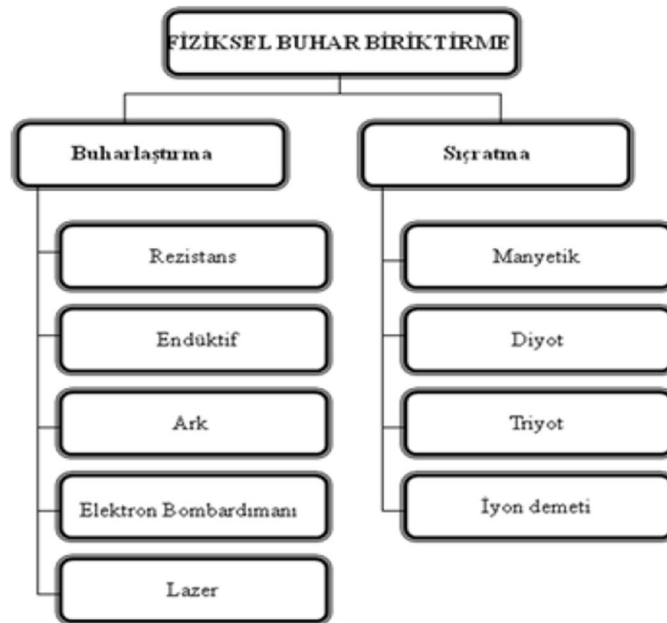
kaybetmektedirler. Bunları uygun zaman periyotları ile yenileyerek koruma işlevine devam ettirmesi sağlanır. İkinci yöntemde ise korunan metalik malzeme ve anot çiftinin, akım üretecek durumda olması zorunlu değildir. Bunun sebebi ise koruma için gereken akımın uygun bir dış kaynaktan çekilmesidir. Yavaş çözünürlüğün yanı sıra ekonomiklik yönden daha iyi olan malzemeler anot malzemesi olarak kullanılmaktadır. Galvanik anotlu, katodik koruma sistemlerinde kullanılan anot malzemeleri genelde çinko, alüminyum ve magnezyum malzemeleridir. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde Fe-Si, Pb-Sb-Ag ve Ti bazlı anotlar tercih edilmektedir (Abacı, 2013; Şendenel, 2004; Yilkomer, 2015).

Katodik koruma sırasında, korozyona maruz kalan metalik malzemenin potansiyelini değiştirerek onu katot biçiminde davranmaya zorladığı gözlenmektedir. Çözünemeyen bir soy anot yardımı ile korunacak bir yapı devrenin negatif kutbunu meydana getirecek biçimde doğru akım devresine bağlanır ve bu koruma tipi, “dış akım kaynaklı katodik koruma” olarak adlandırılmaktadır. Katodik korumanın ana amacı, belirli bir alanda metalik malzeme için sabit bir potansiyel eğrisinin altında metalin elektrolit ortamına göre negatif biçimde kutuplaştırılarak korozyona karşı koruma sağlamaktadır. Bunların neticesinde metal yapısının her bir noktasında birim alan üzerine sürekli olarak akımın geldiği gözlenmektedir. Oluşan akım yoğunluğu, kaplamanın dayanımına ve o alanın potansiyel farkına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, korumanın sağlanabilmesi için seçimi yapılan kriter, metalin toprak/deniz ile bağının kuracağı en düşük potansiyelidir. Yapılan ölçümler genellikle Bakır/Bakır Sülfat elektrodunun referans olarak seçilmesi ile yapılmaktadır. Elektrolit ortamıyla temas durumundaki metalin her halinde en düşük potansiyele erişilmiş olması gereklidir (Stelektrik, 2017; Şafak, 2008; Yilkomer, 2015).

1.4.1. Yüzey kaplamaları ile koruma

Metalik Kaplamalar: Elektrokimyasal tutum bakımından metal kaplamalar, soy kaplamalar ve aktif kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Gürlek, 2009).

Kaplanacak olan metalin türüne göre soy ve aktif kaplamaların tercihinde galvanik diziden yararlanılmaktadır. Korozyonun elektrokimyasal oluşumu, her iki kaplama türünün hangi şartlarda koruyucu olduğunu kesinlikle belirlemektedir. Bu duruma göre soy kaplamaların koruma özelliği, metalle saldırgan ortam arasında iyi bir engel meydana getirmesine bağlı olmaktadır. Kaplama boşluk veya çatlak türünden hatalar içeriyorsa, korozyonun o noktalarda yerleşmesi ve metalin kaplama altında korozyona uğramasının engellenmesi sağlanamaz (Gürlek, 2009; Tuna, 2013). Bu sakıncalı duruma karşı aktif kaplamaların koruma özelliği içerdikleri hatalardan etkilenmemektedir. Çünkü kaplamanın sağladığı koruma, temel olarak katodik koruma yöntemidir. Bu durumda katodik koruma metodunda, harcanan galvanik anotların tutumuna paralel olarak, aktif kaplamalar korozyona uğramaktadır. Kaplamanın çözünmediği sürece, oluşan korozyonun metal malzemenin üzerinde yerleşmesi engellenmiş olur. Metalik kaplama yöntemleri; elektrolitik kaplama yöntemi, sıcak daldırma yöntemi, sıcak püskürtme yöntemi, giydirme yöntemi, Ark PVD ve CVD yöntemi gibi çeşitli kaplama yöntemleri ile yapılabilmektedir. Son zamanlarda özellikle Ark PVD ve CVD kaplama yönteminin kullanımı yaygınlaşmıştır (Aslan, 2016; Gürlek, 2009; Keleşoğlu, 2011; Tuna 2013; Yaylacı, 2010).



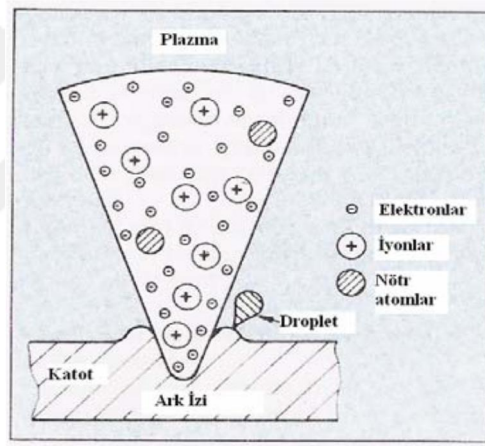
Şekil 1.9. Fiziksel buhar biriktirme türleri (Sönmezoğlu, 2012)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi: Yüzey kaplama işlemlerinin en etkililerinden biri, katı haldeki bir kaynağın vakum esnası altında atomizasyonu veya buharlaştırılmasıyla ve bu maddenin kaplamayı oluşturması için altlık üzerine biriktirilmesine dayanan fiziksel olarak buhar biriktirme işlemine denir (Tuna, 2013; Yaylacı, 2010). Özellikle magnezyum alaşımlarına geçiş metalleri ile (TiN, TiAlN, CrN, ZrN, NbN vb.) gerçekleştirilen ince film kaplamalarının; yüksek sertlik, kimyasal kararlılığı, iyi aşınma direnci, korozyon direnci ve renkleri sebebiyle neredeyse kusursuz özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Genellikle, biriktirmenin atomik veya iyonsal olma biçimine bağlı olarak PVD yöntemi, Şekil 1.9' da görüldüğü üzere buharlaştırma ve sıçratma olarak iki grupta sınıflandırılabilir (Holmberg ve Matthews, 1994; Tuna, 2013; Yaylacı, 2010).

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile metalik kaplama işlemi, katı veya sıvı bir kaynaktan atomlar veya moleküller biçiminde buharlaşan kaplama malzemesinin, vakum veya düşük basınca sahip gaz bölgesinde, buhar halinde kaplanacak olan yüzeye taşınması ve altlık yüzey üzerinde yoğunlaştığı atomistik bir buharlaştırma sürecidir (Bunshah, 1994; Tuna, 2013).

Kaplama evresi temelde üç işlemde gerçekleşmektedir; bu işlemlerin ilkinde kaplama malzemesinin evaporasyon ve moleküler seviyede buharlaştırılmasıdır. İkincisi ise kaplama malzemesinin kaynağından, kaplanması istenen yüzeye taşınmasıdır. Sonuncusu ise kaplanması istenen yüzeyin üzerindeki filmin büyümesidir (Bunshah, 1994). Fiziksel buhar biriktirme işlemleri yüksek vakum ile gerçekleşmektedir. Yüksek vakumlu ortamın oluşturulmasının nedeni, buhar şeklindeki kaplama malzemesinin, buharlaşması ve peşi sıra kaplanacak yüzeye ulaşmasına dek ortamda bulunan diğer moleküller ile çarpışma olasılığının minimuma indirgenmesini sağlamaktır. Kısacası, moleküllerin ortalama serbest yollarının uzatılması amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra, proseste bir vakum sisteminin varlığı oluşacak muhtemel kirlilik kaynaklarının kontrolünün de yapılmasını sağlamaktadır (Bunshah, 1994; Mattox, 1998; Tuna, 2013).

Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi (Ark PVD): Katodik ark ile vakum etkisi altındaki buhar fazının oluşturulduğu Ark PVD sistemi, diğer PVD yöntemleri arasında epey yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile, TiN, AlTiN, CrN gibi sert denilecek malzemelerin seramik film kaplamalarının üretilmesine olanak sağlamaktadır. Ark PVD sisteminde vakuma alma işlemi sonrasında işlem akışı; alt malzemenin ısıtılması, alt malzeme yüzeyindeki iyonların kullanılmasıyla temizlenmesi, film biriktirme ve soğutma olarak sıralanması yapılabilir. Katodik ark tekniği ile buharlaştırılması yapılacak olan malzeme vakum odasına katot, kaplanması yapılacak ana malzeme ise anot olarak yerleştirilir. İşlemde yüksek akım (100-200 A) ve düşük gerilim (10-30 V) ile katot üzerinde ark oluşturulması gerçekleştirilir (Doğan, 2013; Gündüz ve Oktar, 2005) (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Ark izi ve plazma oluşumunun şematik gösterilişi (Bozkurt, 2006)

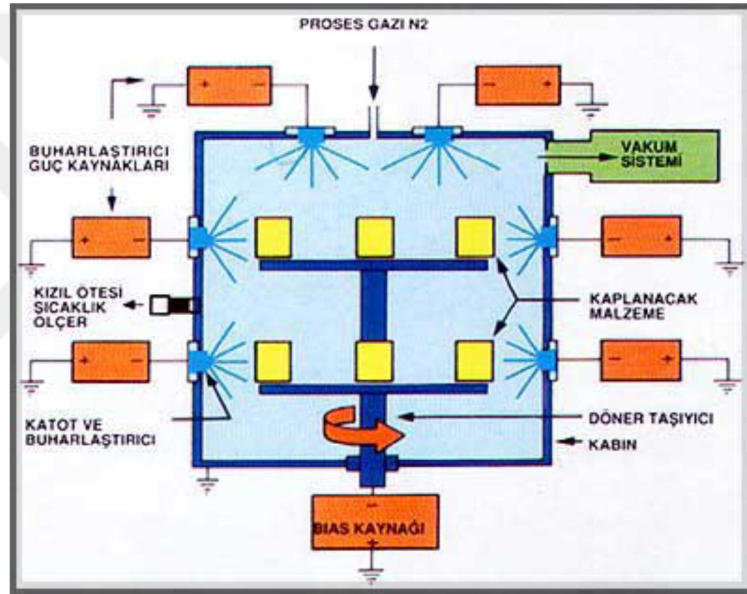
Katotlar, yüksek sıcaklıklar altında (yaklaşık 2500 °C) uygulanan ark etkisi ile buharlaştırılır ve buhar fazındaki atomların enerjileri kaplanacak olan malzemeye ulaştırılırken yükseltilir ve iyonizasyonu gerçekleştirilir. Kaplaması yapılacak olan malzemeye uygulanan negatif potansiyel (BIAS) ile ortamda bulunan iyonlar malzemeye yönlendirilir ve hedef altlık malzeme yüzeyi üzerinde biriktirilmesi sağlanır (Bozkurt, 2006; Tai vd., 1990; Tuna, 2013).

Kaplama öncesinde uygulanan yüksek (600-1000 V) bias voltajıyla taban malzemesinin yüzeyi temizlenir ve taban/kaplama arasında ara yüzey oluşturularak daha iyi yapışması sağlanır. Katodik ark yönteminde, vakum

sisteminin ortamına göre işlem gazı olarak azot gazının (N_2) verilmesi sağlanır (Tuna, 2013).

Katodik ark yönteminin karakteristik özellikleri aşağıda sıralanmıştır (Lindfords vd., 1986);

- Plazma bir ark spotuyla meydana getirilir,
- Katot yüzeyi üzerinde buharlaşan malzemenin %30 ile %80'i iyonize olur,
- Plazmada farklı yüklerde iyonlar bulunmaktadır ($Ti+Ti+2$, $Ti+3$),
- İyonlar 40-100 eV arası kinetik enerjiye sahiptir,
- Ark kaplamalar çok sayıda damlacıklar (droplet) içermektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Katodik ark PVD sistemi (Bozkurt, 2006)

Katodik ark yönteminin diğer PVD yöntemlerine göre avantajları ise aşağıdaki gibidir (Vyskocil ve Musil, 1990);

- Metallerin, alaşımların ve bileşiklerin yüksek kaplama hızlarında biriktirilmesi,
- Ana malzemenin yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmak zorunda olmayışı,
- İstenilen bileşimde alaşımların biriktirilmesi,
- Bileşik filmlerin kolay bir şekilde üretilmesi ($TiAlN$, $AlTiN$ gibi),
- Geniş kaplama parametrelerinde iyi kalitede filmlerin elde edilmesi,

- Karmaşık geometriye sahip malzemelerin üniform bir biçimde kaplanmasının mümkün olmasıdır.

1.5. Katodik Ark PVD Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Özellikleri

ZrN kaplamalar; damlacık ihtiva etmemektedir. Zirkonyumun, titanyuma nazaran daha yüksek ergime sıcaklığına ve daha düşük buhar basıncına sahip olması bunun sebebidir. Genellikle yüksek ergime noktasına ve düşük buhar basıncına sahip malzemelerin kaplanmasında, daha az damlacık oluşumu gözlenir. ZrN kaplamalar kesme işlemlerinde TiN kaplamalarına göre daha iyi performans oluşturmıştır. Buna ek olarak ZrN kaplamaları TiN kaplamalarına göre daha sert yapıdadır (Zega, 1989).

AlTiN kaplamaları; yüksek alüminyum ihtiva eden ve siyaha yakın olarak mor renkli olan AlTiN kaplama, bütün talaşlı imalat yöntemlerinde, kuru kesme koşullarında, kaba ve kalın pasoya sahip talaş kaldırma işlemlerinde çok iyi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. AlTiN kaplamalar 3800 - 4200 HV gibi çok yüksek sertliğe sahip olmasına karşın toklukları ve darbe dayanımları yüksektir. (Bülbül, 2013; Ionbond, 2011). Çizelge 1.1 'de ark PVD kaplamaların karakteristik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Kaplamaların karakteristik özellikleri (Ionbond, 2011)

Kimyasal Bileşimi	TiN	AlTiN	ZrN
Sertlik (HV)	2900 ± 200	3800 ± 400	2800 ± 200
Oksidasyon Sıcaklığı (C°)	550	900-1100	600
Sürtünme katsayısı	0.65	0.6	0.6
Yoğunluk (g/cm ³)	5.2	5.1	7.1
Kalınlık (µm)	2 - 3	1-4	1-4
Renk	Renk Altın sarısı	Siyah-Mor	Açık Sarı

1.6. Magnezyum ve Alüminyum Alaşımları ile Epoksi Kompozitinin Özellikleri

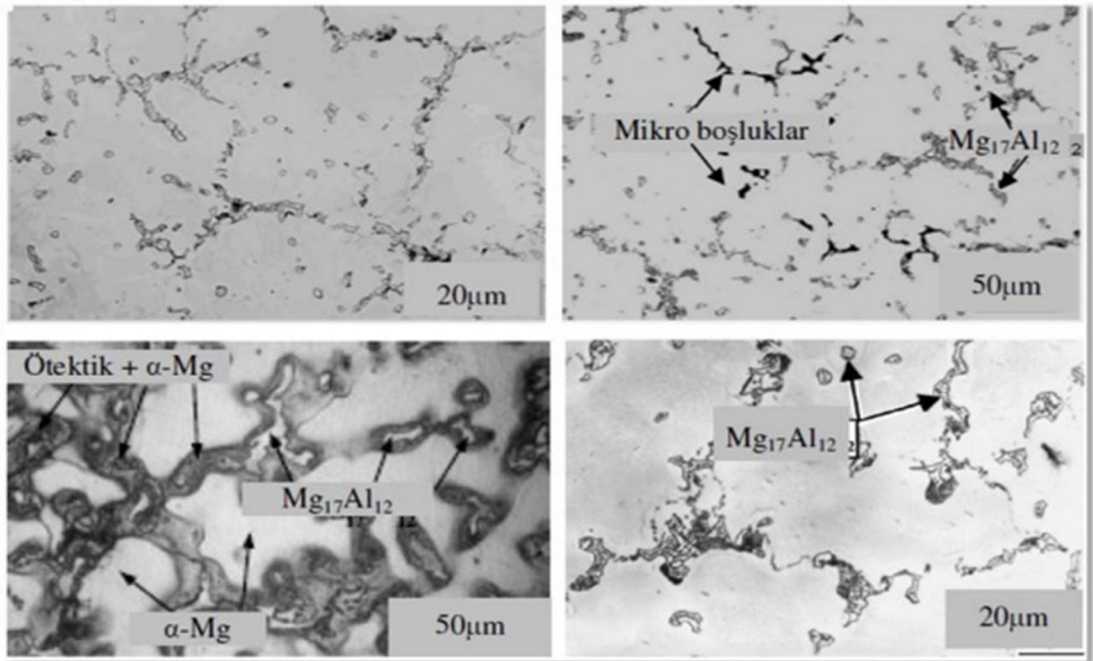
1.6.1. AZ91 Magnezyum alaşımının özellikleri

Mg-Al-Zn (AZ91) alaşımları, genellikle otomotiv sektöründe parçaların dökümü için kullanılmaktadırlar. Öte yandan magnezyum alaşımlarıyla mukayese edildiğinde; AZ91 magnezyum alaşımı daha iyi döküm, daha iyi akma dayanımı özelliklerinin bulunduğu bilinmektedir (Kuşdemir, 2008; Mert vd., 2010). AZ91 alaşımı ortalama olarak ağırlıkça % 9 Al ve % 1 Zn içeriğine sahiptir. Al, magnezyum temelli alaşımlarda en çok kullanılan alaşım türüdür. Alüminyum eklenmesi magnezyum alaşımının sertliğini, çekme dayanımını ve katılma zamanını artırırken sünekliğini ve darbe dayanımını minimize etmektedir. Alaşıma ağırlıkça % 6'dan daha çok Al elementinin eklenmesiyle ısıtılma yetisi de aynı oranda tutmaktadır. Al kısmen katı çözelti meydana getirerek ve Mg₁₇Al₁₂ formunda çökelti oluşturarak yapı içerisinde tane sınırları boyunca bulunmaktadır. 120°C'den daha düşük sıcaklıklarda katı eriyik ve çökelti sertleşmesi ile oluşan Mg₁₇Al₁₂ intermetalik bileşiği alaşımın dayanımını iyileştirmektedir (Kılıç, 2013; Kuşdemir, 2008). Çinko eklenmesi tane sınırlarındaki ötektik düzeyini artırarak alaşımın katılma sıcaklığını azaltmaktadır. Alaşıma Zn eklenmesi ilaveten korozyon özelliklerinde bakırın yan etkisini bertaraf etmede yardımcı olmaktadır. Çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında alaşımın sertliğini, akma ve çekme dayanımını arttıran Zn, tane sınırlarına çökelerek sıcak yırtılmaya zemin hazırladığı için alaşımda ağırlıkça % 2 ile sınırlı kalmalıdır (Kuşdemir, 2008). Çinko elementinin alaşımda ağırlıkça % 3'ten daha fazla olması yapıda büzülme boşlukları oluşmasına sebep olarak metalde korozyon meydana gelmesini tetiklemektedir (Gözüaçık, 2012; Song ve Atrens, 2000).

AZ91 serisi iyi döküm ve mekanik özellikleriyle magnezyum alaşımları arasında en fazla tercih edilen ticari ve yapısal alaşımdır (Candan vd., 2009; Kuşdemir, 2008). AZ91 magnezyum alaşımı; 95 MPa akma dayanımı, 144 MPa çekme

dayanımı, 63 HV Vickers sertlik gibi mekanik özelliklere sahiptir (Kuşdemir, 2008).

Zn/Al seviyesinin 1/3'ü aştığı magnezyum-aluminyum alaşımlarının mikroyapısında Mg-Al-Zn üçlü fazı izlenir. Ortalama 600°C' de birincil magnezyum olan α -Mg katı eriyiğinin çekirdeklenmesi ile AZ91 alaşımının dengeli katılaşması başlamaktadır. Çekirdeklerin büyümesiyle beraber 470°C'de katılaşma halinin son bulmasıyla, mikroyapıda α -Mg matrisi ve β ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalik fazını içeren ayrık bir ötektik oluşumu ($\alpha + \beta$) görülür. Bununla birlikte denge dışı AZ91 alaşımının mikroyapısı, α -Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazından oluşmaktadır (Kuşdemir, 2008). AZ91 alaşımının mikroyapıları Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 1.12. AZ91 alaşımının mikroyapısı (Kuşdemir, 2008)

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunlukları ve maliyet unsurlarının da fazla olmamasının yanında sahip olduğu iyi dökülebilirlik, kaynaklanabilirlik dışında mükemmel mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle kendine otomotiv, havacılık sanayi iletişim gibi geniş bir alanda kullanım alanı sunmuştur. Bu özelliklerine karşın korozyon olma durumu ve aşınma direncinin düşük seviyede olması kullanım alanı kısıtlayıcı bir özellik olarak görülmektedir. Korozyona karşı

direncinin artması ve koroziyon alanlarda çalışma ömrünü fazlalaştırmak maksadıyla magnezyum üzerine yapılabilecek kaplamalarla ilgili olarak çok sayıda araştırma çalışmaları yapılmaktadır. Gaz faz biriktirme, anodizasyon, plazma elektrolitik oksidasyon bu yöntemlerden birkaç tanesidir (Barchiche vd., 2007; Li, vd., 2011; Lv vd., 2010; Muhaffel 2012).

Magnezyum aktif olan bir metaldir ve ajanları indirgeme gibi önemli görülen bir özelliği bulunmaktadır. Bunun sonucunda da magnezyum, titanyum, zirkonyum ve uranyum gibi reaktif metallerin ekstraksiyonlarında kullanıldığı bilinmektedir (Muhaffel, 2012). Magnezyum titanyumun $TiCl_4$ yapısına dönüşümünü azaltabilmektedir. Magnezyum ve alaşımları yüksek katodik serbest korozyon potansiyeline sahiptir ve alaşımları kurban anot olarak kullanılmakta ve birçok diğer yapısal metaryallere korozyona karşı koruma sunmaktadır. Reaktif yapısının özelliği nedeniyle, magnezyum alaşımlarının pillerde kurban anot olarak kullanımı günümüzde yaygınlaşmıştır. Çinko pillerle kıyaslandığında magnezyum pillerin; yüksek hücre voltajı, birim ünite ve hacimdeki yüksek enerji yoğunluğu, bilhassa yüksek güç yoğunluğu, düşük deşarj sıcaklıkları, yüksek depolama sıcaklıkları gibi avantajlar sağladığı görülmektedir. Bu avantajlarıyla birlikte magnezyumun pillerde anot biçiminde kullanılması hızlı bir şekilde artış göstermektedir (Muhaffel, 2012; Song ve Atrens, 2000).

Magnezyumun kullanılması magnezyum alaşımlarının düşük korozyon direncine sahip olmasından dolayı kısıtlanmaktadır. Korozyon direnci, özellikle klor iyonu içeren elektrolitlerin etkisine açık olduğu şartlarda son derece düşüktür. Bu duruma karşın magnezyum üzerindeki oksit filmi kırsaldaki, endüstriyel ve deniz atmosferinde korozyona karşı kayda değer bir korozyon direnci vermektedir (Muhaffel, 2012). Nihayetinde magnezyum alaşımlarının atmosferik korozyon dirençleri deniz atmosferine açık yerlerde bile yumuşak çelikten daha iyi korozyon direnci sağlamaktadır. Genel olarak magnezyum alaşımlarının korozyon direnci alüminyum ile yumuşak çelik arasında bir alandadır. Bazı hususlarda alüminyum alaşımlara göre daha iyi korozyon

direnci sunmaktadır. Yine de magnezyum, klorür içeren çözeltilerde duyarlıdır. Pratik uygulamalarda basınçlı döküm alaşımı AZ91'in tuz sprey yöntemi ile korozyon performansı alüminyum ve yumuşak çeliğe göre mukayese edildiğinde ciddi manada yüksektir (Muhaffel, 2012; Song ve Atrens, 2000).

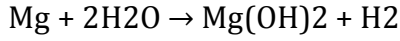
Magnezyum alaşımları genel olarak mühendislik malzemelerinde kullanılmakta genellikle de otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarında korozyon davranışı bazı önem arz eden problemleri de beraberinde taşıdığı görülmektedir. Magnezyumun nemli çevrede düşük korozyon özelliğinin iki önemli nedeni vardır. Bunlar; yapısında bulunan empüritelerden ve ikinci fazlardan kaynaklı meydana gelen içerideki galvanik korozyon ve diğer metallere kıyasla yüzeyde oluşan yarı pasif hidroksit filmin mükemmel ve koruyucu olmamasıdır (Muhaffel, 2012; Zanotto, 2009). Çizelge 1.2' de farklı metallerin korozyon potansiyeli verilmiştir.

Çizelge 1.2. %3-6 NaCl içeren çözeltide farklı metallerin korozyon potansiyelleri (Song ve Atrens, 2000)

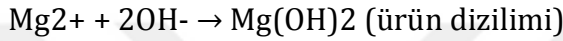
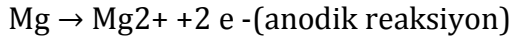
Metal	Vkor
Mg	-1.73
Mg alaşımları	-1.67
Çinkosuz çelik	-1.14
Zn	-1.05
Kadmiyumlu çelik	-0.86
Al(%99.99)	-0.83
Al(%12Si)	-0.83
Çelik	-0.78
Dökme demir	-0.78
Pb	-0.55
Sn	-0.43
Krom çeliği(aktif)	-0.33
Pirinç	-0.22
Cu	-0.14
Ni	-0.14
Krom çeliği(pasif)	-0.13

Magnezyumun yaş ortamda çözünmesi genel olarak su ile beraber elektrokimyasal bir reaksiyon şeklinde ilerlemekte ve magnezyum hidroksit ve moleküler hidrojen (H₂) oluşturmakta bu sayede magnezyum korozyonu

nispeten oksijen korozyonuna karşı duyarsızdır (Eker, 2009; Muhaffel, 2012; Zanutto, 2009). Toplam korozyon reaksiyonları;



Toplam korozyon reaksiyonu oluşması için parçalı tepkimelerin gerçekleşmesi gerekmektedir (Song ve Atrens, 2000). Bu parçalı tepkimeler;



Genel olarak magnezyumun korozyonu yüzeydeki filmin karakteristiğine göre değişkenlik göstermektedir. Bu duruma karşın farklı çözeltilerde magnezyum üzerindeki pasif tabakanın doğası hakkında sınırlı bilgi vardır (Muhaffel, 2012).

1.6.2. Alüminyum alaşımının özellikleri

Alüminyum alaşımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri alaşım elementlerine ve iç yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Alüminyum metale katılan en önemli alaşım elementleri silisyum, mangan, magnezyum, bakır ve çinkodur (Eker, 2008; Zeren vd., 2012).

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon yetisi iyi olup kolayca biçimlendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının ciddi bir kısmına ısıtılma işlemi yapılabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma aşağıdadır: (Eker, 2008). 1XXX: Saf alüminyum: Özellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanıldığı görülmektedir (Meriç, 1989). 2XXX: Al-Cu alaşımları: Temel alaşım elementi bakırdandır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de mevcut olabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık alanında

yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirci, 1988). 3XXX: Al-Mn alaşımları: Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tanklarında kullanıldığı gözlemlenir (Meriç, 1989). 4XXX: Al-Si alaşımları: Esas alaşım elementi silisyumdan meydana gelmektedir. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek kabiliyeti bulunan alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde aktif olarak mevcuttur (Seykoç, 2013). 5XXX: Al-Mg alaşımları: Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı yükseldiği ölçüde sertlik ve mukavemet de aynı oranda artış kaydeder ancak süneklik aynı oranda azalmaktadır. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır (Eker, 2008). 6XXX: Al-Mg-Si alaşımları: Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Biçimlendirilme yetisi yüksek olan bu tür alaşımlar bilhassa ekstrüzyon ile ortaya konan komponentlerin imalatında mütemadiyen kullanılmaktadır (Eker, 2008). 7XXX: Al-Zn alaşımları: Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak komponentlerinin yapımı ve diğer yüksek mukavemet istenen alanlarda kullanılır (Meriç, 1989). 8XXX: Al-Li alaşımları: Temel alaşım elementi lityum olup, Kalay ilavesi de yapılabilir. Bilhassa uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerini barındırmaktadır. Ancak diğer Al alaşımları ile mukayese edildiğinde üretim maliyeti oldukça yüksek seyretmektedir (Bilir, 2015; Seykoç, 2013).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları evrende demir katkılı malzemelerden sonra en çok önem arz eden metal grubunu içermektedir. Buna ek olarak da hafif metaller içerisinde de hem saf halde hem de alaşım olarak en çok kullanılan türüdür. Alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanımında etkin bulunan faktörler şöyle aktarılabilir: (Metalurjik, 2018; Zeren vd., 2012). Dayanım/Özgül Ağırlık Oranı: Alaşımlarda çok daha net olan bu oranın yüksekliği hafifletilmelerine öncelik verilen konstrüksiyonların çoğu için alüminyumun ve alaşımlarının uygun bir malzeme olmasını sağlamaktadırlar (Meriç, 1989). Elektrik İletkenliği / Özgül Ağırlık Oranı: Bu oran bütün metallere

kıyasla alüminyumda çok daha yüksek seyretmektedir. Bu durumdan kaynaklı da yüksek gerilim hatlarında bakırın muadili konumunda bulunabilmektedir (Topbaş, 1993). Korozyon Dayanımı: Atmosfere ve pek çok ortama karşı alüminyumun korozyon dayanımı ciddi manada yüksektir. Eloksal ve benzeri yüzey işlemleriyle artırılabilmekte ve buna ek olarak da dekoratif görünüm de ifade edilebilmektedir (Meriç, 1989; Zeren, 2012).

Üstün yönlerine ek olarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarının soğuk ortamlarda dahi çok iyi şekillenebilir derecede olabilmesi, film gibi çok ince levha haline getirilebiliyor statüde olması ve ısı iletme yetisinin de yüksek olması iyi özelliklerindendir. Üstün özelliklerine karşın saf halde çekme dayanımı ve akma sınırı değerlerinin düşük olması, oksijene karşı olan yüksek afinitesinden dolayı döküm kabiliyetinin, kaynak ve lehimlenme kabiliyetinin düşük oluşu, talaşlı şekillendirilebilirliğinin iyi olmaması, bazlara, hidroksitlere karşı dayanıksızlığı gibi iyi olmayan özellikleri de vardır. Ancak alaşımlama ile bu özelliklerde de önemli oranda iyileşme sağlanabilmektedir. Ağırlıktan tasarruf, otomotiv ve uçak endüstrisinde ağırlıktan tasarruf önemli bir konudur (Metalurjik, 2018; Topbaş, 1993; Zeren, 2012).

Düşük özgül ağırlık, elektrik ve ısıyı iyi iletme, yeterli seviyedeki mekanik dayanım ve iyi plastik biçimlendirme yetisini elinde tutan alüminyum, farklı korozi alanlarında kullanılabilmektedir. Genellikle korozyon dayanımının aranmış olduğu durumlarda, alüminyumun saflığının % 99,5'un altında olmaması gereklidir. Ancak çoğunlukla alüminyumun mekanik taraflarını geliştirebilmek için alaşımlama yapılmasından kaynaklı, alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, saf alüminyumdan daha düşük seyretmektedir (Eker, 2008; Metalurjik, 2018; Seykoç, 2013).

Alüminyumun pek çok korozi alana karşı göstermiş olduğu direnç, mevcut koşullara bağlı olarak yüzeyinde oluşan, amorf veya kristalin alüminyum oksit tabakasından kaynaklıdır. Atmosferde meydana gelen yüzey filmi ekseri olarak amorf, su ve su buharı içerisinde ise daha çok kristalin yapıda yüzey filmi oluşur. Meydana gelen tabaka ne kadar homojen durumdaysa, aynı şartlarda

korozyon dayanımı da o kadar iyi seviyededir. Alüminyum malzemeler, atmosfer içerisinde korozyona oldukça dayanıklıdır. Endüstri atmosferinde (SO₂, kir, toz) ve deniz atmosferinde otuz yıl sonrası korozif etki sonucu, alüminyum malzemedeki dayanım azalması, yaklaşık % 9- 13 kadardır (Zeytin vd., 2001). Çizelge 1.3’ de bazı alüminyum alaşımlarının farklı korozyon ortamlarındaki durumları gösterilmiştir (Eker, 2008; Topbaş, 1993).

Çizelge1.3. Alüminyum ve bazı alaşımlarının farklı korozyon ortamlarındaki durumları (Özakın, 2014)

Korozif Ortam	Al (%99.5)	AlMg	AlCuMg	Kullanım Yeri
Asetilen (kuru)	1		2-3	Basınçlı Tüp
Amonyak(kuru,sıvı)	1-2	1-2		Soğutma
Etan	1	1		Basınçlı Tüp
Endüstri Atmosferi	2-3	2-3	3	İnşaat-Taşıt
Deniz Atmosferi	1-2	1	3-5	Gemi İnşaatı
Benzol	1	1	1	Kap, Aparat
Benzin	1	1	1-3	Otomotiv
Destile Su	1-2	1-2		Kimya
Freon	1	1		Soğutma
Deniz Suyu	2-3	1-2	3-5	Gemi
1- Çok Dayanıklı, 2- Dayanıklı, 3- Az Dayanıklı4-Kullanılabilir, 5- Kabul edilebilir ölçüde dayanıklı, 6- Dayanıksız				

1.6.3. Epoksi malzemenin özellikleri

Epoksi, malzemelerin, metaryallerin çevresel etkilere karşı dayanıklı hale getirilmesi her zaman yapı alanlarının en önemli tartışma ve araştırma hususlarından bir tanesi olmuştur. Epoksi yüzey kaplamaları, her tarz kara ve deniz yapısında, doğanın ve sanayinin en kötü şartlarına karşı yapıların yüzeylerini estetik malzemelerle kaplayarak muhafaza etmek için geliştirilen teknolojik yapı malzemesi grubudur. Bunların yanında da, üstün yapışma özelliği, mekanik ve fiziksel dayanımlarından kaynaklı farklı yapıdaki inşaat malzemelerini birbirine yapıştırmak ve tutturmak için de kullanılan epoksi

malzemeler mevcuttur. Epoksi kompozitinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Bağcı, 2010);

- a) Agregası ilavesi ile kaymaz bir zemin elde edilebilir,
- b) Dekoratif uygulamalarda geniş bir renk yelpazesine sahiptir,
- c) Kimyasallara karşı dayanıklılıkları vardır,
- d) Estetiktir, kolay temizlenirler ve hijyeniktirler,
- e) Solvent içermemektedirler,
- f) Sürtünmeye ve aşınmaya karşı dayanıklı yüzeyler meydana getirmektedirler,
- g) Yağ ve kimyasallara karşı direnç gösterirler.

Epoksi kompozitlerinin kullanıldığı alanlar, uygulama tarzına ve ürün seçimine göre değişkenlik göstermekte ve şöyle sıralanmaktadır (Bağcı, 2010);

- a) Ahşap, yığma ve betonarme yapılarda yüklenilen kuvvetlerin artış göstermesi, hasar ve yıpranma olması, yapısal farklılıkların olması, dizayn ve imalat eksikliklerinin bulunması durumunda yapıların kuvvetlendirilmesi amacıyla,
- b) Aşınmaya karşı koruyucu kaplama yüzeyi olarak,
- c) Beton, polyester, seramik, metal, sıva ve epoksi alanlar üzerine ince kaplama malzemesi olarak, yapısal bağlantı ve onarım işlemlerinde,
- d) Betonarmede; ankraj demirlerinin meydana getirilmesi maksatlı filiz ekme işlemlerinde,
- e) Donatı ve demirlerin birbirlerine giydirilmesinde ve bağlanmasında; taş, çelik alüminyum ve hatta ahşabın yapıştırılmasında,
- f) Kimyasal ve mekanik etkilerle karşılaşacak zemin ve duvar seramik kaplamalarının derzlerinde, sert, su geçirimsiz ve kimyasallara dayanıklı derz dolgu malzemesi olarak; havuz, çamaşırhane, hastane, laboratuvarlarda,
- g) Köprü taşıyıcı plakalar, makina ayakları, bağlama civataları, tren ray hatlarında sorunsuz yüzey ve dayanıma sahip imalatlar için,

- h) Prefabrik beton elemanları ve kolonların montajında; çatlak ve kırıkların tamir edilmelerinde,
- i) Su altı imalatlarında,
- j) Taze betonu, eski sertleşmiş beton veya harca bağlayabilmek maksadıyla yapıştırıcı reçine olarak,
- k) Yüksek dayanımlı zemin ve duvar boyası olarak,
- l) Yüzey koruyucu kaplaması olarak,
- m) Yapılarda, herhangi bir sebeple çatlakların ve oyukların doldurularak yapıştırılması veya enjekte edilmesi amacıyla kullanılabilir.

Yapılan çalışmalarda (Lancaster, 1968; Tripaty ve Furey, 1993; Wang vd., 2003). takviye malzemesinin korozyonu önlemekte etkili olduğu kadar, kullanılan polimer matrix malzemesinin cinsinde spesifik uygulama açısından da büyük bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. En genel kullanılan polimerlere bakmak gerekirse; polytetraflouroethylene (PTFE), polyetheretherketone (PEEK), polyamit, polietilen, phenolik, doymamış polyester ve epoksi dir. Polyester termoset bir tür reçine görevini görmektedir. Sıcaklık ve kimyasal etkilere karşı yüksek direnci ve metalik ve non-metalik alanlara yapışma kabiliyeti bu malzemelerin en belirgin özellikleridir.

Genel mahiyette pratikteki araştırmalarda beş temel aşınma tipi mevcuttur: abrasiv, adhesif, korozyon, erozyon ve yorulma. Bunlar arasında en önemlisi % 63' lük bir düzeyde aşınma türü olan abraziv aşınmadır (ASM Handbook, 1992). Polimer ve kompozitlerin her geçen gün endüstriyel uygulamalarda kullanımı artmaktadır (Zhang, 1998). Bu uygulamaların pek çoğunda da abrasive aşınmanın etkin rol oynaması (Friedrich ve Hager, 1996) bu konuda yapılacak çalışmaların etkinliğinde rol oynamıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, tez çalışmasına konu olan magnezyum ve alüminyum alaşımları ile birlikte epoksi malzemenin aşınma ve korozyon dayanımı üzerine literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan literatür araştırması aşağıda sıralanmıştır:

Candan vd. (2009), %0,2 – 0,5 Ti içeren AZ91 magnezyum alaşımlarının korozyon davranışını incelemişlerdir. Ağırlık kaybı ve elektrokimyasal korozyon tekniklerine göre %3,5 'luk NaCl solüsyonları içerisinde yapılan korozyon deneyleri neticesinde, AZ91 magnezyum alaşımına Titanyum (Ti) ilavesinin korozyon dayanımını kayda değer şekilde arttırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucu elde edilen polarizasyon eğrileri incelendiğinde katkısız AZ91 Mg alaşımına kıyasla, % Ti katkı oranının artmasıyla korozyon akımı (Icorr) değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Zulkifli vd. (2015), manyetik alanda sıçratma tekniğiyle AZ91 magnezyum alaşımı üzerine AlN, TiN ve TiAlBN kaplamalar yapılarak korozyona karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri ve elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri incelendiğinde; TiN ve AlN kaplamalara kıyasla, TiAlBN ile kaplanan AZ91 Mg alaşımı malzemesinin korozyon ataklarına karşı başarılı bir şekilde koruyucu davranış sergilediği, korozyon potansiyelinin iyi değerlerde olduğu ve kütle kaybının da nispeten daha düşük oranda olduğu rapor edilmiştir.

Ertaş vd. (2015), manyetik alanda sıçratma (DC magnetron sputtering) PVD tekniği ile AZ91D magnezyum alaşımı üzerine TiN ve VN/TiN alaşımlarının kaplanmasıyla korozyona karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri 3 elektrotlu sistem kullanılarak %3,5 lik NaCl çözeltisi içerisinde yapılmış ve potansiyodinamik polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde; kaplanmamış alaşıma göre kaplanmış numunelerin korozyona karşı koruyucu etki gösterdiği belirtilmiştir. Bunun yanında korozyon potansiyelleri incelendiğinde; VN/TiN çok katmanlı kaplamanın, TiN kaplı numuneye göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Yamamoto vd. (2001), fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle AZ31 ve AZ91 magnezyum alaşımları üzerine yüksek saflıkta magnezyum kaplayarak korozyona dayanımını arttırmaya çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde, yüksek saflıkta magnezyum ile kaplanan magnezyum alaşımlarının korozyon direncinin arttırılabileceği belirtilmiştir.

Hsiao ve Tsai (2005), MAO yöntemiyle oluşturulan büyük oranda MgO'dan oluşan oksit kaplamaları incelemişlerdir. Elektrolite $Al(NO_3)_3$ katkısı sonucu, elde edilen kaplamada Al_2O_3 ve $Al(OH)_3$ oluşumu görülmüştür. AZ91D magnezyum alaşımı için Al_2O_3 içeren kaplama daha yüksek korozyon direnci göstermiştir.

Muhaffel (2012), mikro ark oksidasyonu işlemi uygulanmış silisyum karbür takviyeli AZ91D magnezyum alaşımının korozyon ve aşınma dayanımını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, AZ91D magnezyum alaşımına %2, %4 ve %8 oranlarında silisyum partikülleri ilave edilerek döküm yoluyla elde edilen kompozit AZ91D alaşımına mikro ark oksidasyonu işlemi uygulanmıştır. Yapılan aşınma deneyleri neticesinde mikro ark oksidasyon işleminin AZ91D'nin aşınma direncini çok büyük oranda iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Yapılan korozyon deneyleri neticesinde işlem görmemiş numunelere nazaran, mikro ark oksidasyonu işlemi görmüş numunelerin korozyon direnci daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Reiners ve Griepentrog (1995), yaptıkları çalışmada AZ91 magnezyum alaşımı üzerine; Manyetik Alanda Sıçratma Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemiyle TiN ve elektrokimyasal kaplama yöntemiyle Ni-P kaplama oluşturarak, bu iki farklı kaplama yönteminin birlikte uygulanmasının, AZ91 magnezyum alaşımının aşınma ve korozyon dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, döküm yöntemiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımlarının PVD yöntemiyle aşınma ve korozyon dayanımının geliştirilebileceği tespit edilmiştir.

Altun (2004), manyetik alanda sıçratma (DC magnetron sputtering) yöntemiyle, AZ31, AZ61, AZ63 ve AZ91 magnezyum alaşımlarına 3 farklı tipte

(AlN+AlN+AlN; AlN+TiN ve AlN) kaplama yaparak bu kaplamaların farklı PH (2,3,8,11 ve 11,5) değerlerindeki çözeltiler içerisindeki korozyon dayanımlarını mukayeseli olarak incelemiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde kaplamasız numunelerde, anodik akım yoğunluğu değerlerinin PH daki düşüşle birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Kaplanmış numunelerde ise bu durumun aksine anodik akım yoğunluğu değerleri belli bir miktarda düşmüştür. Nötr durumdaki NaCl ve Na₂SO₄ çözeltileri içerisinde, kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımlarında pasife benzer davranış görüldüğü ve diğer kaplamalı magnezyum alaşımı malzemelerine nazaran en iyi korozyon direncinin olduğu rapor edilmiştir.

Kiahosseini vd. (2013), iyon demeti sıçratma (ion beam sputtering) PVD yöntemiyle AZ91 magnezyumu alaşımı üzerine ZrN kaplama yapılarak korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri 373K, 473K, 573K ve 673K sıcaklıklarındaki Ringer çözeltisinde yapılmıştır. Yapılan potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri neticesinde elde edilen veriler sonucu 373-573K aralığında korozyon dayanımının azaldığı, 673 K değerinde ise altlık malzemeye göre korozyon dayanımının arttığı rapor edilmiştir.

Tsubakino vd. (2003), vakum yöntemiyle saf magnezyum kaplanan magnezyum alaşımlarının korozyon davranışlarını incelemişlerdir. 300-900K sıcaklık skalasında %3 NaCl solüsyonu içerisinde yapılan korozyon deneyleri neticesinde, AZ91 magnezyum alaşımının, yüksek saflıkta magnezyum kaplama yapılarak korozyona karşı daha fazla dayanımlı hale gelebileceği belirtilmiştir.

Sinici (2006), magnezyum esaslı AZ91 magnezyum-aluminyum-çinko alaşımı üzerine katodik ark buharlaştırma fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle TiN, AlTiN ve CrN olmak üzere üç grup kaplama yaparak korozyona karşı dayanımlarını incelemiştir. Kaplanmamış ve kaplanmış numuneleri her biri için ayrı olacak şekilde %0,1, %1 ve %3 lük (NaCl, HCl, H₂SO₄ ve Na₂SO₄) çözeltileri içerisinde potansiyodinamik polarizasyon deneylerinden yararlanılarak korozyon davranışları test edilmiştir. Kaplanmamış AZ91 magnezyumu için en iyi anodik akım yoğunluğu değeri %0,1 konantrasyonundaki NaCl çözeltisinde görülmüştür. Kaplanmış ve kaplanmamış AZ91 alaşımlarının potansiyodinamik

polarizasyon eğrileri incelendiğinde, %3 lük Na₂SO₄ çözeltisi dışındaki çözeltelerde korozyon dayanımını yeterince iyileştirmediği belirtilmiştir.

Yunchang vd. (2009), biyouyumlu kaplamaların korozyon dayanımını incelemek amacıyla, katodik ark prosesiyle AZ91 magnezyumu alaşımı üzerine ZrN kaplama yapmışlardır. Bodyfluid çözeltisinde yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri neticesinde korozyon potansiyelinde artış aynı zamanda da akım yoğunluğunda azalma gözlemlenmiştir. Yapılan ZrN kaplamaların AZ91 magnezyum alaşımının korozyon dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Metha vd. (2004), metal kalıp ve kum kalıp prosesleriyle üretilen magnezyum ve alüminyum alaşımlarının kuru ve yağlı şartlar altındaki aşınma performanslarını incelemiştir. Magnezyum alaşımı olarak AZ91D ve AS21, alüminyum alaşımı olarak da Al-CA 313 kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde ötektik alaşımlarda diğer tüm Al-Si alaşımlara (Alüminyum) nazaran daha düşük aşınma oranı sağlanmıştır. Aşınma oranını arttıran en güçlü faktörün artan yük değeri olduğu rapor edilmiştir. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda yüzey üzerinde ciddi ölçüde yüzey hasarı karakterizasyonu gözlemlenmiştir. Bunun yanında yüzey özelliği incelendiğinde, düzgün ve dar aşınma izlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Uygulanan yük ve kayma koşullarının aşınmayı etkilediği belirtilmiştir.

Aung vd. (2007), düşük kayma hızlarında, AZ91D Magnezyum alaşımının kuru şartlardaki aşınma performansını incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde; kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısı değerinin arttığı belirtilmiştir. Çalışmanın esas amacı olan çok düşük kayma hızlarındaki yüksek sürtünme katsayısı değerleri, yumuşak (AZ91 Mg alaşımı) ve sert (aşındırıcı bilya) kontak yüzeylerindeki abrazyondan ileri geldiği belirtilmiştir. Bunun aksine daha yüksek kayma hızları ise, yüksek kontak sıcaklıkları oluşturması sebebiyle yüzeyde oksitlenmeye sebebiyet vermiş ve oluşan kayma gerilmeleri sürtünme katsayısını arttırmıştır. Düşük hızlarda yapılan deneylerde, abrazyon aşınma gözlemlenmiş ve oluşan bu abrazyon aşınma, yüzey üzerinde derin olukların oluşmasına ve yüzey deformasyonuna neden olmuştur. Ayrıca 0,1

m/sn hızından büyük değerlerde oksidasyon aşınması gözlemlenirken, okside olmuş kalıntı malzemeler, kalıntıların sıkışmasına yardımcı olduğu ve aşınmayı önleyici bir katman oluşturduğu rapor edilmiştir.

An vd. (2008), döküm yoluyla üretilmiş Mg97Zn1Y2 ve AZ91 magnezyum alaşımı malzemelerinin kuru şartlar altındaki aşınma performanslarını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri muadil çalışmalara nazaran daha büyük yükler altında (20-380 N) gerçekleştirilmiştir. Yapılan aşınma deneyleri neticesinde; 20N yükte aşınma yüzeyinin kayma yönüne paralel oluklarla örtülü olduğu ve bu durumun sert malzemeyle yumuşak malzemelerin aşındırılması esnasında oluşabilecek partiküllerin sebebiyet verdiği abrazif aşınmayla ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir. Bunun dışında yüzey üzerinde oksidasyon filmi oluşumu gözlenmiştir. Oluşan bu kalın oksit tabakası aşınma oranını azaltarak yüzeyi aşınma anlamında önemli derecede korumuştur. Belli yük değerlerinde, sürtünmenin etkisi ile yüzeyde metal erimeleri oluşmuştur. Bu durum bir yağlayıcı etkisi göstererek sürtünme katsayısını azaltmıştır. Kuru kayma boyunca yüzeydeki ısı artışı, yüzey katmanının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını değiştirerek aşınma davranışını etkilemiştir.

Zafari vd. (2014), AZ91 magnezyum alaşımı ve %3 Renyum (RE) katkılı AZ91 magnezyum alaşımı malzemelerinin aşınma performanslarını incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar 25-250 °C skalasında gerçekleştirilmiş ve 25 °C değerinde, AZ91 magnezyum alaşımının aşınma oranı %8 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklığın 100 °C değerine çıkmasıyla birlikte aşınma oranındaki azalma, %58' e ulaşmıştır. Aynı değerlerde, kayma hızının artışıyla birlikte aşınma oranının ciddi derecede yükseldiği gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde abrazif aşınma mekanizması gözlemlenmiş olup, plastik deformasyonlar ve çizikler kayma yönüne paralel oluşmuştur. Kayma hızı değeri düşükten hızlıya doğru çıkarken bazı oksit kalıntıları gözlemlenmiştir. Daha yüksek kayma hızı ve daha yüksek yüzey sıcaklığının, aşınmış yüzeylerdeki oksit oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Genel itibariyle, kayma hızı değerleri arttıkça sürtünme katsayısı artarken, bu artışın, yüksek hızlardaki

şiddetli plastik deformasyon ve yüksek yapışma eğilimiyle açıklanabileceği belirtilmiştir.

Gül vd. (2011), Bizmut(Bi) ve Kobalt (Co) ilaveli AZ91 magnezyum alaşımının aşınma performansını incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde uygulanan yük miktarındaki artış ile ağırlık kaybı paralel olarak artmaktadır. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde, abrazif karakterde aşınmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında Bi ve Co ilavesinin belirli aşınma oranında düşüş sağlayabileceği rapor edilmiştir.

Sirinvasan vd. (2009), geleneksel alaşım ve geri kazanılmış AZ91 magnezyum alaşımı malzemelerinin aşınma performanslarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde, geleneksel alaşıma göre geri kazanılmış AZ91 basınçlı döküm alaşımının daha düşük sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma hızı değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Chen ve Alpas (2000), AZ91 magnezyum alaşımının kuru şartlardaki aşınma performansını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri 1-350 N yük skalası arasında blok bilezik aşındırma (block on ring) prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde yüzey özellikleri de incelendiğinde, hafif oksidasyon aşınmasından şiddetli metalik aşınmaya geçtiği ve bu durumun oluşmasına şiddetli plastik deformasyonun öncülük ettiği rapor edilmiştir. Bütün kayma hızlarında uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma oranı da artmıştır. Bunun yanında şiddetli aşınmanın neden olduğu çok yüksek yüzey deformasyonları (metalik partikül kalıntıları) gözlemlenmiştir. Ayrıca kaymadan kaynaklı hafif aşınma rejimi sonucu oluşan malzeme kaybı, kayma mesafesinin artışıyla lineer olarak artmıştır. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte, oksidasyon aşınmasından kabuklanma aşınmasına geçiş yaşanmıştır.

Tari vd. (2009), kriyojenik işlem uygulanmış (-196 °C) AZ91 magnezyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerini, aynı zamanda aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde düşük yüklerde

abrazif aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Ayrıca uzun kayma mesafelerinde tabaka aşınması gözlemlenmiştir.

Kılıç (2003), AZ91D magnezyum alaşımına mikro ark oksidasyon işlemi uygulayarak aşınma performansını incelemiştir. Ayrıca elektrolit çözeltisine karbon nanotüp ilave edilerek, karbon nanotüp ilaveli ve karbon nanotüp ilavesiz deney numuneleri oluşturularak bu numunelerin aşınma performansını incelemiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde karbon nanotüp ilavesinin AZ91D magnezyum alaşımının aşınma direncini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Uğuz ve Bayram (2001), ısıtıl işlem görmüş, %5, %8 ve %11 oranında silisyum içeren Al-Si alaşımı malzemelerinin aşınma dayanımlarını mukayeseli olarak incelemiştir. Aşınma deneyleri SiC aşındırıcı altında ve disk üzerinde pim metoduna göre yapılmıştır. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda Si içeriği en düşük olan alaşımın en az aşınma oranına sahip olduğu belirtilmiştir. Genel olarak oksidasyon ve abrazif aşınma mekanizmaları oluşmuştur. Deney sonrası yüzey görüntüleri incelendiğinde, geniş aşınma oluklarının olduğu ve parçalanmış silisyum partiküllerinin kayma yönüne paralel olarak yönelmiş durumda olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ozioko (2012), %7, %12 ve %14 oranlarında silisyum içeriğinin, Al-Si alaşımının aşınma dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri disk üzerinde pim metoduna göre farklı yükler altında yapılmıştır. Yapılan aşınma deneyleri neticesinde en fazla aşınmanın %7 lik alaşımda, en az aşınmanın ise %14 lük Al-Si alaşımında olduğu belirtilmiştir. Deney parametrelerinin aşınmaya olan etkisi incelendiğinde; artan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi değerleriyle birlikte aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında uygulanan yükün ve kayma hızının, aşınma oranını arttırmada kayma mesafesine oranla daha fazla etkili olduğu rapor edilmiştir. Yüzey özellikleri incelendiğinde %12 Si içeren Al-Si alaşımında daha büyük aşınma oluklarının olduğu gözlemlenmiştir.

Ölmez ve Keleşoğlu (2016), Etial 140 ve Etial 160 Al-Si alaşımlarının oda koşullarında ve yüksek sıcaklıktaki aşınma dayanımlarını inceleyerek, bu alaşımların fren diski olarak bir alternatif malzeme olma ihtimalini test etmişlerdir. Disk üzerinde pim yöntemine göre yapılan aşınma deneyleri sonrası ağırlık kaybı metoduna göre aşınma oranları belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde, Si oranı arttıkça malzeme kaybının arttığı belirtilmiştir. Yüzey özellikleri incelendiğinde numunelerde aşınma sonrası malzeme hasarı gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayılarında önemli artış yaşanmıştır.

Birol ve Birol (2008), yaptıkları çalışmada Etial 160 alüminyum alaşımını farklı oranlarda Silisyum katkısı eklenerek (%8,52-%19,73) tikso döküm yöntemiyle üretmişler ve aşınma dayanımlarını incelemişlerdir. Blok bilezik aşınma tertibatında yapılan deneylerde aşındırıcı malzeme olarak 100Cr6 çeliği kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde temel aşınma mekanizmasının adhezif tarzda olduğu görülmüştür. Ayrıca %12,65 oranında Si katkısı içeren alaşıma kadar aşınma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. %12,65 oranında Si içeren yakın ötektik alaşım ise en yüksek aşınma oranına sahip malzeme olmuştur.

Wang vd. (2003), %12 - %25 oranlarında Silisyum içeren Al-Si alaşımlarının sprey atomizasyonu ve biriktirme yöntemiyle oluşturarak aşınma dayanımlarını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri disk üzerinde pim metoduna göre kuru şartlarda ve farklı yükler altında yapılmıştır. Aşındırıcı olarak takım çeliği kullanılmış ve ağırlık kaybı yöntemiyle aşınma oranları belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda artan yük değeriyle birlikte aşınma oranı artmıştır. Düşük yüklerde abrazif aşınmanın etkileri görünürken, yüksek yüklerde plastik deformasyonun etki ettiği daha yumuşak görünümde homojen yapıda bir aşınma oluşumu gözlemlenmiştir. Düşük yük değerlerinde iyi aşınma davranışı gözlenirken özellikle yüksek yük değerlerinde aşınma artıkları görülmüştür. EDS analizleri incelendiğinde Fe ve O varlığı gözlemlenmiştir. Bu durumun varlığına tipik oksidasyon aşınmasının neden olduğu belirtilmiştir. Düşük yük değerlerinde baskın aşınma unsurunun oksidatif aşınma mekanizması olduğu,

daha yüksek yük değerlerinde ise baskın aşınma mekanizmasının delaminasyon ve üç elemanlı abrazif aşınma mekanizması olduğu belirtilmiştir.

Walczak vd. (2017), %12 lik Al-Si alaşımına grafit katkısının aşınma dayanımı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri bilye-disk düzeneğinde, 5N yük altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde tipik abrazif aşınma gözlenirken ayrıca delaminasyon ve oksidasyon aşınma mekanizmalarının da olduğu durumlar rapor edilmiştir. Bunun yanında grafit katkısız alaşımın ortalama 0,483 sürtünme katsayısı değerine ulaştığı ve bu yüksek sürtünme katsayısı değerinin, yüzey üzerinden kalkan sert partiküllerin (Si partikülleri) yumuşak yüzey üzerinde ikinci bir aşınma mekanizması oluşturmalarının neden olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca mikro çatlaklar/kırıkların oluşmasının yorulma aşınmasına neden olduğu belirtilmiştir. Yüzey özellikleri incelendiğinde bilye malzemesinin yüzeyine transfer olan alaşım malzemesinin aşınmaya karşı koruyucu etkide bulunduğu gözlemlenmiştir.

Yasmin vd. (2004), yaptıkları çalışmada, ısıl işlem görmüş AlSi12 alaşımının aşınma performansını incelemişlerdir. Disk üzerinde pim metoduna göre yapılan aşınma deneyleri neticesinde kayma hızının artmasıyla birlikte kütle kaybının arttığı görülmüştür. Kayma hızının artışıyla sürtünmenin etkisi sonucu ısı artışı oluşmuş ve malzeme daha yumuşak ve zayıf hale dönüşmüştür. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma oranı da artmıştır. Başlangıçtaki mesafelerde aşınma normal seyrederken mesafe artışıyla birlikte kütle kayıpları da artmıştır.

Elmadağlı vd. (2007), ısıl işlem görmüş ve farklı oranlarda Si içeren Al-Si alaşımlarının aşınma performanslarını incelemişlerdir. 0,2 ile 300 N aralığında ve blok bilezik aşındırma tertibatında yapılan deneyler neticesinde mesafe artışı ile birlikte devamlı bir şekilde aşınma oranının yükseldiği gözlenmiştir. Bunun yanında yükün aşınma oranıyla bağlantılı olduğu vurgulanmıştır. Yük artışıyla birlikte hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olduğu gözlenmiştir.

Ramesh vd. (1983), cam elyaf demetleri ile preslenmiş epoksi reçineli kompozitin aşınma dayanımını incelemişlerdir. Disk üzerinde pim metoduna göre yapılan aşınma deneyleri neticesinde ağırlık kaybı metoduna göre aşınma oranları ölçülmüştür. Yapılan deneyler neticesinde hem ağırlık kaybında hem de sürtünme katsayısında önce bir azalma daha sonra artış yaşanmıştır. Sürtünme katsayısındaki bu oluşumun; aşınmanın başlangıcında oluşan elyaf kırılmalarından olduğu tahmin edilmektedir. Kayma hızının artmasıyla birlikte, daha yüksek hızlarda, cam elyaf kırıklarının boyutlarının daha uzun olduğu görülmüştür. Bunun yanında polimer malzemenin disk yüzeyine transfer olması sonucu adhezif aşınma mekanizması görülmüştür. Sürtünme katsayısı değerinin, uygulanan pres yüküyle bağlantılı olduğu görülürken katkısız epoksi reçinesinin sürtünme katsayısı değeri, elyaf katkılı kompozit malzemenin 2 katı kadar oluşmuştur. Kayma hızı-sürtünme katsayısı ilişkisi incelendiğinde ise yine cam elyaf katkılı epoksi kompozitin sürtünme katsayısı değerinin oluşumunda kayma hızının doğrudan etkisinin olduğu gözlenmiştir.

Kishore vd. (2001), pin on disk aşınma yöntemiyle, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin aşınma performansını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri kuru ortamda yapılmış ve ağırlık kaybı prensibine göre aşınma oranları belirlenmiştir. Aşınmış yüzeylerin incelenmesi SEM mikroskobunda yapılmış olup yapılan gözlemler neticesinde, kayma mesafesinin artmasıyla birlikte aşınma yüzeylerinde elyaf ile matris ara yüzeylerinde ayrılmanın meydana geldiği rapor edilmiştir. Buna bağlı olarak, matris malzemeye yayılmış zayıf oranda kırılmalar/çatlaklar ve kalıntı malzemeler görülmüştür. Ayrıca yine kayma mesafesinin artmasıyla birlikte, matrisin aşınmasına bağlı olarak, elyaf kırılmalarında artış gözlemlenmiştir. Bunun yanında, uygulanan yük miktarının artmasıyla birlikte matris artıkları/kalıntıları ve elyafların parçalanmış boyutu daha büyük olmuştur.

Kishore vd. (1999), yaptığı bir başka çalışmada ise el yatırma tekniği ve basma kalıplama prosesi kullanarak iki yönlü (dokuma, 0° / 90°) cam elyaf takviyeli epoksi reçineli kompozit malzemeyi üretmişler ve bu kompozit malzemelerin pin on disk aşınma tertibatıyla kuru şartlardaki aşınma performanslarını

incelemişlerdir. Farklı hız ve kayma yükü değerlerinde yapılan aşınma deneyleri neticesinde, uygulanan yük ve kayma hızı değerlerinin artmasıyla birlikte, cam elyaf takviyeli epoksi reçineli kompozit malzemenin aşınmadan kaynaklı ağırlık kaybı oranının arttığı belirtilmiştir.

Suresha vd. (2007), pim-disk aşınma yöntemiyle, dokuma cam elyaf kumaş takviyeli epoksi reçineli kompozit malzeme ile epoksi reçine içine üç farklı oranda grafit koyarak oluşturdukları kompozit malzemelerin kuru ortamda aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalar neticesinde, cam elyaf takviyeli epoksi reçine içerisine yapılan grafit katkısının, kompozitin aşınma dayanımını arttıracığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, grafit katkılı kompozit malzemenin aşınma dayanımının, katkısız olana nazaran daha yüksek olduğu rapor edilmiştir.

Suresha vd. (2006), yaptıkları çalışmada ise iki yönlü (dokuma, 0° / 90°) carbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler ile cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performanslarını incelemişlerdir. Aşınma deneyleri kuru ortamda pin on disk prensibine göre farklı yük ve kayma hızı mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, kayma hızının ve uygulanan yükün artmasıyla birlikte elyaf takviyeli epoksi reçineli kompozit malzemelerin aşınma kaybının arttığını belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısının ve hacim kaybı oluşumunun büyük oranda, uygulanan normal yüke ve kayma hızına bağlı olduğu görülmüştür. Uygulanan normal yük ve hızın artışı ile birlikte hacim kaybı lineer olarak artmıştır. Uygulanan yükün artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı yükselmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, elyaf oranının daha az olduğu bölgelerde aşınma daha fazla görülmüştür. Karbon elyafli epoksi kompoziti, yarı yağlama kondüsyonu oluşturduğu için cam elyafli epoksi kompozitine nazaran daha iyi aşınma davranışı göstermiştir. Tüm deneylerde gözlemlenen sonuç; hem karbon elyafli epoksi kompozitinin hem de cam elyaf katkılı epoksi kompozitinin sürtünme katsayısının, kayma hızını arttırarak veya uygulanan yükü azaltarak düşürülebileceği şeklinde rapor edilmiştir.

El-Tayep ve Gadelrab (1996), tek yönlü düzenlenmiş cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini

incelemişlerdir. Farklı kayma koşulları altında silindir üzerinde pim (pin on cylinder) tekniğine göre yapılan aşınma deneyleri kuru ve yağlı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde, aşınmada oluşan artık malzemelerin üç elemanlı abrazif aşınma mekanizmasına neden olduğu rapor edilmiştir. Aynı zamanda yorulma aşınma mekanizmasının da olduğu belirtilmiştir. SEM mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, matris yüzeyi üzerinde mikro kırıklar, çatlamlar ve yüzey bozulmalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Artan hız ve yük değerleriyle birlikte, kayma arayüzünde sıcaklık artışları meydana gelmiştir. Bu durum elyaf matrisinin sınır yüzeyinin daha da zayıflamasına ve termal nüfuz oluşmasına sebebiyet vermiştir.

Pıhtılı (2009), Cam elyaf örgülü kumaş-epoksi reçineli ve cam elyaf-polyester reçineli kompozit malzemelerde reçine içeriğinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Aşınma deneyleri kuru şartlarda ve block-on-shaft deney düzeneğine göre yapılmış ve ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Yapılan deneyler neticesinde, cam elyaf-epoksi reçineli kompozit malzemelerin cam elyaf-polyester reçineli kompozit malzemelerle göre daha yüksek dayanım ve daha düşük aşınma gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Genel olarak, uygulanan yükün ve kayma mesafesinin artmasıyla birlikte ağırlık kaybının arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında kayma mesafesi artışının malzeme kaybında daha az etkili olduğu rapor edilmiştir.

Asi (2008), dokuma ve örme kumaş şeklindeki cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Kompozit malzemelerin aşınma testleri, blok-bilezik test metodu kullanılarak çeşitli yük ve kayma hızlarında yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde artan uygulama yükü ve hız değerleriyle birlikte kompozit malzemelerin aşınma kaybının arttığı bulunmuştur. Aşınma performansları mukayeseli olarak incelendiğinde dokuma cam elyaf katkılı epoksi kompozitinin aşınma dayanımının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Uygulama yükleri ve hızın arttığı durumlarda termal etki sonucu aşınan yüzeylerde yanmış aşınma artıkları (epoksi reçine) meydana gelmiştir.

Yılmaz (2013), farklı örgü açısına göre üretilmiş cam elyaf ile karbon elyaflardan oluşan epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerin kuru ortamdaki aşınma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deneyler disk üzerinde blok (block on roller) yöntemiyle kuru kayma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde kompozit malzemelerin aşınma performansı, uygulanan yük, kayma hızı, aşındırıcı disk yüzey pürüzlülüğü ve kayma mesafesi gibi parametrelere bağlı olduğu görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin, tüm kayma mesafelerinde her bir deney parametresi kombinasyonu için aşınma performansı, cam elyaf takviyesi içeren kompozit malzemelere göre çok daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bunun yanında adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarının olduğu rapor edilmiştir.

Özsoy (2015), kırpıntı ve elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozitler üreterek, bu malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma matrisi olarak epoksi kullanılırken, takviye malzemesi olarak; cam elyaf, karbon elyaf, hindistan cevizi kabuğu lifi, bambu ve keten iplik kullanılarak farklı deney numuneleri oluşturulmuştur. Aşınma deneyleri pim disk deney düzeneği kullanılarak normal oda koşulları altında ve kuru deney şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranları saf epoksinin de altında olmakla birlikte karbon kırpıntı takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Deneylerde aşınma mekanizması olarak adhezif ve abrasif aşınma etkin olmuştur. Oluşan bu iki aşınma mekanizmasının tesiriyle toz şeklinde aşınma kalıntıları meydana gelmiş ve bu kalıntılar, koruyucu bir tabaka etkisi göstermiştir. Tribolojik deneyler sırasında oluşan sıcaklık değişimlerinin epoksinin camsı geçiş sıcaklığının altında olduğu ve bu nedenle kompozitlerin iç yapılarının etkilenmediği rapor edilmiştir. Diğer tüm parametreler sabit tutulup kayma hızının aşınmaya etkisi incelendiğinde, hızın artmasıyla ağırlık kaybında azalma yaşanmıştır. Bu durumun oluşmasına, farklı yük değerinin uygulanmasının ve aşındırıcının zamanla değişen pürüzlülüğünün aşınma mekanizması üzerinde yaptığı etkilerden kaynaklandığı belirtilmiştir. Aşınma genel olarak elyaf takviyesinden ziyade matris malzemesinde meydana gelmiştir.

Basavarajappa vd. (2009), cam elyaf epoksi kompozitine grafit katkısının aşınma dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri pin on disc deney prensibine göre; farklı yük, kayma hızı ve kayma mesafesi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, grafit katkılı cam elyaf epoksi kompozitinin daha düşük oranda malzeme kaybı yaşadığı görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde, özellikle yüksek yük değerlerinde çelik aşındırıcının elyaf ile teması sonucu kırılmalar ve artık malzemeler oluşmuştur. Elyaf matrisinde aşınmanın etkisiyle elyafların boyuna ve enine yönde bağ açılımı gözlemlenmiştir.

Harsha ve Jha (2008), yapmış oldukları deneylerde ilk olarak saf epoksinin erozyon davranışını ortaya koymuşlardır. Akabinde de tek yönlü cam elyaf takviyeli ve tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin durumlarını irdelemişlerdir. Bu incelenen durumlara ek olarak çift yönlü E-cam dokuma takviyeli epoksi kompozit malzemelerin de erozyon aşınma dirençlerini netliğe kavuşturmuşlardır. Nihai olarak çift yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin tek yönlü camelyaf takviyeli epoksi kompozitlerden daha iyi erozif aşınma direnci gösterdiğini bulmuşlardır. Bu durum çift yönlü olan kompozit malzemelerin daha fazla çarpma enerjisini absorbe etmesi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca epoksi ve kompozitlerinin yaygın olarak yarı sünek erozyon davranışı sergilediği sonucuna varılmıştır.

Srivastava (2006), E-cam fiber takviyeli epoksi reçine (GF/EP) kompozitlerin 30° ve 90° çarpma açıları ile üç farklı hız bileşenindeki (24, 35 ve 52 m.s⁻¹) duruma ait erozyon aşınmasına bakmıştır. 150–250 µm nominal çapa sahip silis kumu aşındırıcı partikül parçası niyetinde kullanılmıştır. Dolgu maddesi (2 g buğday nişastası) ilave edilerek oluşturulan kompozit malzemelerde en düşük erozyon oranı değeri elde edilmiştir. Saf haldeki yani herhangi bir dolgu maddesi bulunmayan epoksi malzemelerde ise, zayıf bağ kuvvetlerinden dolayı en yüksek erozyon oranı değerleri elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Korozyon deneylerinde katodik ark PVD yöntemiyle; TiN, AlTiN ve ZrN kaplanan AZ91 magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde ise dört ayrı malzeme kullanılmıştır. Bunlar; cam takviyeli plakalı epoksi kompoziti, Etial 150 alüminyum alaşımı, AZ91 magnezyum alaşımı ve oksidasyona (MgO) uğramış AZ91 magnezyum alaşımıdır. Aşınma deneylerinde epoksi polimer matrisli kompoziti ve alüminyum-silisyum alaşımı malzemelerinin tercih edilmesindeki amaç, sahip oldukları düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanımı özellikleri nedeniyle bu malzemelerin, AZ91 Mg alaşımına otomotiv, havacılık vb. alanlarda muadil olarak kullanılabilmesidir. AZ91 Mg alaşımına Magnezyum Oksit'li (MgO) AZ91 magnezyum alaşımının oluşturulabilmesi amacıyla deney numuneleri, atmosferik ortamda ve oda sıcaklığı şartlarında yaklaşık bir yıl süreyle bekletilerek oksidasyona uğratılmış ve yüzeyde MgO oluşumu elde edilmiştir. Çizelge 3.1., Çizelge 3.2., ve Çizelge 3.3' de sırasıyla aşınma deneylerinde kullanılan Mg alaşımının, Al alaşımının ve epoksinin kimyasal içerikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. AZ91 magnezyum alaşımının kimyasal içeriği (%)

Al	Zn	Mn	Mg
9.28	0.78	0.18	Kalanı

Çizelge 3.2. Etial 150 alüminyum alaşımının kimyasal içeriği (%)

Cu	Si	Fe	Zn	Mn	Mg	Ni	Ti	Sn	Pb	Al
1.75-2.5	11-13	1	0.7	0.5	0.1	0.3	0.15	0.1	0.1	Kalanı

Çizelge 3.3. FR-4 cam takviyeli plakalı epoksinin kimyasal içeriği (%)

Cam takviyesi	Epoksi
%56	%44

Deneylerde kullanılan AZ91 magnezyum alaşımının, yoğunluğu 1,7 g/cm³, sertlik değeri ortalama 60 HB (63 HV), çekme dayanımı 156,06 MPa, Etial 150 alüminyum alaşımının yoğunluğu 2,71 g/cm³, sertlik değeri ise yaklaşık 75HB (79 HV), çekme dayanımı, yaklaşık 198 MPa (Yalçın vd., 2012; Yalçın vd., 2017) ve ticari olarak temin edilen FR-4 cam takviyeli plakalı epoksinin yoğunluğu 1,85 g/cm³, sertlik değeri ortalama 115 HRM, çekme dayanımı 260 MPa dır (Makeitform, 2015).



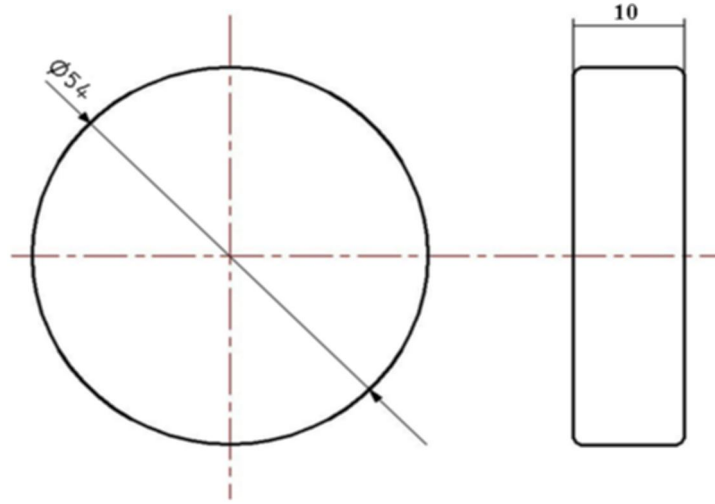
Şekil 3.1. Aşınma ve korozyon deney numunelerinin talaşlı imalat yoluyla elde edildiği ilk numuneler, a) AZ 91 Mg alaşımı, b) Etial 150 Al alaşımı, c) FR-4 cam takviyeli plakalı epoksi malzeme

3.2. Yöntem

3.2.1. AZ91 magnezyum alaşımı deney numunelerinin ark PVD kaplanması

Çizelge 3.1' de kimyasal içeriği verilen ve basınçlı döküm yöntemiyle üretilen AZ91 magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Kaplama İşlemi: Tedarik edilen boru kütük geometrisindeki AZ91 Magnezyum alaşımı malzemeleri, halihazır durumda deney yapılmaya uygun olmadığı için talaşlı işlemeye tabi tutularak Şekil 3.2' deki gibi disk haline getirilmiştir.

Geometrik olarak ölçülendirilen deney malzemeleri kaplama öncesi parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu amaçla; steril hale getirilen deney malzemeleri yüzeylerine SiC zımpara ile kaba zımparalama yapılmıştır. Daha sonra ise yüzeyindeki çiziklerin alnıp pürüzsüz hale getirilmesi amacıyla hassas yumuşaklıktaki polisaj bezi ve fırçası ile ince parlatma yapılmıştır.



Şekil 3.2. Korozyon deney numunesinin geometrisi

Yüzeyleri parlatılan ve kaplamaya uygun hale getirilen disk şeklindeki AZ91 magnezyum alaşımı numunelerinin yüzeyleri arkPVD yöntemi ile; TiN, AlTiN ve ZrN seramik film kaplamalar ile kaplanmıştır. Kaplama işlemleri, İonbond Tinkap firmasında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Ark PVD kaplama ünitesi

Yüzey kaplama işlemleri için, öncelikli olarak her kaplama türü için optimum kaplama parametresi belirlenmiştir. Optimum kaplama koşullarının belirlenmesinde daha önce yapılmış benzer çalışmalar incelenerek, kaplama parametresi değerleri referans alınmıştır. Kplama proseslerinde uygulanan tüm kaplama koşulları Çizelge 3.4 'de verilmiştir.

Çizelge 3.4' de görüleceği üzere, 1-4-7 nolu parametreler TiN, AlTiN ve ZrN kaplama türlerinden her biri için optimum kaplama koşulunu teşkil etmektedir. 2-5-8 nolu parametrelerde; optimum değerler sabit tutulurken sadece "BİAS" voltajı değeri değiştirilmiştir. Bu kaplamalarda ulaşmak istenen temel hedef, kaplama esnasında uygulanan farklı BIAS voltajı değerinin korozyona etkisinin incelenmesi olmuştur. 3-6-9 nolu parametrelerde ise; yine tüm optimum değerler sabit tutulurken sadece "tutma süresi" değiştirilmiştir. Bu kaplamalarda ulaşmak isteden temel hedef ise, kaplama prosesinde uygulanan farklı tutma tutma süresinin değerinin korozyona etkisinin incelenmesi olmuştur.

Çizelge 3.4. Kplama parametreleri

NUMUNE TÜRÜ	KAPLAMA	TUTMA SICAKLIĞI (°C)	BİAS GERİLİMİ (V)	TUTMA SÜRESİ (dk)
1	TiN	200 (optimum)	150 (optimum)	20 (optimum)
2	TiN	200	200	20
3	TiN	200	150	30
4	AlTiN	200 (optimum)	200 (optimum)	20 (optimum)
5	AlTiN	200	250	20
6	AlTiN	200	200	30
7	ZrN	200 (optimum)	250 (optimum)	20 (optimum)
8	ZrN	200	300	20
9	ZrN	200	250	30

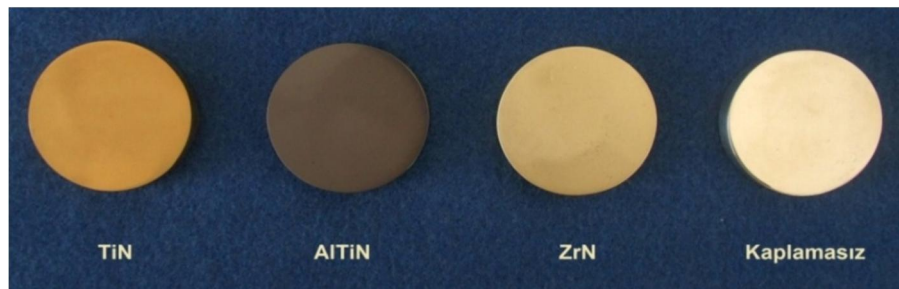
TiN ile yapılan kaplamada katot akımı 55 amper olarak uygulanırken, kaplama esnasında oluşan vakum basıncı 4 torr olarak ölçülmüştür. Buharlaşacak kaplama malzemesi olan TiN katot, kaplanacak AZ91 mg alaşımı ise anot davranacak şekilde birbiri arasında 14 cm 'lik mesafede tertibatlandırılmıştır. Bu şartlarda 20 ve 30 dk sürelerde kaplanan TiN kaplamanın tabaka kalınlığı

tahminen 1 mikron düzeyindedir. AlTiN ile yapılan kaplamada katot akımı 40 amper olarak uygulanırken, kaplama esnasında oluşan vakum basıncı 8 torr olarak ölçülmüştür. Buharlaşacak kaplama malzemesi olan AlTiN katot, kaplanacak AZ91 mg alaşımı ise anot davranacak şekilde birbiri arasında 14 cm 'lik mesafede tertibatlandırılmıştır. Bu şartlarda 20 ve 30 dk sürelerde kaplanan AlTiN kaplamanın tabaka kalınlığı tahminen 1,3 mikron düzeyindedir. ZrN ile yapılan kaplamada katot akımı 55 amper olarak uygulanırken, kaplama esnasında oluşan vakum basıncı 8 torr olarak ölçülmüştür. Buharlaşacak kaplama malzemesi olan ZrN katot, kaplanacak AZ91 mg alaşımı ise anot davranacak şekilde birbiri arasında 14 cm 'lik mesafede tertibatlandırılmıştır. Bu şartlarda 20 ve 30 dk sürelerde kaplanan ZrN kaplamanın tabaka kalınlığı tahminen 1,5 mikron düzeyindedir. Çizelge 3.5' de kaplama süresince her bir kaplama türü için saptanan teknik değerler verilmiştir

Çizelge 3.5. Kaplama proses parametreleri

Proses parametreleri	TiN	AlTiN	ZrN
Kaplama Öncesi Vakum Değeri (torr)	3×10^{-5}	3×10^{-5}	3×10^{-5}
Katot Akımı (A)	55	40	55
Vakum Basıncı (torr)	4	8	8
Hedef ve Taban Malzeme Arasındaki Uzaklık (cm)	14	14	14
İyon Bombardmanı Değeri (V)	1000	1000	1000
Taban Malzeme Sıcaklığı (°C)	202-206	185	188-203

Kaplama düzeneğindeki katot spotlarının arkasında, damlacık (droplet) oluşumunu önlemek amacıyla kuvvetli mıknatıslar bulundurmaktadır. Bu sayede yapılacak kaplamalarda gözeneksiz bir yapının sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 3.4. Yüzey film kaplaması kapılan AZ91 Mg alaşımı deney malzemeleri

Korozyon deneyi gerçekleştirilecek olan ve yüzeyleri katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile TiN, AlTiN ve ZrN kaplanan AZ91 Mg alaşımı deney malzemelerinin kaplama sonrası görünüşleri Şekil 3.4' teki gibidir.

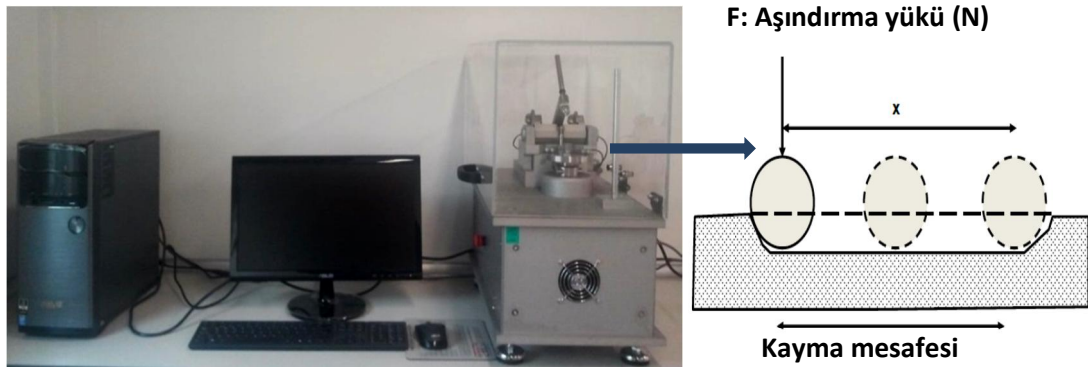
Kaplamalı AZ91 Mg Alaşımının Sertlik Ölçümü: Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yüzeyleri nitrür kaplamalar ile kaplanan AZ91 Mg alaşımının mikrosertlik ölçümleri, Bursa Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan, Qness marka sertlik cihaz kullanılarak Vickers (HV) cinsinden ölçülmüştür (Şekil 3.5). Sertlik ölçümü, elmas bir batıcı uc ile 0,5 N yük 20 sn süre ile uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Sertlik deney cihazı

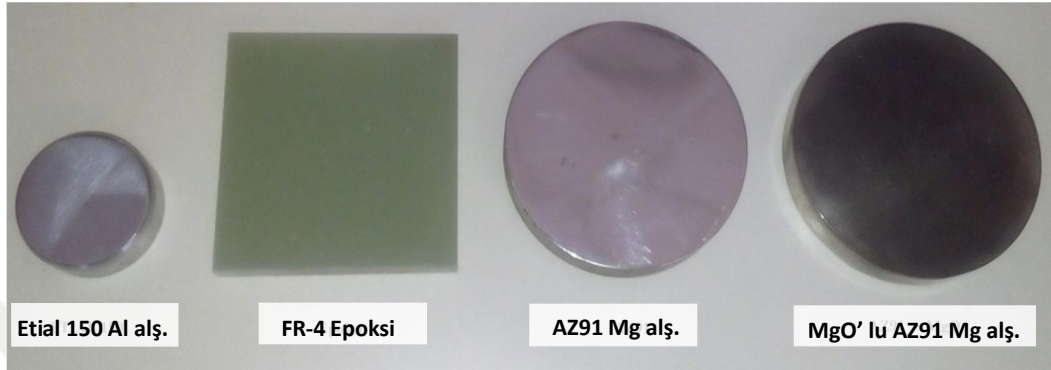
3.3. Aşınma Deneyleri

AZ91 magnezyum alaşımı, ETIAL 150 alüminyum alaşımı ve FR-4 cam takviyeli plakalı epoksi malzemelerinin tribolojik davranışlarını belirlemek için, Karabük Üniversitesi Triboloji Laboratuvarı'nda bulunan Uts Tribometer T20 marka lineer aşınma test cihazı (reciprotating wear tester) kullanılmıştır.



Şekil 3.6. UTS Tribometer T20 marka lineer aşınma test cihazı ve aşındırma prensibi

Aşınma deneyleri, kuru ortamda ve atmosfer şartlarında ve ASTM G-133 test standartında göre yapılmıştır (Şekil 3.6). İleri-geri lineer aşınma deneylerinde, aşındırıcı bilya olarak, 6mm çapında ve 60 HRC sertliğinde AISI 52100 çelik bilya kullanılmıştır. Karşıt hareket genliği 5mm olup, aşındırıcı frekansı 5 Hz' dir. Aşınma deneyine tabi tutulan deney numuneleri Şekil 3.7' de verilmiştir.



Şekil 3.7. Aşınma deney numuneleri

Yapılan literatür incelemesi göz önünde bulundurularak, aşınma deney parametreleri, üç farklı yük değeri, üç farklı kayma hızı ve üç farklı kayma mesafesi olarak belirlenmiş olup aşınma deney parametreleri Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Aşınma deney parametreleri

Deney parametreleri	Seviye		
Yük(N)	10	20	30
Hız (m/sn)	0.1	0.4	0.75
Kayma Mesafesi (m)	500	1000	2000

AZ91 magnezyum alaşımı, FR-4 cam takviyeli epoksi, Etial 150 alüminyum alaşımı ve MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımı deney malzemelerinden her biri için dokuz adet aşınma test parametresi oluşturulmuştur (Çizelge 3.7.). Benzer prensiple her bir alaşım için dokuz adet, toplamda ise 36 adet aşınma deneyi yapılmıştır.

Çizelge 3.7. Aşınma deney planı

Deney No	Deney Parametreleri		
	Yük (N)	Hız (m/sn)	Mesafe (m)
1	10	0.1	500
2	10	0.4	1000
3	10	0.75	2000
4	20	0.1	500
5	20	0.4	1000
6	20	0.75	2000
7	30	0.1	500
8	30	0.4	1000
9	30	0.75	2000

Aşınma deneylerinin ardından, her bir numune üzerindeki aşınma iz, genişlik ve derinlik değerleri profilometre vasıtasıyla ölçülürken, aşınan yüzeylerin karakterizasyonunu inceleyebilmek amacıyla, Nikon marka optik mikroskop kullanılarak görüntüleme yapılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Aşınan yüzeyleri incelemede kullanılan optik mikroskop

3.4. Korozyon Deneyleri

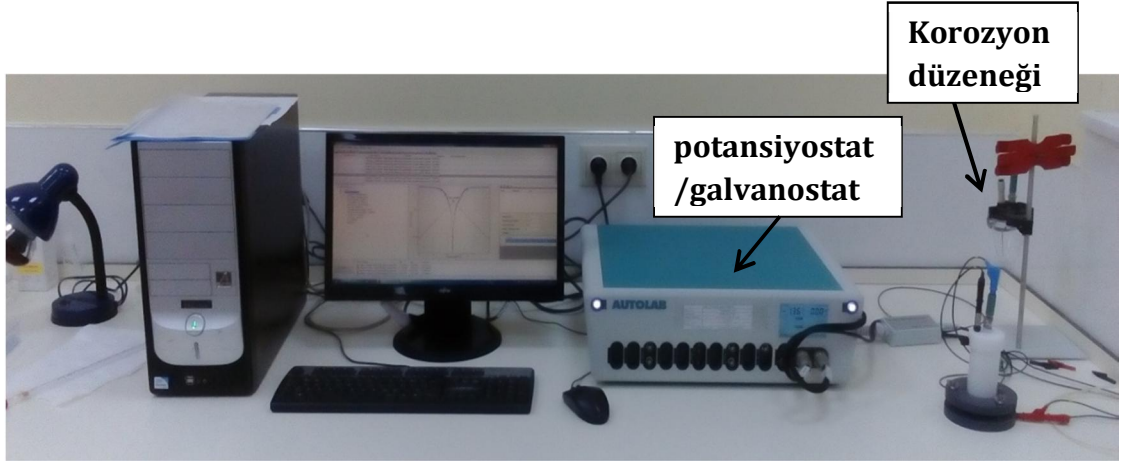
Tüm korozyon deneyleri, oda sıcaklığında ve elektrokimyasal korozyon deneyleri olarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon hücresi 4 cm çap ve 12 cm yüksekliğinde silindirik geometride, korozyona karşı duyarsız ve elektriksel bakımdan yalıtkan olan polimer malzemeden imal edilmiştir. Referans elektrot (RE) olarak doygun gümüş klorür (Ag/AgCl), karşıt elektrot (CE) olarak doygun kalomel çubuk ve çalışma elektrodu (WE) olarak AZ91 Mg Alaşımı deney numuneleri olmak üzere üçlü elektrot tekniği kullanılmıştır. Korozyon hızı değerlerinin ölçülmesinde, “Tafel Polarizasyonu Tekniği” kullanılmıştır. Elektrokimyasal korozyon deney parametreleri, Çizelge 3.8’ de tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.8. Korozyon deney parametreleri

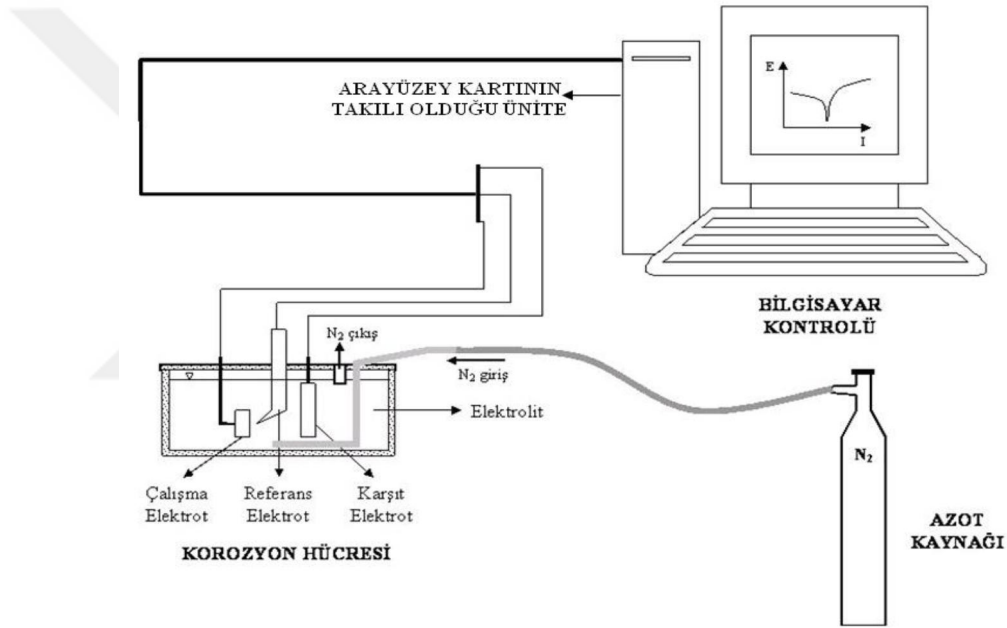
Solüsyon	Na ₂ SO ₄
Konstantrasyon(%)	3
Referans Elektrot	Gümüş Klorür (Ag; AgCl)
Karşıt Elektrot	Doygun Kalomel
Çözelti miktarı(ml)	50
Tarama Hızı (mV/s)	1
Polarizasyon Başlama Yönü (mV)	Anodik (Kararlı potansiyel değerinin - 300mV aşağısından)
PH Değeri	6-7

Elektrokimyasal korozyon deneyleri, Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi (DEFAM) laboratuvarları bünyesinde bulunan, AUTOLAB marka potansiyostat/galvanostat cihazı (Şekil 3.9) kullanılarak yapılmıştır. Elektrokimyasal korozyon deneyleri boyunca korozyon sistemine uygulanacak polarizasyon başlama potansiyeli ve tarama değerleri pratik bir şekilde potansiyostat/galvanostat cihazı yardımıyla ayarlanabilmektedir. Ayrıca düzeneğe bağlı bilgisayar vasıtasıyla, uygulanan potansiyele karşılık ölçülen akım değerleri kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Elektrokimyasal korozyon ölçüm prensibi Şekil 3.10’ da verilmiştir.

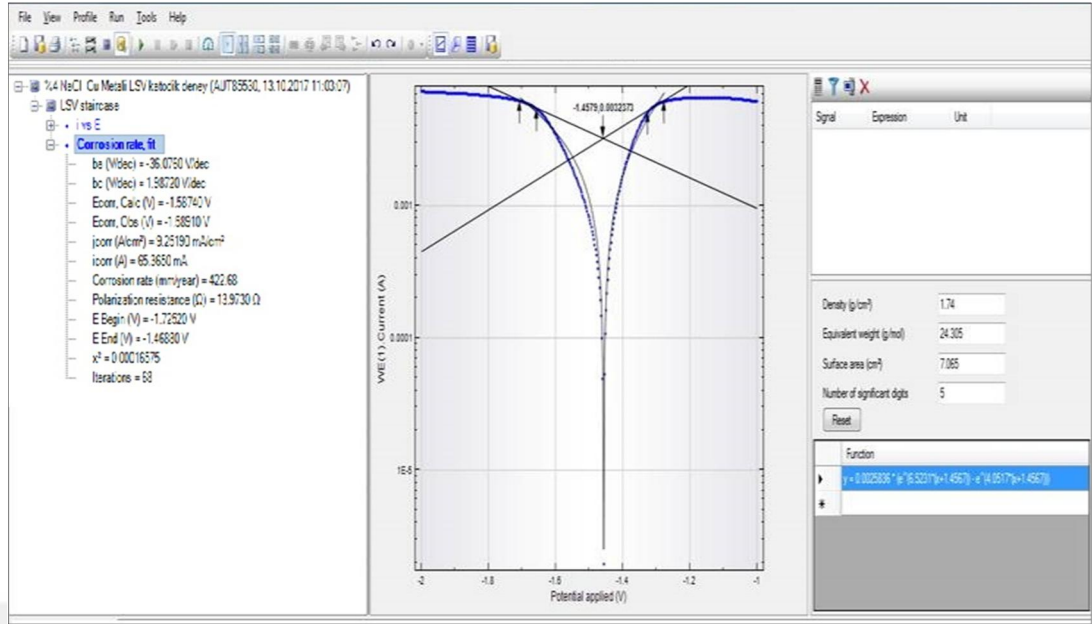


Şekil 3.9. Korozyon verilerinin alındığı potansiyostat/galvanostat cihazı ve deney düzeneği



Şekil 3.10. Elektrokimyasal korozyon ölçüm prensibi (Kalaycı, 2013)

Kaplanmış ve kaplanmamış AZ91 magnezyum alaşımlarında elektrokimyasal korozyon deneyleri, %3 konsantrasyonundaki sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi içerisinde yapılmıştır. Bu konsantrasyondaki çözelti, oda sıcaklığında hazırlanıp muhafaza edilerek, kaplanmış ve kaplanmamış AZ91 magnezyum alaşımı deney numunelerinin korozyon davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, korozyon deney tertibatında çalışma elektrodu (WE) olarak kullanılan magnezyum alaşımının bir yüzeyi, DEFAM laboratuvarları bünyesinde bulunan özel bir düzenek vasıtasıyla, 7,065 mm²'lik bir yüzey alanı çözelti ile temas ettirilecek şekilde tertibatlandırılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.12. Deney cihazıyla yapılan örnek bir çalışmaya ait polarizasyon diyagramı

Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile yapılan korozyon deneyleri neticesinde korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) belirlenmiştir. Burada, korozyon akım yoğunluğu korozyon direncinin bir ifadesidir. Verilerin elde edilmesiyle birlikte, deney numunelerinin açık devre potansiyelleri ve daha sonrasında korozyona uğrama hızlarının karşılaştırılabilmesi uygun hale gelmiştir.



Şekil 3.13. Kaplamalı numunelerin görüntülendiği SEM cihazı

Ayrıca, yüzeyi sert film kaplı ve kaplamasız numunelerin elektrokimyasal korozyon deneylerinden öncesi ve sonrası yüzey görünümleri, her korozyon

deneyinden sonra numunelerin korozyona uğramış bölgelerinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntü alınmıştır. SEM analizleri, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan SUPRA 40VP marka SEM mikroskobu kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.13).



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

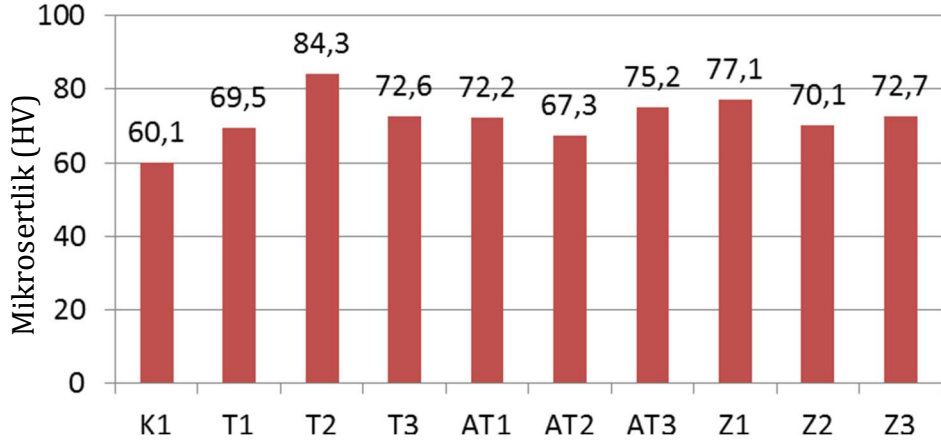
4.1. Seramik Film Kaplamaların Tabaka Kalınlığı ve Mikrosertlikleri

Kaplama parametreleri yapılan literatür çalışması sonrası belirlenmiştir. Farklı kaplama türü ve parametrelerinin korozyona etkisinin daha kolay mukayese edilebilmesi amacıyla, her korozyon deneyi için kod verilmiştir. Kodların başında yer alan harfler malzemenin kaplama türünü belirtmektedir. (Çizelge 4.1.)

Çizelge 4.1. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin kodlanması

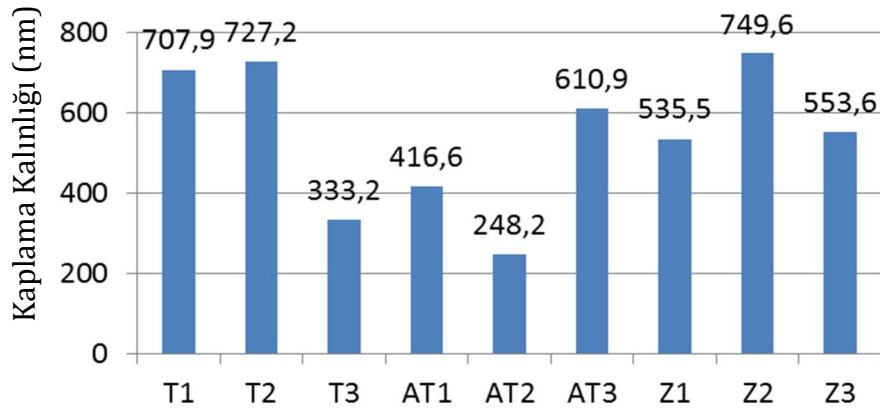
Kaplama parametresi Kodu	Kaplama türü	Tutma sıcaklığı (°C)	Bias voltajı (V)	Tutma süresi (Dakika)
T1	TiN	200	150	20
T2	TiN	200	200	20
T3	TiN	200	150	30
AT1	AlTiN	200	200	20
AT2	AlTiN	200	250	20
AT3	AlTiN	200	200	30
Z1	ZrN	200	250	20
Z2	ZrN	200	300	20
Z3	ZrN	200	250	30
K1	Kaplamasız AZ91	-	-	-

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda AZ91 Mg alaşımı üzerine yapılan TiN, AlTiN ve ZrN kaplamaların altlık yüzeye göre mikrosertlik değerleri Şekil 4.1' de ve tabaka kalınlığı ölçümleri ise Şekil 4.2' de verilmiştir. Şekil 4.1' e göre TiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımında 84,3 HV mikrosertlik (T2) elde edilirken, en düşük mikrosertlik değeri ise AlTiN kaplı numunede (AT2) gözlemlenmiştir. ZrN kaplı magnezyumda ise 77,1 HV mikrosertlik değeri ölçülmüştür.



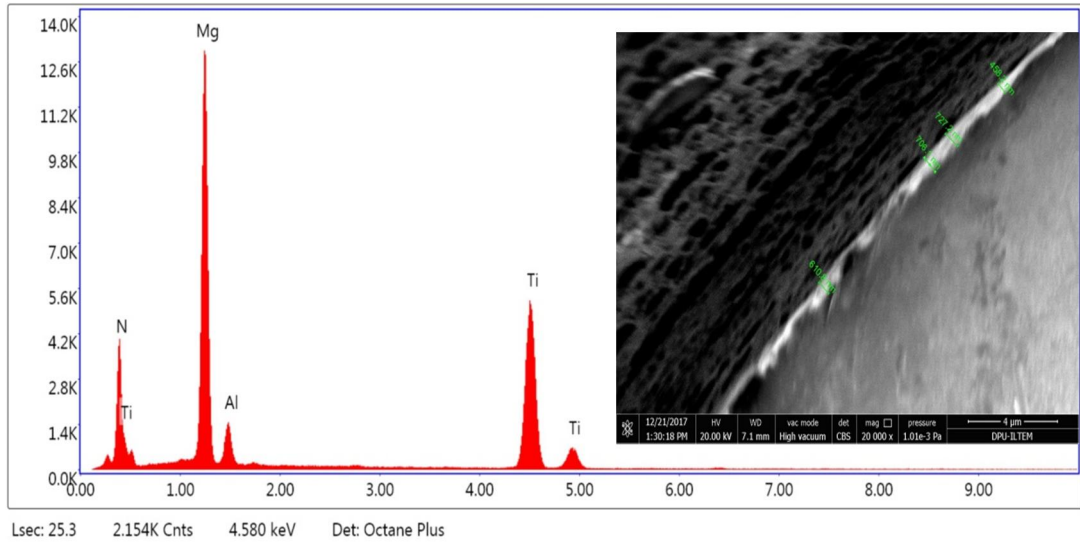
Şekil 4.1. Seramik film kaplamalı numunelerin mikrosertlikleri

TiN kaplamada, bias voltajının 150 V' tan 200 V' a artması ve tutma süresi 20 dakika olması durumunda mikrosertlik 69,5 HV' den 84,3 HV değerine artarken, AlTiN kaplamada bias voltajı 200 V' tan 250 V' a artması ile mikrosertlik değeri 77,2 HV' den 67,3 HV değerine düşmüştür. Dolayısıyla, AlTiN kaplamada bias voltajının mikro sertliğe olumsuz etkisi görülmüştür. Benzer olarak, ZrN kaplamada, Şekil 4.1' de görüleceği üzere bias voltajının mikrosertliğe etkisi olumsuz yönde olmuştur (Z1 ve Z2). Ayrıca, TiN kaplamada voltaj sabit tutma süresi 20 dakikadan 30 dakikaya artması durumunda, mikro sertlik %4,6 artarken (T1 ve T3), AlTiN kaplamanın mikrosertliğinde %10,5 artış (AT1 ve AT3) ve ZrN kaplamanın mikrosertliğinde ise %5,7 düşüş (Z1 ve Z3) görülmüştür. Ancak, seramik kaplamaların AZ91 magnezyum alaşımının mikrosertliğini etkili bir şekilde arttırmadığı ifade edilebilir.



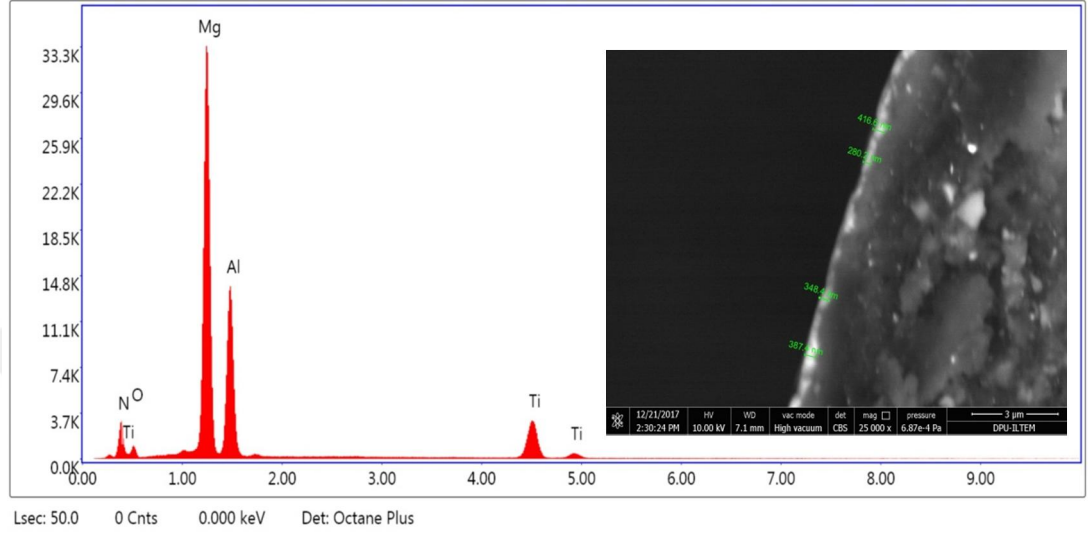
Şekil 4.2. Seramik film kaplamaların tabaka kalınlıkları (nanometre)

Tez çalışmamızın bu bölümünde, Şekil 4.2' de görülen kaplama tabaka kalınlığı ölçümleri, Dumlupınar Üniversitesi, İleri Teknoloji Tasarım Ar. Ge. ve Uygulama Merkezi Laboratuvarları bünyesinde bulunan, NOVANANOSEM 650 marka taramalı elektron mikroskobu ile ölçülmüştür. Ark PVD yöntemiyle kaplanmış her bir deney numunesine öncelikle hassas kesme yapılmış daha sonra da kesitlerinden alınan SEM görüntülerine bakılarak tabaka kalınlıkları tespit edilmiştir. Şekil 4.2' ye göre, en yüksek tabaka kalınlığı, 749,6 nm ile ZrN kaplamada, en düşük ise 248,2 nm ile AlTiN kaplamada görülmüştür. TiN kaplamada maksimum tabaka kalınlığı 727,2 nm ile tutma sıcaklığı 200 °C, tutma süresi 20 dakika ve 200 V bias voltajı ile elde edilmiştir. Şekil 4.2' de görüleceği üzere, altlık AZ91 magnezyum alaşımı üzerine en yüksek TiN birikimi T2 şartlarında, en yüksek AlTiN birikimi AT3 şartlarında ve ZrN birikimi ise Z2 şartlarında gerçekleşmiştir. En yüksek TiN kaplama kalınlığı ile en yüksek mikrosertlik değeri ve en düşük AlTiN kaplama kalınlığı ile en düşük mikrosertlik değeri arasında (oldukça) uyumluluk görülmüştür. Bununla birlikte, kaplama kalınlığı ölçümleri sırasında seramik film kaplamalar üzerinden EDX analizleri yapılmıştır. En iyi görüntüleme yapılan SEM ve EDX analiz sonuçları Şekil 4.3. ve Şekil 4.4. ve Şekil 4.5' de verilmiştir.

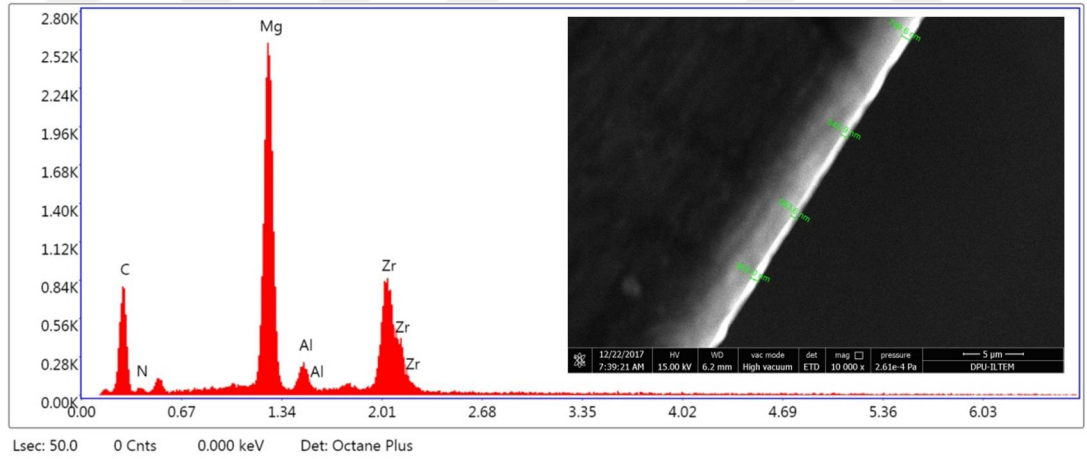


Şekil 4.3. TiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımının SEM ve EDX analizi

SEM görüntüsündeki beyaz katmanın TiN seramik film katmanı olduğu (T2) Şekil 4.3’ de görülmektedir. Buradaki Al içeriğinin, AZ91 magnezyum alaşımındaki içerikten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Benzer olarak, AlTiN kaplamanın SEM ve EDX görüntüsü Şekil 4.4’ de verilmiştir.



Şekil 4.4. AlTiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımın SEM ve EDX görüntüsü

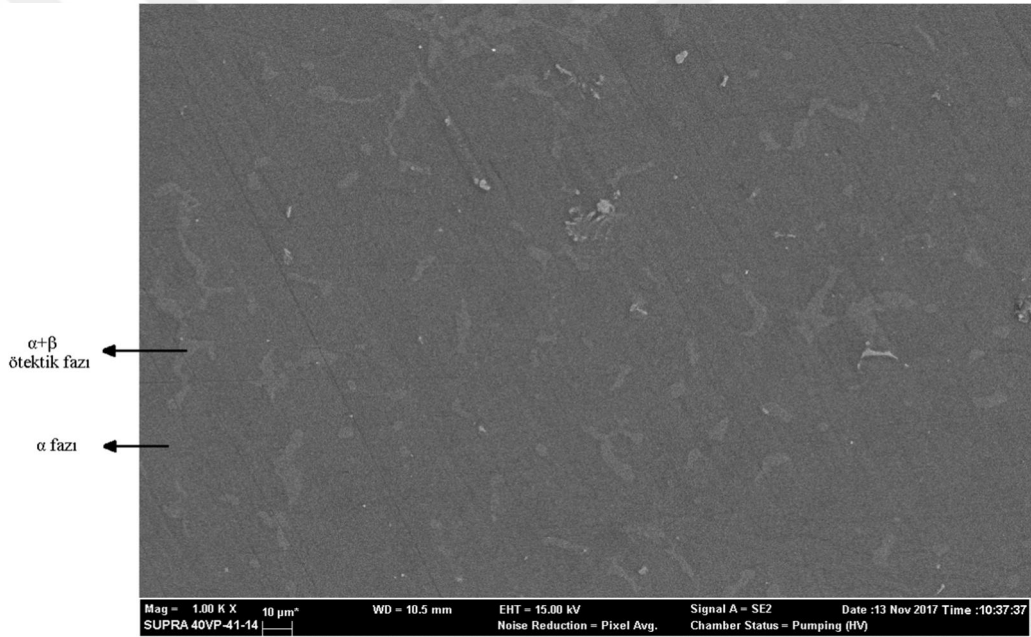


Şekil 4.5. ZrN kaplı AZ91 magnezyum alaşımın SEM ve EDX görüntüsü

Şekil 4.4. ve Şekil 4.5’ e göre, belirlenen ark PVD kaplama şartlarında (AT1 ve Z2) AlTiN ve ZrN tabakalarının nano düzeyde yüzeye biriktiği ortaya konulmuştur.

4.2. Korozyon Deney Sonuçları

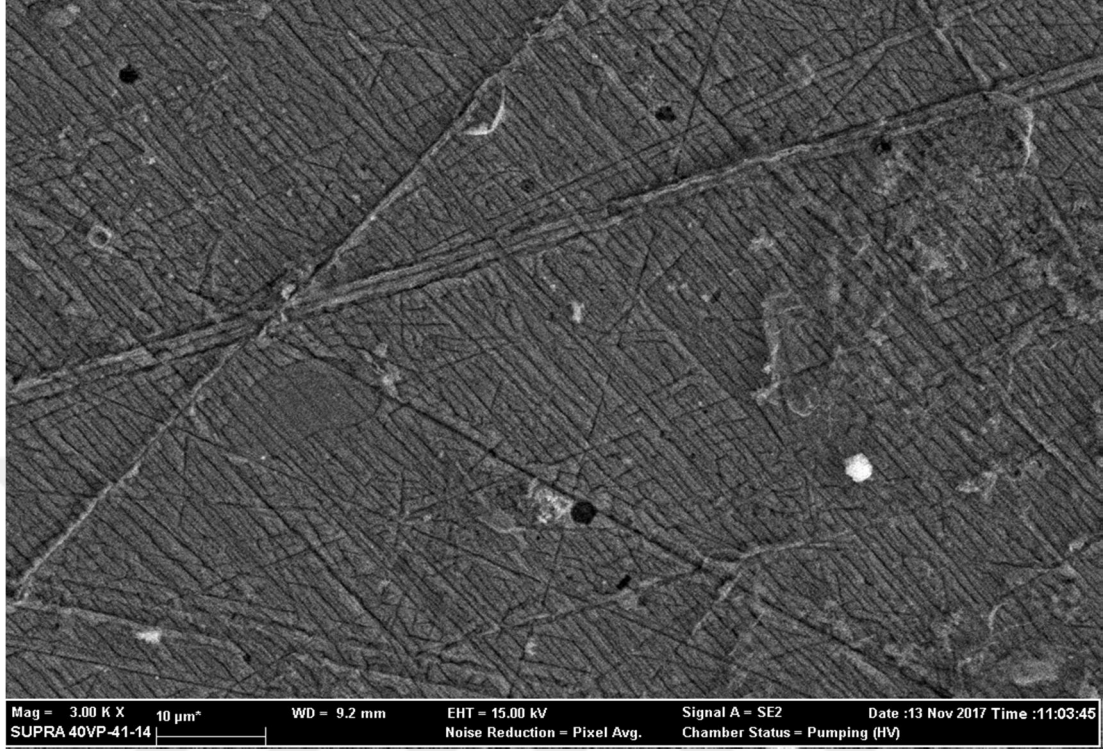
Bu aşamada, seramik film kaplamaların AZ91 magzenyum alaşımının korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu (korozyon direnci) üzerine etkisi yapılan bir dizi standart korozyon deneyleri ile belirlenmiştir. Ancak, korozyon deneylerine geçmeden önce, kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımı, TiN kaplı, AlTiN kaplı ve ZrN kaplı magnezyum alaşımının yüzey durumları SEM görüntüleme ile nitelendirilmeye çalışılmıştır. Buradan sonuçla, kaplamasız AZ91 magnezyum döküm alaşımının, mikroyapısının, esas alaşım elementi Mg içeren α -Mg matris fazından ve $\alpha+\beta$ ötektik fazı karışımından oluştuğu Şekil 4.6' da görülmektedir.



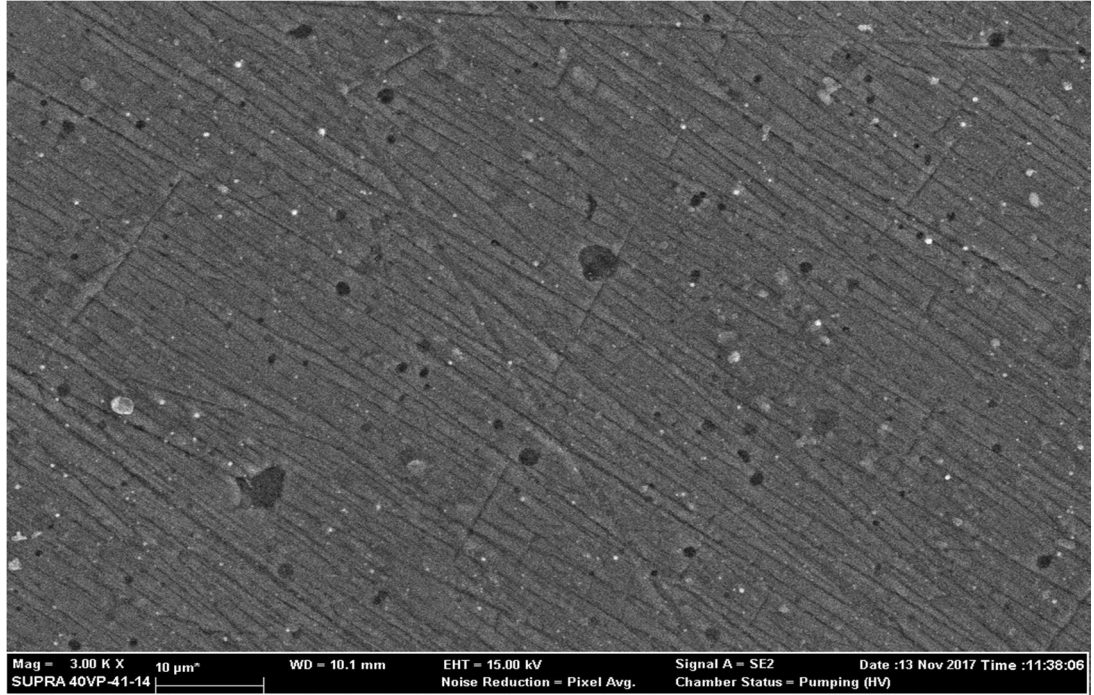
Şekil 4.6. Kaplamasız AZ91 Magnezyum alaşımına ait SEM görüntüsü

TiN, AlTiN ve ZrN kaplamalı numunelerin yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.7 – Şekil 4.9), kaplanan yüzeylerde yaklaşık 1 mikron mertebesinde gözeneklerin mevcut olduğu görülmektedir. Ayrıca, korozyon deneyi öncesi zımparalama ve parlatma yapıldığından yüzeyde nano düzeyde ince çizikler meydana gelmiştir. Bunun yanında, kaplamaların belli bölgelerinde mikroçatlaklar ve düzensizliklerin oluştuğu da gözlemlenmiştir. Kaplama prosesinden veya altlık malzemenin yapısından kaynaklanan bu kusurlar,

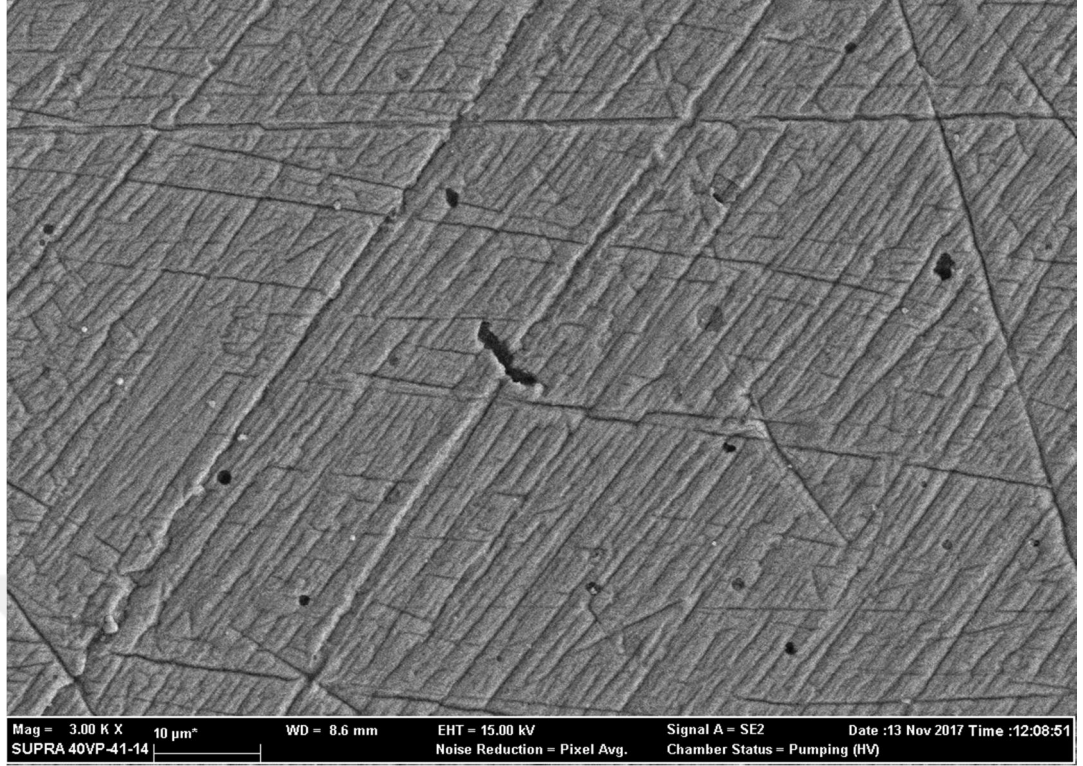
çözeltinin taban malzemesine ulaşmasını kolaylaştırarak, korozyon hızının artmasına neden olabileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.7. TiN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü

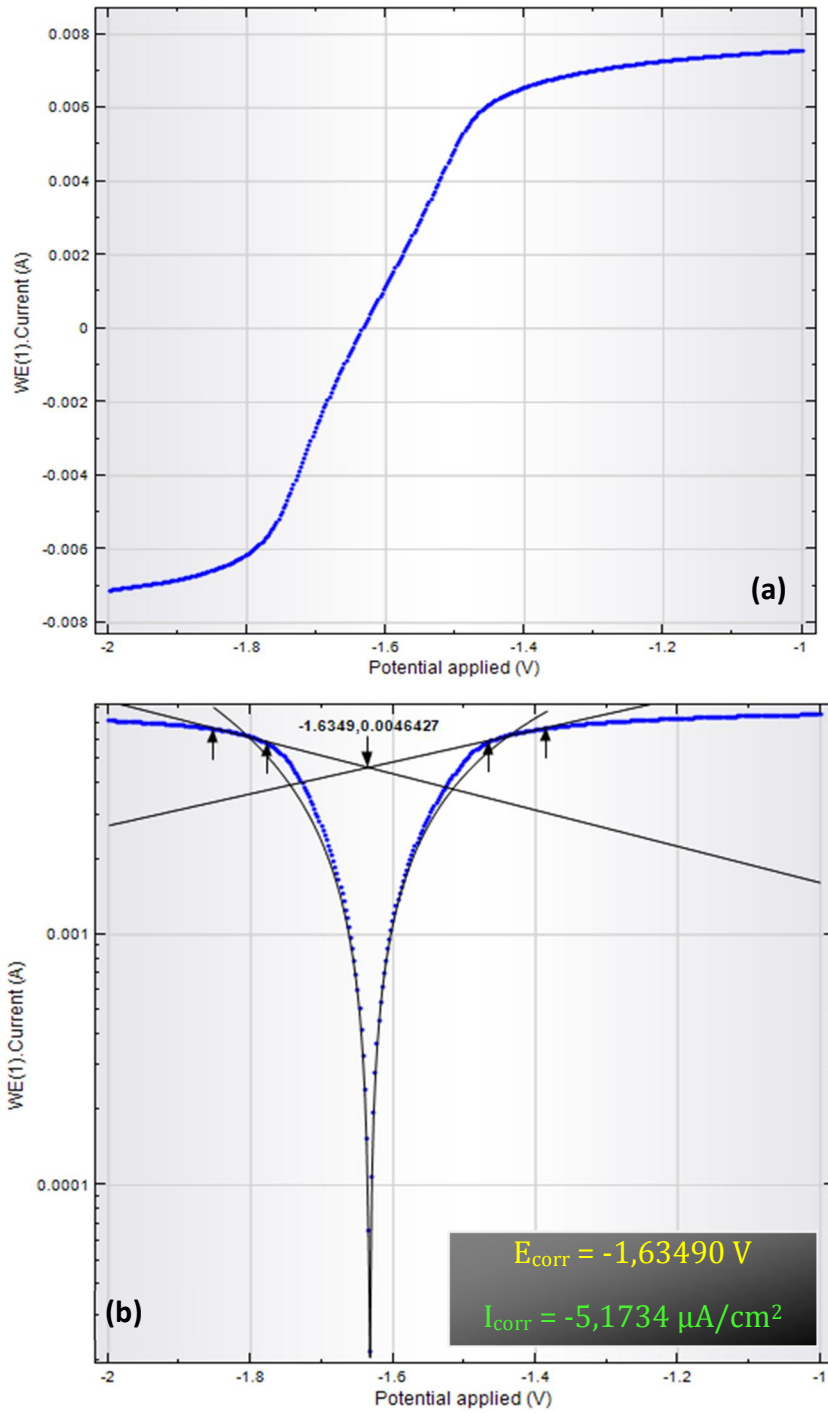


Şekil 4.8. AlTiN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü



Şekil 4.9. ZrN kaplama ile kaplanan alaşımların yüzeyinde bulunan hatalara ait SEM görüntüsü

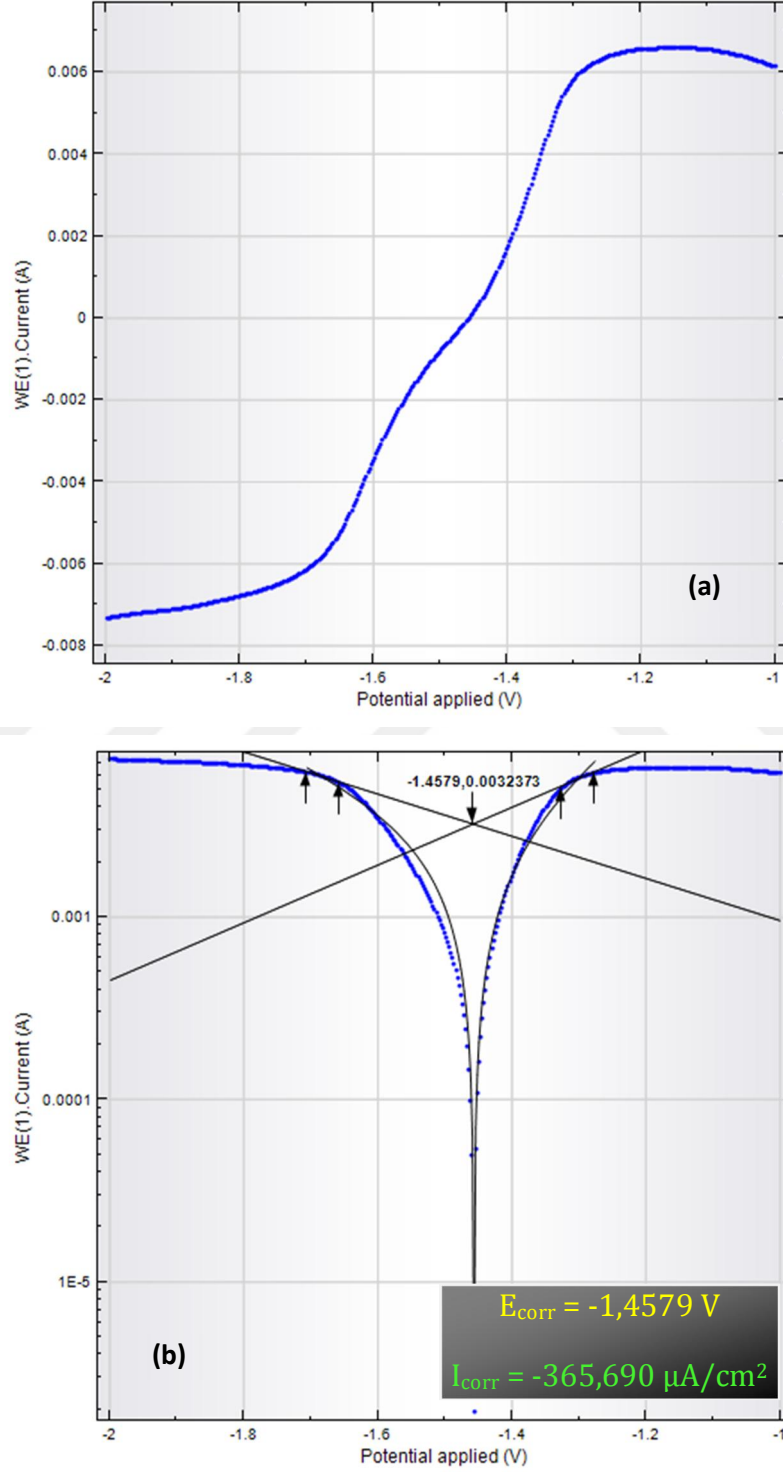
Yukarıdaki belirlemelerden sonra, seramik film kaplamaların Na_2SO_4 çözeltisi içerisindeki elektrokimyasal yöntem ile korozyon dirençleri belirlenmiştir. Ölçüm sırasında, numuneler çözelti içerisine konulduktan sonra azot(N_2) gazı verilerek oksijenden arıştırılmıştır. Daha sonra, iki dakika süreyle kararlı korozyon potansiyel değerine ulaşılan kadar beklenildikten sonra Şekil 4.10' da verilen korozyon potansiyeli grafiği elde edilmiştir. Kararlı korozyon potansiyel grafiği elde edildikten sonra deney standardına uygun olarak kararlı potansiyel değerinin yaklaşık 200 mV aşağısından katodik yönde akım uygulayarak Tafel eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen tafel eğrilerine teğet çizgiler (tafel extrapolasyon) çizilerek korozyon dirençleri yani akım yoğunluklukları belirlenmiştir. Kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımı için kararlı potansiyel grafiği ve tafel eğrisi Şekil 4.10' da verilmiştir. Şekil 4.10-b' ye göre, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon potansiyeli $E_{\text{corr}} = -1,63490 \text{ V}$ ve korozyon direnci $I_{\text{corr}} = -5,1734 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

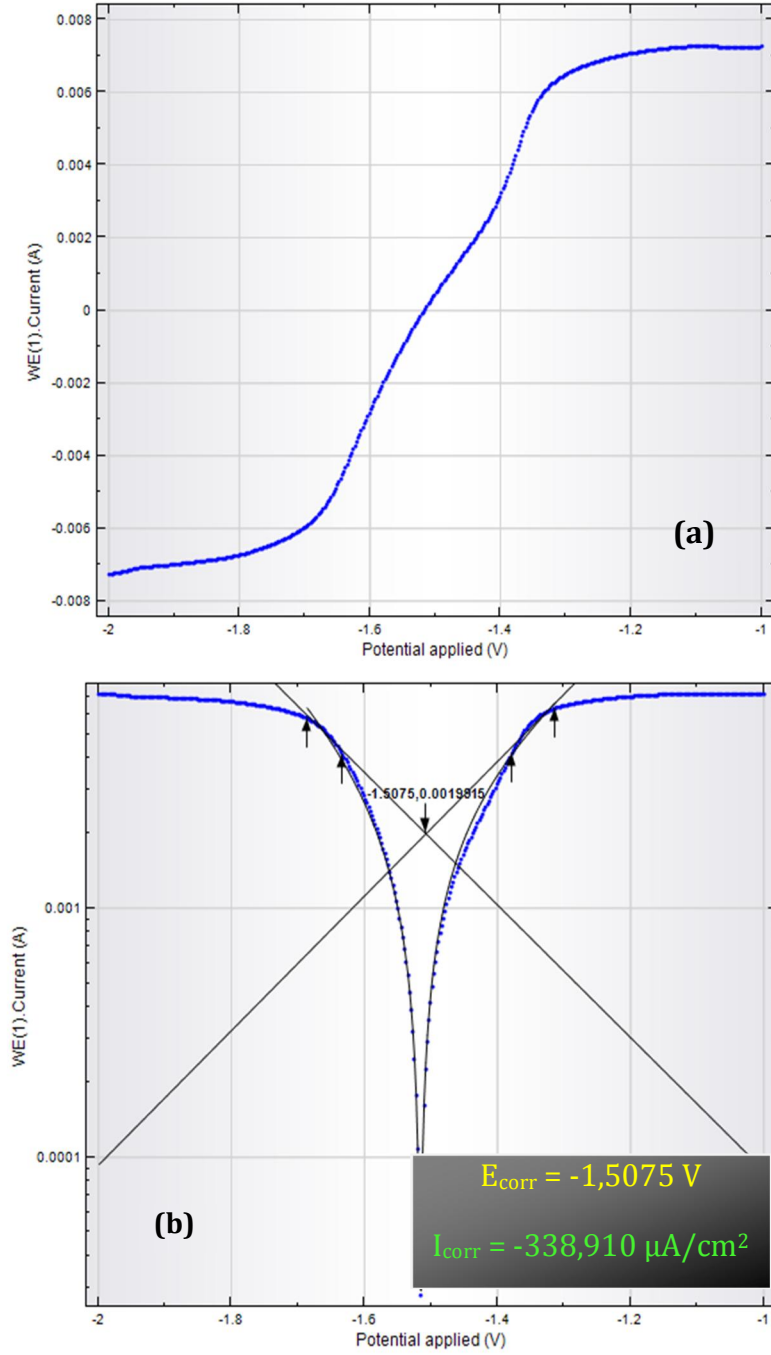
Şekil 4.11' de ise, en yüksek mikro sertliğe sahip (T1) TiN kaplamalı AZ91 magnezyum alaşımının kararlı potansiyel eğrisi ve tafel eğrisi verilmiştir. Şekil 4.11-b' ye göre, TiN kaplı magnezyum alaşımının korozyon potansiyeli değeri $E_{\text{corr}} = -1,4579 \text{ V}$ ve korozyon direnci $I_{\text{corr}} = -365,690 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak

ölçülmüştür. Bu sonuca göre, TiN seramik film kaplamanın korozyon direncinin, kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımına göre yaklaşık 70 kat daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.



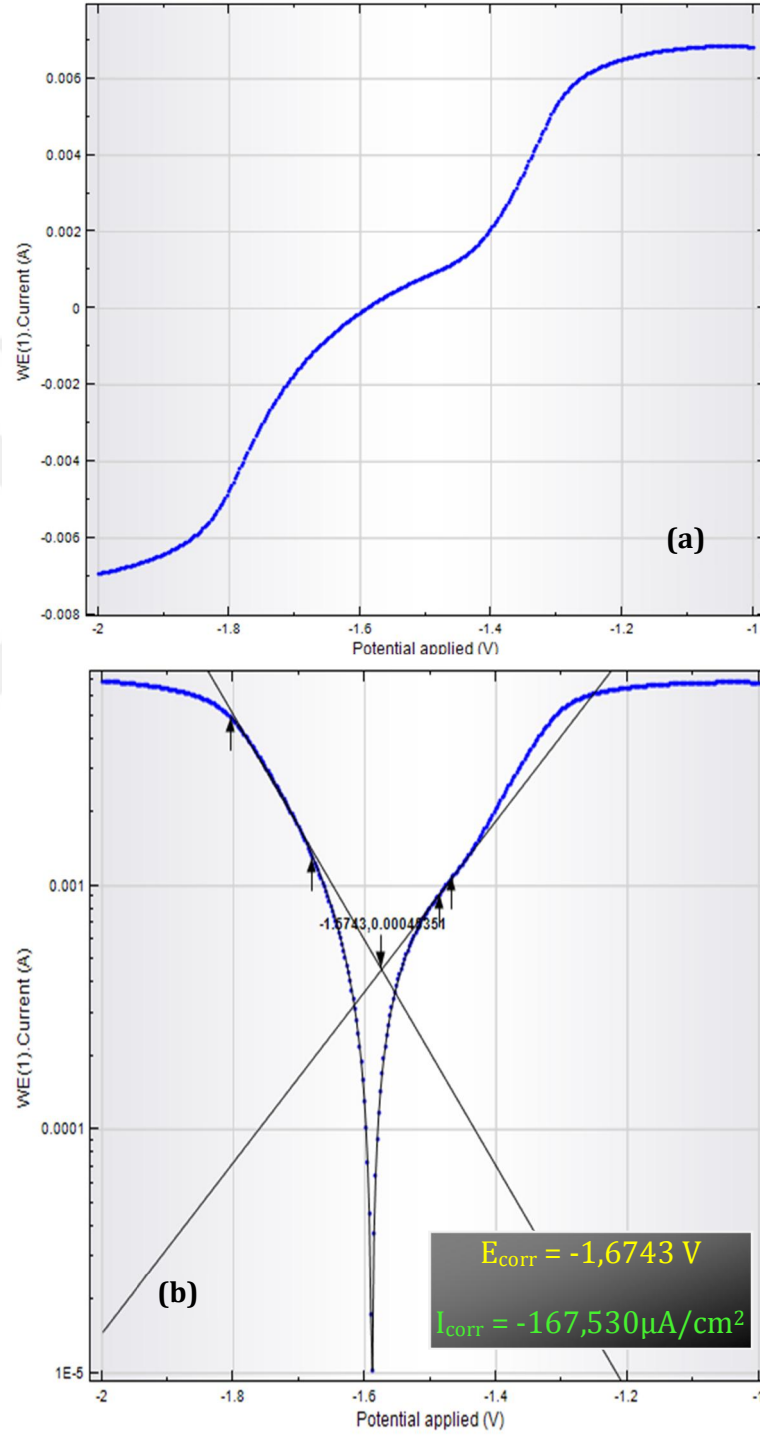
Şekil 4.11. T1 şartlarıyla TiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

Şekil 4.12' de, en yüksek sertliğe sahip AlTiN kaplanmış olan numunenin (AT3) korozyon potansiyeli ve korozyon direnci eğrileri verilmiştir. AlTiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direnci $-338,91 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür ve AT3 şartlarında yapılan bu kaplama tipinin korozyon direnci T1 şartlarında yapılan TiN kaplamaya göre %7,3 daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



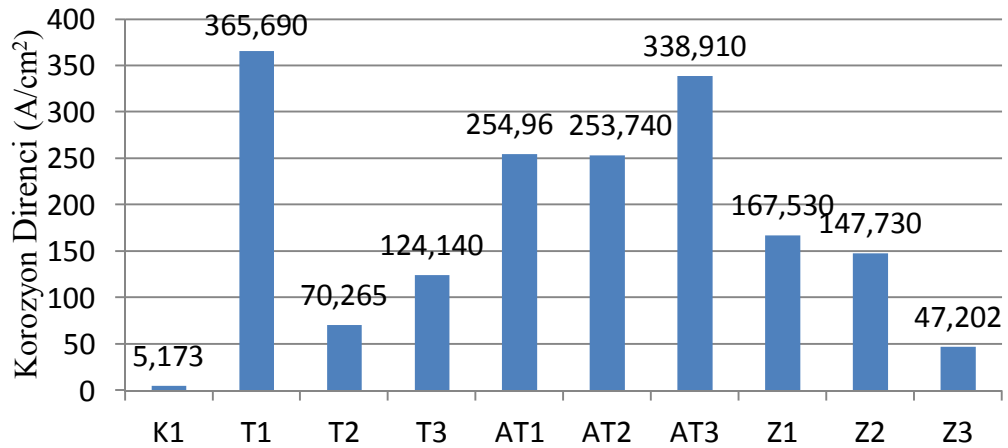
Şekil 4.12. AT3 şartlarıyla AlTiN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

Şekil 4.13' de, ZrN kaplı AZ91 magnezyum alaşımasının korozyon dayanımı ve korozyon potansiyel eğrisi verilmiştir. Şekil 4.13' e göre, Z1 şartlarında ZrN kaplanan AZ91 magnezyum alaşımasının korozyon dayanımı $-167,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.13. Z1 şartlarıyla ZrN kaplı AZ91 magnezyum alaşımı için, a) Kararlı potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

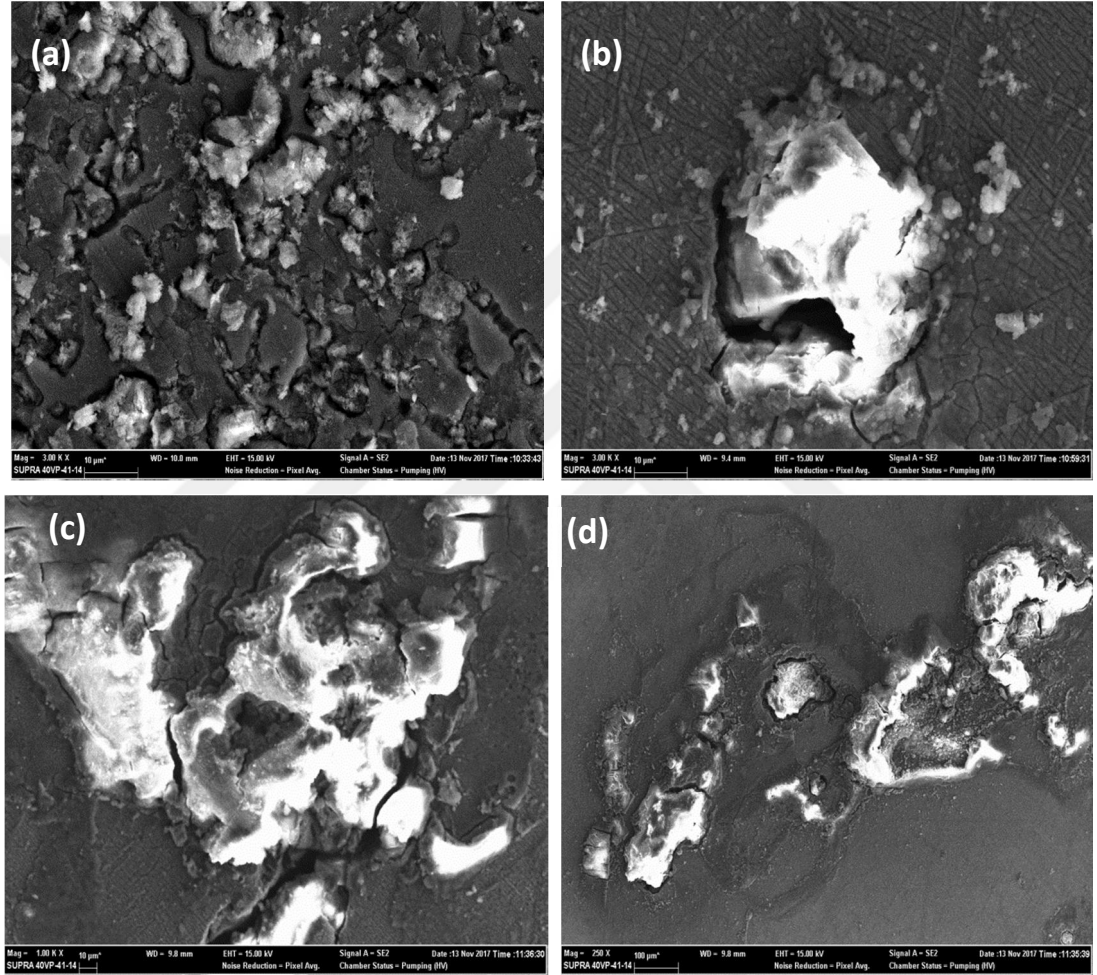
Bu kaplamada, Z1 şartlarında ZrN kaplamanın en yüksek korozyon dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Z1 şartlarında kaplanan ZrN kaplamanın korozyon direnci, AT3 şartları ile kaplanan AlTiN ve T1 koşullarıyla kaplanan TiN ile mukayese edildiğinde sırasıyla yaklaşık %50 ve %54 mertebesinde daha düşük olduğu ancak kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini ise yaklaşık 33 kat arttırdığı tayin edilmiştir. Diğer kaplamalarla yapılan korozyon deneylerinde elde edilen polarizasyon diyagramları EK A'da verilmiştir. Tüm kaplama şartları ile kaplanan seramik film kaplamaların korozyon dayanımları Şekil 4.14' de verilmiştir. Bu bağlamda, en yüksek korozyon direnci göz önüne alındığında, sırasıyla TiN (T1), AlTiN (AT3) ve ZrN (Z1) olmuştur. En düşük kaplama korozyon dayanımları, sırasıyla Z3 koşuluyla ZrN kaplamada, T2 koşuluyla TiN kaplamada ve AT2 koşuluyla AlTiN kaplamada görülmüştür. Kaplama koşullarının korozyon dayanımı üzerine lineer bir etkisi gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.14. Kaplamasız (K1) ve kaplamalı AZ91 magnezyum alaşımının korozyon dayanımı

Korozyon dayanımı en düşük olan kaplamaların yüzeylerinde oluşan korozyon büyümeleri ve/veya yüzeydeki bozulmalar SEM görüntüsü ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.15-a' ya göre, en fazla korozyon büyümesi ve/veya yüzeye homojen dağılmış korozyon bozulmaları kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımında görülmüş olup, seramik kaplanmış numunelerde ise korozyonun Şekil 4.7–Şekil 4.9' da gösterilen kaplama kusurlarında (pin hole) lokal olarak geliştiği sonucuna varılmıştır. Bu durum Şekil 4.15-b,c,d' de görülebilmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.15-c' de görüleceği üzere, özellikle AlTiN kaplamada belirgin korozyon çatlağı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise, AlTiN kaplamanın (AT2) yüzeyinde daha fazla kaplama kusurlarının olduğu, ZrN kaplamada ise (Z3) kaplanmış yüzeyin daha düzgün olduğu ifade edilebilir. Ancak, olarak Ti esaslı kaplamaların korozyon direnci Zr esaslı kaplamaya göre daha iyi olduğu yapılan deneyler ile ortaya konulmuştur.

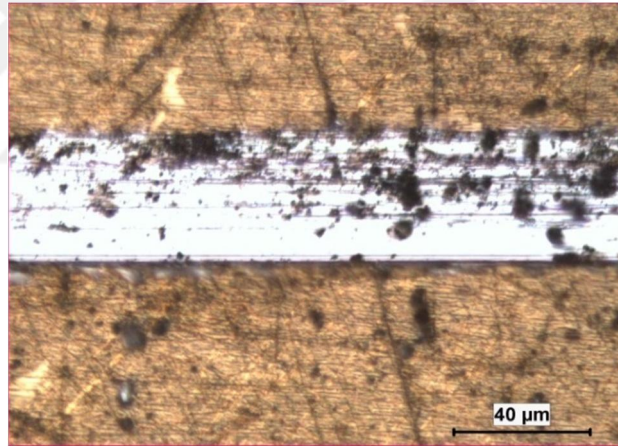


Şekil 4.15. Yüzeylerde oluşan korozyon büyümelerine örnekler a) Kaplamasız (K1) b) TiN kaplamalı (T2), c) AlTiN kaplamalı (AT2) ve d) ZrN kaplamalı (Z3)

4.3. Aşınma Deney Sonuçları

Bu bölümde, kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımının tribolojik özelliği, değişik düşük yoğunluklu mühendislik malzemeleri olan Etial 150 alüminyum alaşımı ve FR-4 cam takviyeli epoksinin tribolojik özellikleri yapılan lineer aşındırma

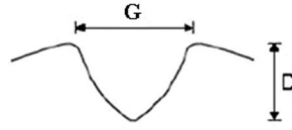
testleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tez çalışmasında yapılan seramik film kaplamaların aşınma performansları deneysel çalışmalar ile belirlenmeye çalışılmıştır. 60 HRC sertliğe sahip aşındırıcı AISI 52100 çelik ile düşük aşınma yükü 0,1 N (0,01 kgf) ve yapılan nano aşınma deneyi ile TiN, AlTiN ve ZrN film kaplamaların tek strokta (10 mm kayma uzunluğu) yüzeyden kalktığı gözlemlenmiş olup, tezin en önemli sonucu AZ91 magnezyum alaşımı üzerine belirlenen şartlarda yapılan ark PVD ile yapılan TiN, AlTiN ve ZrN kaplamaların aşınma direncine hiçbir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun nedeninin ise, altlık malzemesi olan AZ91 magnezyum alaşımının yumuşak karakterde olması ve yapılan kaplamaların nanometre düzeyde olması sonucu, uygulanan kaplamaların lineer aşındırmaya (reciprocating) karşı direncini arttırmamıştır. 0,1 N aşındırma yükü ile tek strokta tüm seramik kaplamalarda Şekil 4.16' da görüldüğü gibi aşırı aşınma derinliği ve/veya kaplamanın atması ile karşılaşmıştır.



Şekil 4.16. 0,1 N aşındırma yükü ile tek strokta (10 mm) tüm film kaplamalarda oluşan aşınma hasarı

İkinci olarak, AZ91 magnezyum alaşımı, Etial 150 alüminyum alaşımı ve FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitinin çelik bilyaya karşı (60 HRC) lineer aşınma deneyleri yapılmış olup, Çizelge 4.2' de belirtilen aşınma izi ölçüm sonuçlarına ulaşılmıştır. Burada, elde edilen aşınma iz boyutları, ASTM G-133 test standartına göre Uts Tribometer T20 marka lineer aşınma test cihazı üzerinde bulunan probalar yardımıyla ölçülmüştür. Triboloji teorisine göre (Muhaffel, 2012), aşınma iz alanı, aşınma miktarı (A), aşınma izi genişliği (G) ve aşınma izinin derinliği (D) ile doğru orantılıdır. Karşıt hareketli aşındırma

(reciprocating wear) prensibine göre yapılan deneyler neticesinde, aşınma oranlarının hesaplanmasında Eşitlik 1.1' de verilen bağıntı kullanılmıştır.



Şekil 4.17. Aşınma iz profilinin şematik gösterimi (Muhaffel, 2012)

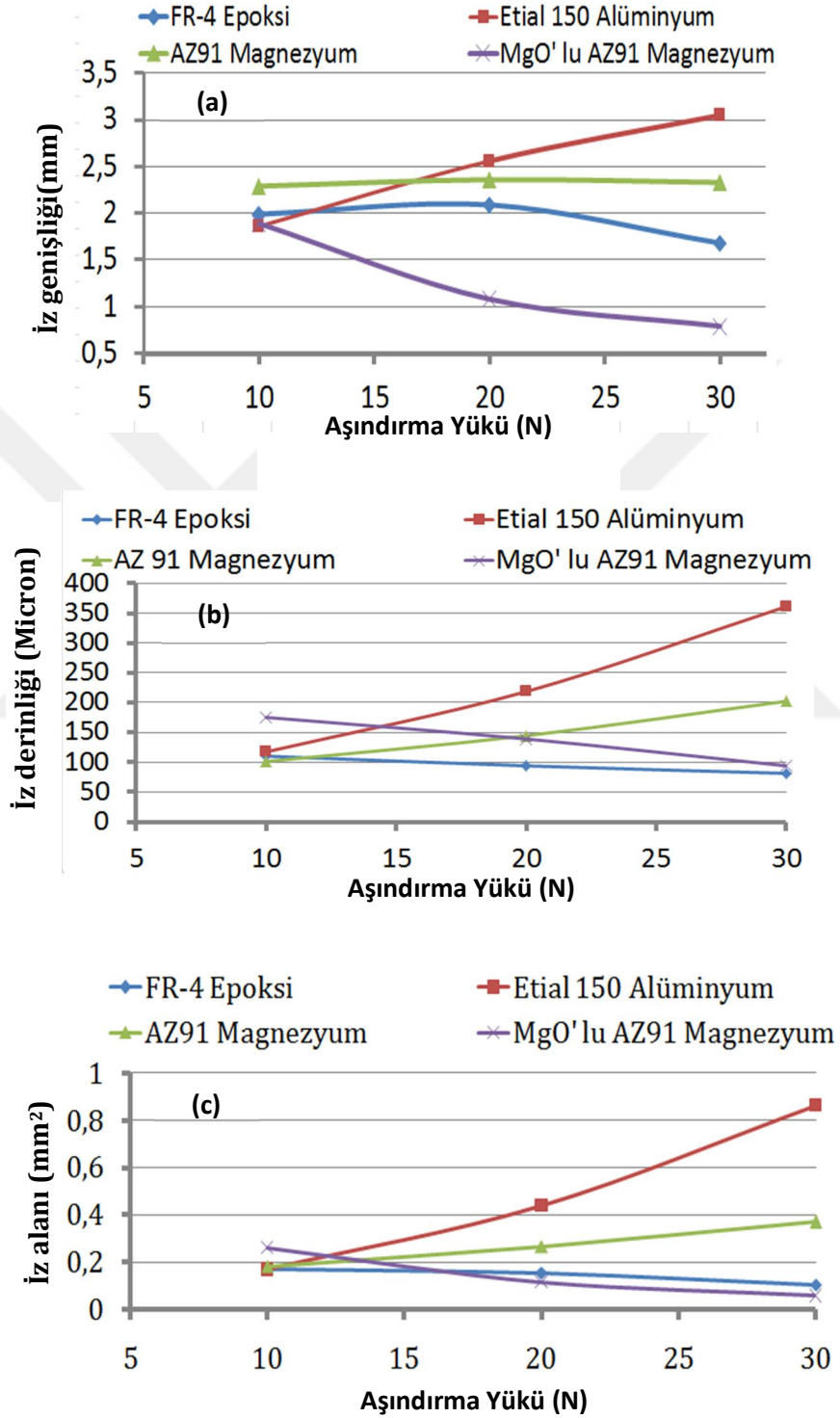
$$A = \frac{\pi}{4} G \cdot D \quad (1.1)$$

Şekil 4.17' ye göre, Eşitlik 1.1' de verilen A aşınma iz alanı (mm²), G aşınma izinin genişliği (mm) ve D ise aşınma izinin derinliği (mm) olarak tanımlanmıştır (Muhaffel, 2012). Deneysel olarak yapılan aşınma testi sonrası numunelerde oluşan aşınma iz boyutları ve iz alanları Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Aşınma deneyleri sonrası ölçülen aşınma iz boyutları ve iz alanı

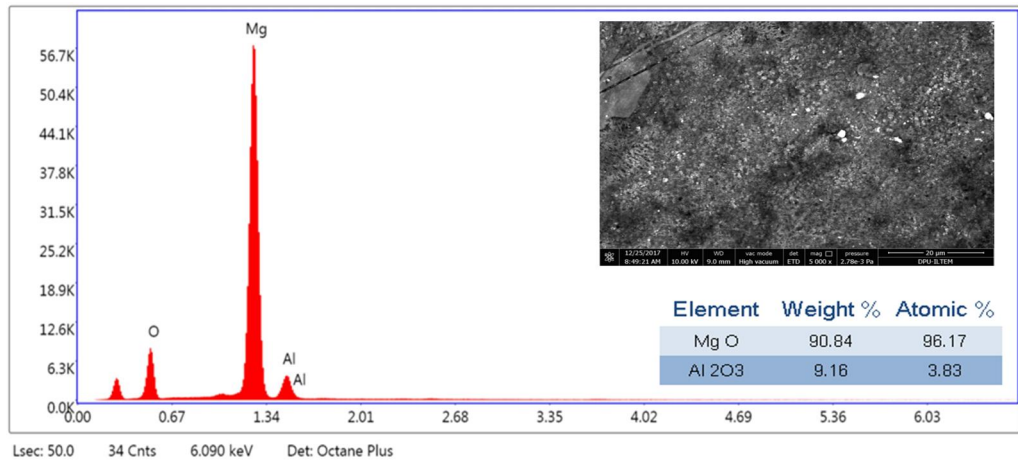
Malzeme	Kayma Mesafesi (m)	Hız (m/s)	Yük (N)								
			10N			20N			30N		
			Aşınma İzi Boyutları								
			G (mm)	D (µm)	A (mm ²)	G (mm)	D (µm)	A (mm ²)	G (mm)	D (µm)	A (mm ²)
Epoksi	500	0.1	1.99	110.186	0.1719	2.09	93.929	0.1541	1.68	81.285	0.1068
Etial 150	500	0.1	1.83	117.412	0.1686	2.56	218.567	0.4392	3.05	361.268	0.8643
AZ91	500	0.1	2.29	101.15	0.1817	2.36	144.5	0.2677	2.33	202.31	0.3694
MgO' lu AZ91	500	0.1	1.89	175.214	0.2599	1.08	139.088	0.1179	0.79	93.929	0.0582
Epoksi	1000	0.4	2.13	184.246	0.3079	2.01	63.221	0.0535	1.26	45.158	0.0446
Etial 150	1000	0.4	2.08	139.088	0.2269	2.87	139.088	0.3133	3.17	270.951	0.6742
AZ91	1000	0.4	2.43	151.732	0.2893	2.52	149.92	0.2965	2.27	124.63	0.222
MgO' lu AZ91	1000	0.4	2.04	97.542	0.1562	0.82	113.799	0.0732	0.99	77.672	0.0603
Epoksi	2000	0.75	2.1	113.799	0.182	2.39	77.672	0.1457	1.29	63.221	0.064
Etial 150	2000	0.75	2.24	83.091	0.1459	2.47	350.43	0.6794	3.41	440.747	1.1798
AZ91	2000	0.75	2.3	113.799	0.2040	2.06	171.602	0.2774	2.6	187.85	0.3834
MgO' lu AZ91	2000	0.75	1.99	240.243	0.3749	1.23	173.408	0.1674	1.39	115.605	0.1261

Çizelge 4.2' de ölçülmüş olan aşınma iz boyutları ve iz alanları kullanılarak, aşındırma yükünün ve aşındırma hızının herbir malzemede oluşan aşınma izi üzerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.



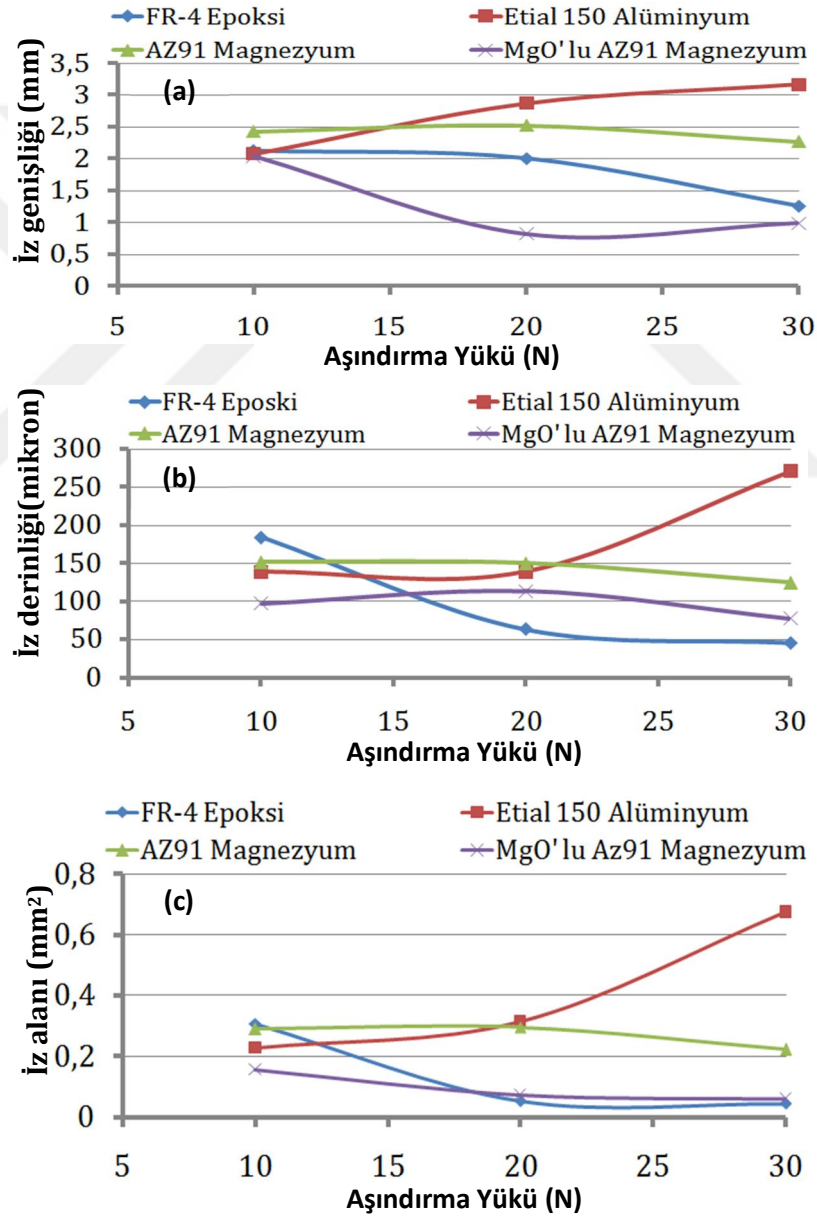
Şekil 4.18. 0,1 m/s kayma hızı ile 500 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm²)

Şekil 4.18' de aşındırma yüküne bağlı olarak, 0,1 m/s kayma hızı ile 500 m kayma mesafesi sonrasında malzemelerde oluşan aşınma izi boyutlarındaki değişim verilmiştir. Şekil 4.18' e göre, aşındırma yükünün artmasıyla Etial 150 alüminyum alaşımında oluşan izin derinliği, genişliği ve alanında belirgin artış eğilimi, AZ91 magnezyum alaşımında oluşan iz genişliği ve alanında nispi artış eğilimi gözlemlenirken, FR-4 Epoksi ve Magnezyum oksitli (MgO) AZ91 alaşımında oluşan izin boyutlarında nispi bir düşüş gözlemlenmiştir. Burada, AZ91 magnezyum alaşımı yüzeyinde deneysel çalışmalar sırasında beklenen süreden dolayı (yaklaşık 1 yıl) kararırma gözlemlenmiş ve bu kararmanın ne olduğu yapılan SEM ve EDX analizler ile belirlenmiş olup bunun MgO koruyucu oksit olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum Şekil 4.19' da verilmiştir. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımında oluşan aşınma iz alanının diğer malzemelere göre en düşük olduğu dikkat çekici bir sonuç olmuştur. AZ91 magnezyum alaşımında, 0,1 m/s hızla 500 m sürütünme sonrası oluşan iz alanı göz önüne alınırsa, Etial 150 alüminyum alaşımına göre daha az kütle kaybı meydana gelmiştir (Şekil 4.18-c). Oluşan iz alanına göre, FR-4 cam takviyeli Epoksi malzemenin MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımına göre daha fazla aşındığı önemli bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Örneğin, 0,1 m/s kayma hızı ve 30 N aşındırma yükü ile 500 m sürütünme sonrasında FR-4 cam takviyeli epoksida iz alanı 0,1068 mm², MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımında 0,0582mm², AZ 91 magnezyum alaşımında 0,3694 mm² ve Etial 150 alüminyum alaşımında ise 0,8643 mm² olarak ölçülmüştür.



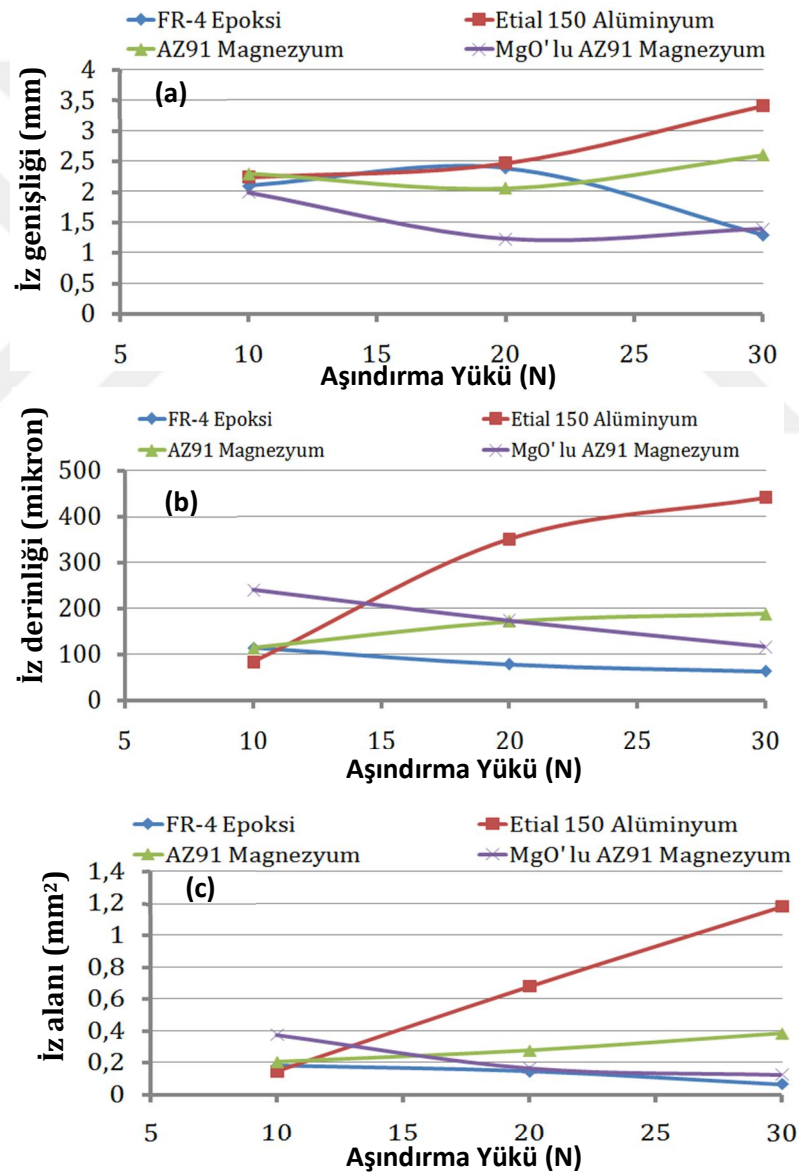
Şekil 4.19. MgO tabakalı AZ91 magnezyum alaşımının EDX grafiği ve SEM görüntüsü

Şekil 4.20' de kayma hızı 0,1 m/s hızdan 0,4 m/s' ye artırılarak 1000 m aşındırma mesafesi ile yapılan deneyler neticesinde oluşan aşınma izi boyutlarındaki değişim verilmiştir. 0,1 m/s kayma hızına benzer olarak, 0,4 m/s kayma hızı ile 1000 m aşındırma sonrasında, Etial 150 alüminyum alaşımı en fazla aşınan malzeme olmuştur. İz alanı göz önüne alınırsa, en düşük aşınan malzeme FR-4 cam takviyeli epoksi olmuştur. Benzer olarak, magnezyum oksitin AZ91 magnezyum alaşımının aşınma dayanımını arttırdığı Şekil 4.20-c' de görülebilmektedir.



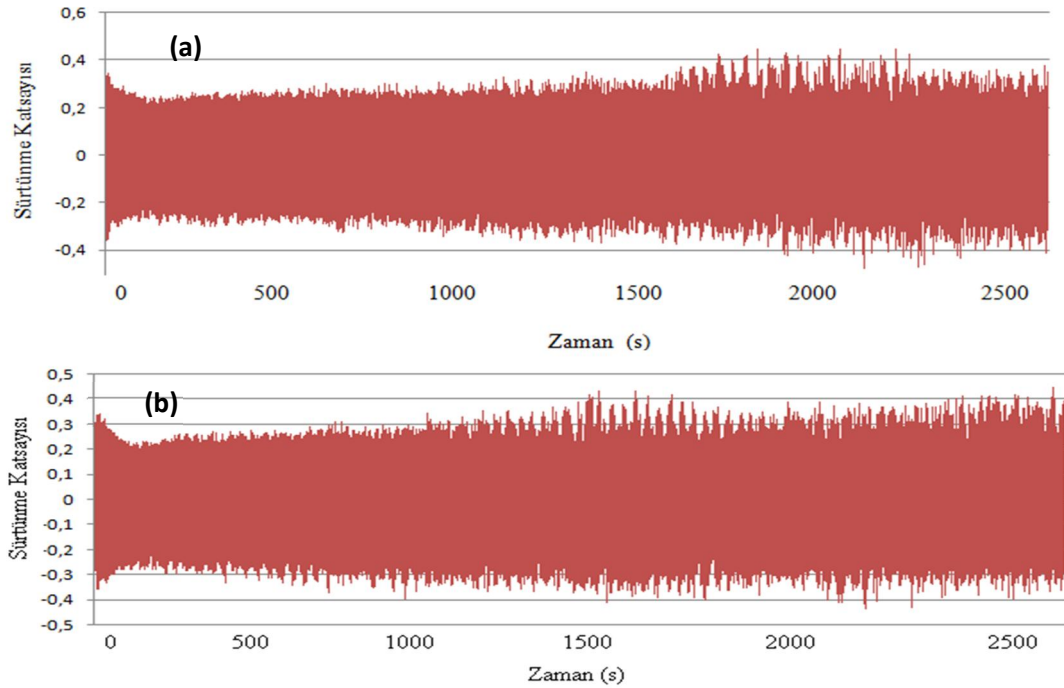
Şekil 4.20. 0,4 m/s kayma hızı ile 1000 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm²)

Çizelge 4.2' ye bakıldığında, genel olarak kayma hızı ve kayma mesafesinin artmasıyla aşınma iz alanında nispi bir artış görülmüştür. Ayrıca, aşındırma yükünün artmasıyla Etial 150 alüminyum alaşımında oluşan iz alanı dikkat çekici bir şekilde artış gösterirken, diğer malzemelerde nispi bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle FR-4 cam takviyeli epoksi ve MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımında, aşındırma yükünün 20 N' dan 30 N' a arttırılması ile iz alanında artış gözlemlenmemiştir. Şekil 4.21' de, 0,75 m/s kayma hızı ile 2000 m aşındırma sonrası malzemelerde oluşan aşınma izindeki değişim gösterilmiştir.

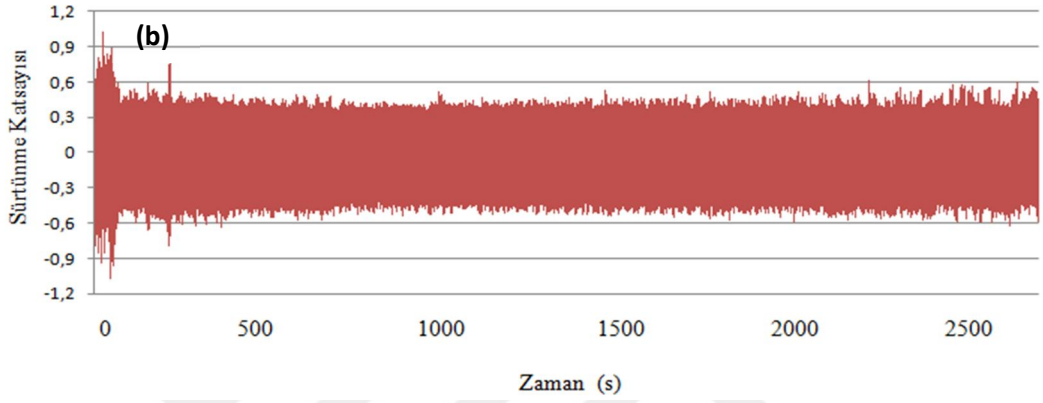
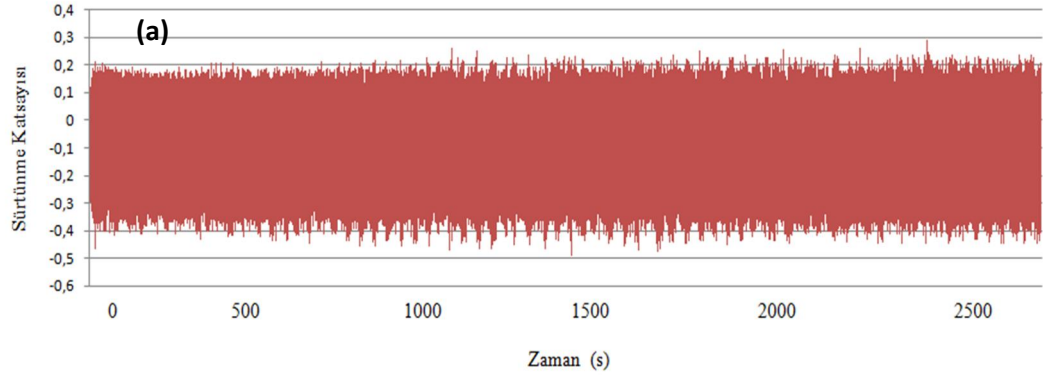


Şekil 4.21. 0,75 m/s kayma hızı ile 2000 m kayma mesafesinde yüke bağlı olarak aşınma iz değerlerinin değişimi a) İz genişliği(mm), b) İz derinliği (mikron), c) Aşınma iz alanı (mm²)

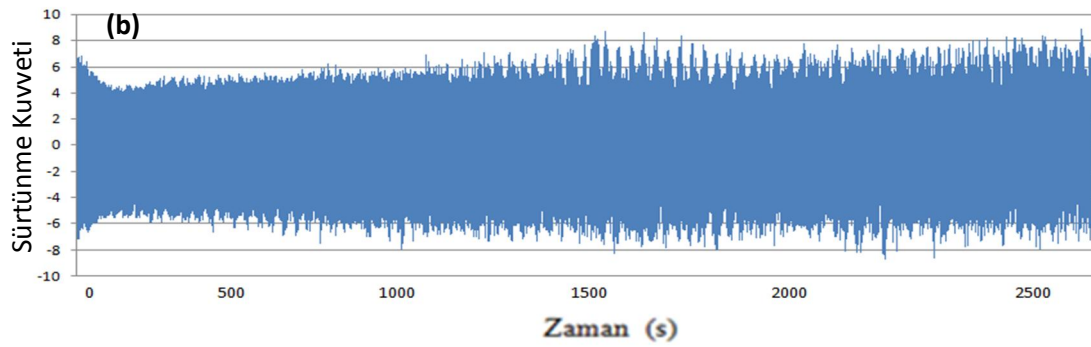
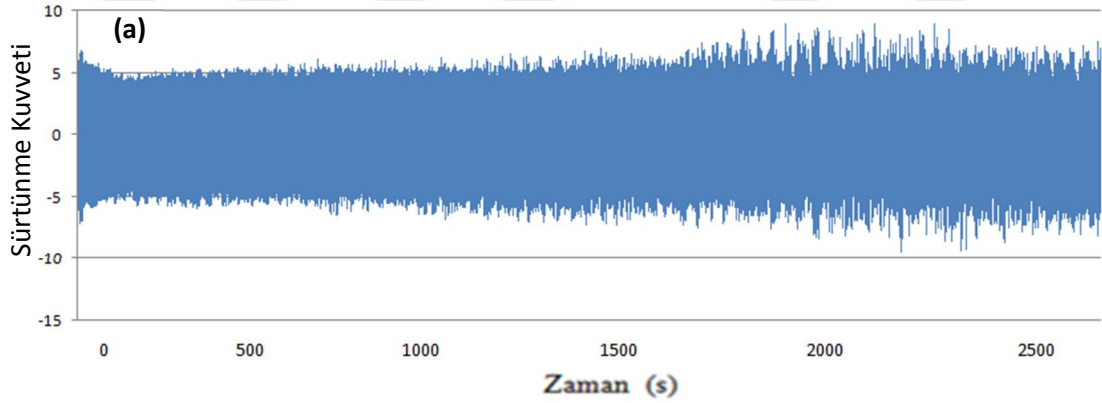
Şekil 4.21. incelendiğinde, 30 N yük altında, 0,75 m/s ve 2000 m kayma mesafesi ile en fazla aşınan malzeme Etial 150 alüminyum alaşımı olurken, en az aşınan malzeme FR-4 cam takviyeli epoksi malzeme olmuştur. Şekil 4.19-c ve Şekil 4.21-c karşılaştırıldığında, yükün, kayma hızı ve mesafesinin artmasıyla MgO' lu AZ91 malzemeye göre FR-4 cam takviyeli epoksi malzeme daha iyi performans göstermiştir. İz alanına göre, yükün artması ile Etial 150 alüminyum malzemede bariz bir kütle kaybı artışı ve AZ91 magnezyum malzemede ise nispi bir kütle kaybı artışı görülmüştür. Bu bağlamda, 60 HRC sertliğe sahip AISI 52100 çelik bilyaya karşı yapılan lineer aşınma testlerinde, AZ91 magnezyum alaşımının aşınma dayanımının Etial 150 alüminyum alaşımına göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, dört malzeme içerisinde, FR-4 cam takviyeli epoksinin en yüksek aşınma dayanımına sahip olduğu ve magnezyum oksitin de AZ91 magnezyum alaşımının aşınma dayanımını geliştirdiği görülmüştür. Aşınma deneyleri sırasında dinamik olarak sürtünme katsayısı ölçümleri yapılmış olup, zamana bağlı olarak dört malzeme için en düşük sürtünme katsayısının elde edildiği diyagramları Şekil 4.22. ve Şekil 4.23' de ve dinamik sürtünme kuvveti diyagramları ise Şekil 4.24. ve Şekil 4.25' de verilmiştir.



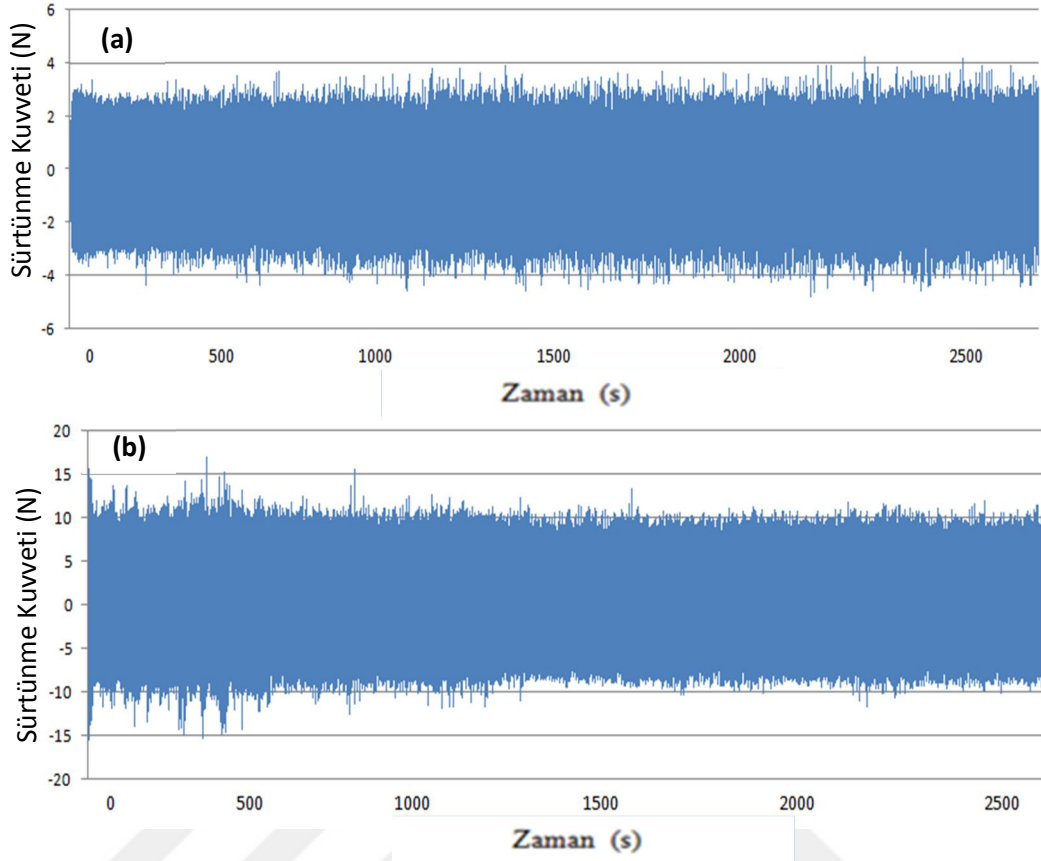
Şekil 4. 22. Dinamik sürtünme katsayısı diyagramı a) AZ91, b) MgO' lu AZ91



Şekil 4. 23. Dinamik sürtünme katsayısı diyagramı a) FR-4 cam takviyeli epoksi, b) Etial 150 alüminyum



Şekil 4. 24. Dinamik sürtünme kuvveti (F_s) diyagramı a) AZ91, b) MgO'lu AZ91



Şekil 4. 25. Dinamik sürtünme kuvveti (F_s) diyagramı a) FR-4 cam takviyeli epoksi, b) Etial 150 alüminyum

Aşınma deneylerinden elde edilen dinamik sürtünme katsayısı verilerinden ortalama sürtünme kuvvetleri ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiş olup, sırasıyla Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4' de verilmiştir. Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4. incelenirse, kuru şartlarda yapılan lineer aşınma deneylerinde, genel olarak aşındırma yükünün artmasıyla, sırasıyla sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, en fazla aşınma kaybı olan Etial 150 alüminyum alaşımında, 30 N yük altında 0,75 m/s kayma hızıyla en büyük sürtünme katsayısı (0,8334) ve sürtünme kuvveti 13,3944 N olarak elde edilmiştir. Örneğin, 0,4 m/s kayma hızıyla 1000 m sürtünme sonrasında FR-4 cam takviyeli epoksida sürtünme katsayısı 0,4058, Etial 150 alüminyumda 0,5511, MgO' lu AZ91 magnezyumda 0,4275 ve AZ91 magnezyumda 0,4848 olarak elde edilmiştir.

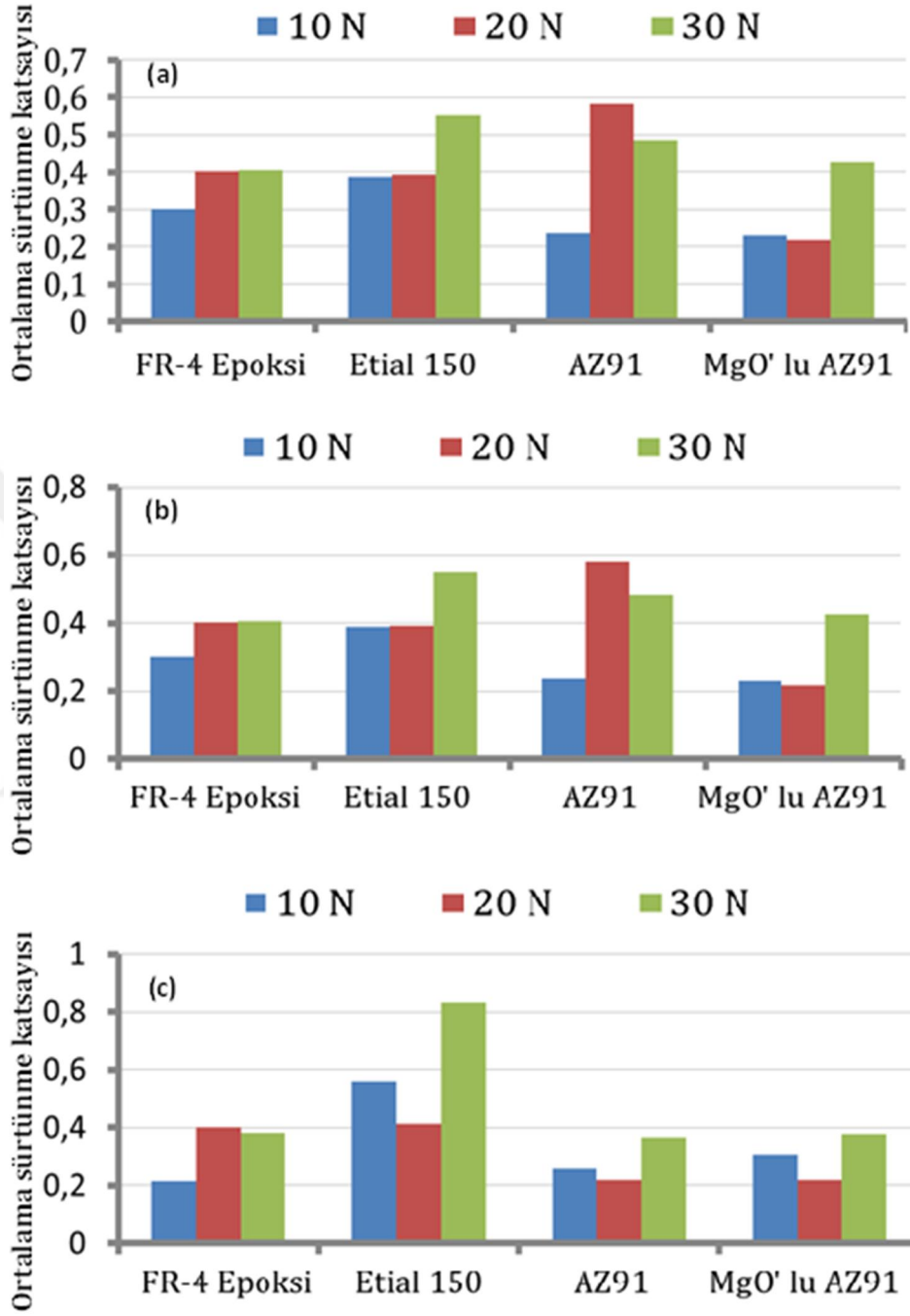
Çizelge 4.3. Aşınma deneyleri sonrası sürtünme kuvveti değerleri

Malzeme	Kayma hızı (m/s)	Kayma mesafesi (m)	Aşındırma Yüğü (N)		
			10N	20N	30N
			Sürtünme Kuvvetleri (N)		
Epoksi	0.1	500	2.1893	9.8160	10.1366
Etial 150	0.1	500	1.2357	8.0553	14.0102
MgO' lu AZ91	0.1	500	2.4067	4.7066	12.6233
AZ91	0.1	500	2.7992	4.8455	7.4506
Epoksi	0.4	1000	1.4249	8.0190	12.1757
Etial 150	0.4	1000	3.3725	7.8490	7.9295
MgO' lu AZ91	0.4	1000	2.3166	4.3462	12.8272
AZ91	0.4	1000	2.3665	5.8227	14.5461
Epoksi	0.75	2000	2.0552	8.0090	11.3981
Etial 150	0.75	2000	0.6725	6.9719	13.3944
MgO' lu AZ91	0.75	2000	3.0856	4.1664	11.3460
AZ91	0.75	2000	2.59105	4.3983	10.9614

Çizelge 4.4. Aşınma deneyleri sonrası sürtünme katsayısı değerleri

Malzeme	Kayma hızı (m/s)	Kayma mesafesi (m)	Aşındırma yüğü (N)		
			10N	20N	30N
			Sürtünme katsayısı değerleri		
Epoksi	0.1	500	0.2717	0.3042	0.327
Etial 150	0.1	500	0.3931	0.4026	0.4668
MgO' lu AZ91	0.1	500	0.2795	0.2547	0.4326
AZ91	0.1	500	0.299	0.5213	0.2483
Epoksi	0.4	1000	0.3019	0.4009	0.4058
Etial 150	0.4	1000	0.3882	0.3922	0.5511
MgO' lu AZ91	0.4	1000	0.2314	0.2183	0.4275
AZ91	0.4	1000	0.2381	0.5817	0.4848
Epoksi	0.75	2000	0.2161	0.4016	0.3798
Etial 150	0.75	2000	0.5572	0.413	0.8334
MgO' lu AZ91	0.75	2000	0.3064	0.2203	0.3782
AZ91	0.75	2000	0.2591	0.2197	0.3653

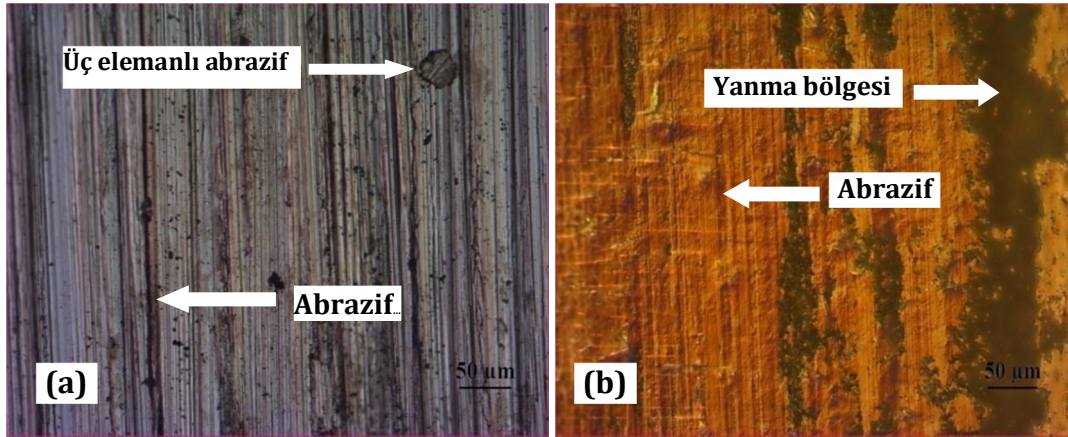
Çizelge Çizelge 4.4' deki sürtünme katsayısı değerleri kullanılarak, aşınma deney parametrelerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi Şekil 4. 26' da verilmiştir.



Şekil 4.26. Ortalama sürtünme katsayısı eğilimleri a) 0,1 m/s hızla 500 m kayma mesafesinde, b) 0,4 m/s hızla 1000 m kayma mesafesinde, c) 0,75 m/s hızla 2000 m kayma mesafesinde

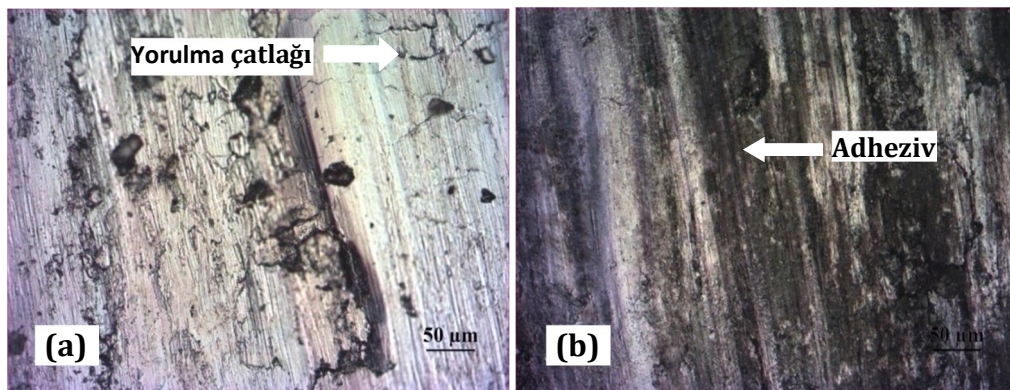
Şekil 4.26' ya göre, yoğunluk ve mekanik özellikler bakımından birbirine muadil sayılabilecek AZ91 magnezyum alaşımı ve Etial 150 alüminyum alaşımı, sert çelik bilyaya karşı özellikle yüksek yük (30N), yüksek sürtünme hızı (0,75 m/s) ve mesafesi (2000 m) altında sürtünme katsayısı değerleri mukayese edilirse, AZ91 magnezyum alaşımı daha düşük sürtünme katsayısına sahip olmuştur. Bu ise, sürtünme altında çalışacak endüstriyel uygulamalarda AZ91 magnezyum alaşımının Etial 150 alüminyuma göre tercih edilebileceğinin göstergesi olmuştur. Ayrıca, serbest ortamda oksitlenen AZ91 magnezyum alaşımının (MgO' lu AZ91), AZ91 magnezyum alaşımına göre aşınma dayanımı geliştirilmiş ve düşük sürtünme katsayısı elde edilebilmiştir. Bu sonuç, endüstriyel uygulamalarda AZ91 magnezyum alaşımının tribolojik özelliklerinin yüzeyine mikroark oksidasyon uygulanarak magnezyum oksit filmi ile daha da iyileştirilebileceği hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, bu bölümün en önemli sonuçlarından biri olan, lineer aşınma metal-polimer esaslı cam takviyeli kompozit sürtünme aşınma deneyinde, FR-4 cam takviyeli polimer esaslı Epoksi kompozit malzemenin yüksek yük, hız ve kayma mesafesinde en iyi aşınma davranışı gösterdiği ve ortalama sürtünme katsayısında 0,2-0,4 aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Bu bağlamda, tüm deneylerde Etial 150 alüminyum alaşımının sürtünme katsayısı 0,4-0,8 aralığında, AZ 91 magnezyum alaşımının sürtünme katsayısı 0,2-0,6 aralığında ve MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımının ise 0,2-0,4 aralığında değişim gösterdiği görülebilmektedir (Şekil 4.26). Bu sonuçları destekleyici olarak, deney numunelerinin aşınma izleri optik mikroskopla görüntülenmiş olup, oluşan aşınma mekanizmaları hakkında yorumlamalar yapılmıştır. Bu bölümde, özellikle kütle kaybı en yüksek ve en düşük numunelerin aşınmış yüzeyleri ele alınmış olup diğer görüntüler EK B'de verilmiştir. Şekil 4.27' de FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin en yüksek aşınma iz alanı (0,3079 mm²) oluşmuş numunenin ve en düşük aşınma (0,0446 mm²) meydana gelmiş numunenin aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.27-a' ya göre, 10 N yük, 0,4 m/s ve 1000 m deney şartlarında, FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin aşınmış yüzeyinde abraziv aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmektedir. Şekil 4.27-b' de ise, 30 N yük, 0,4 m/s ve 1000 m deney şartlarında daha düşük seviyede abraziv çiziklerin meydana geldiği ancak

yüksek aşındırma yükü altında epoksi yüzeyinde mikron mertebesinde yanıkların oluştuğu gözlemlenmektedir.



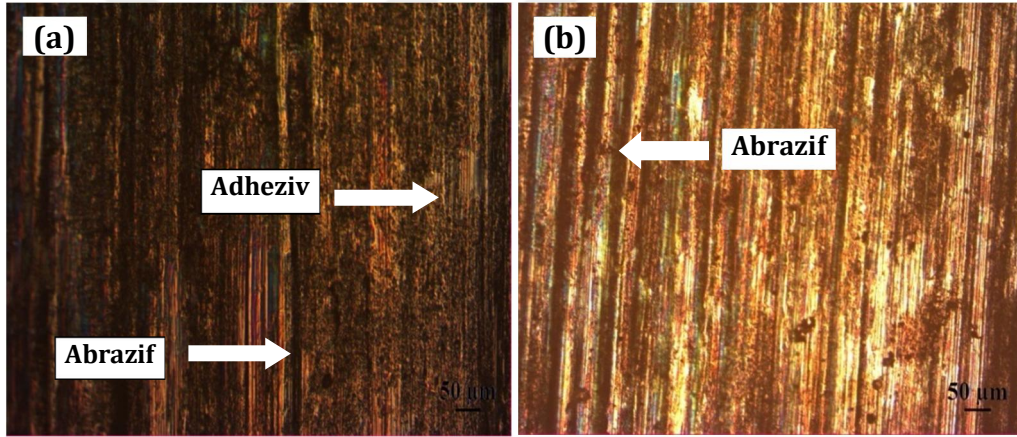
Şekil 4.27. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü

Şekil 4.28' de, Etial 150 alüminyum alaşımının en yüksek ve en düşük aşınan numuneleri için optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.28-a' da, 30 N yük ve 0,75 m/s hız ile 2000 m sürtünme sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı 0,8334 ve iz alanı 1,17 mm² olan Etial 150 alüminyum alaşımında, düşük seviyede abraziv çiziklerle birlikte daha çok adheziv aşınmanın etkili olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, Etial 150 alüminyum alaşımında lokal olarak yorulma aşınma çatlaklarının oluştuğu da açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuç, Etial 150 alüminyum alaşımının yüksek yük ve hızlarda uzun süreli sürtünme durumunda kütle kaybı ile birlikte yorulma hasarının meydana gelebileceği hakkında bilgi vermektedir. Benzer sonuca, (Wang, 2004)'da rastlanılmıştır.



Şekil 4.28. Etial 150 alüminyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü

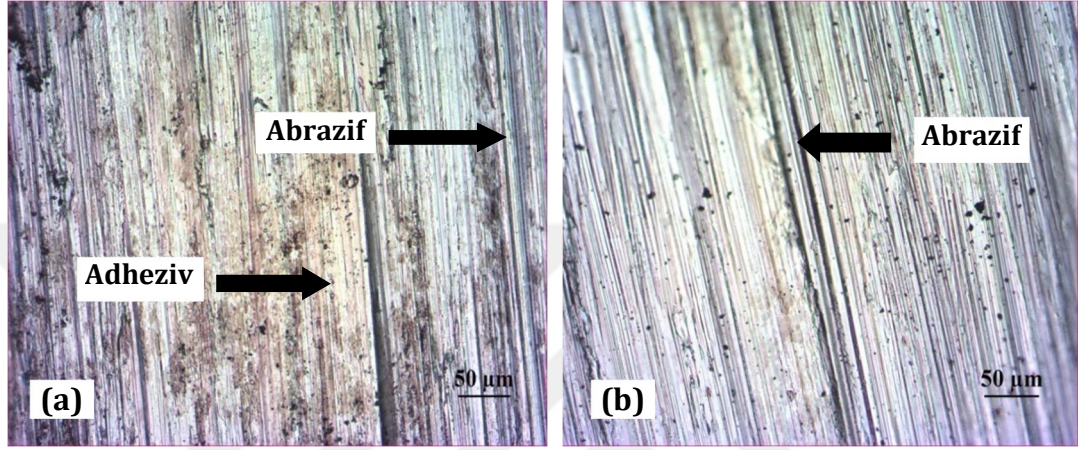
Şekil 4.28-b' de ise, en yüksek mertebede aşınan numuneye göre, daha düşük adhezyon etkisi görülmüş olup, en düşük aşınan Etial 150 alüminyum alaşımında 10 N yük, 0,1 m/s ve 500 m sürtünme ile iz alanı 0,1686 mm² olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda, aşınmış yüzeyde Şekil 4.28-a' daki gibi belirgin yorulma çatlağına rastlanılmamıştır. Şekil 4.29' da, AZ91 magnezyum alaşımında oluşan en yüksek ve en düşük aşınma yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29-a' da, 30 N yük, 0,75 m/s ve 2000 m sürtünme sonucunda, 0,3834 mm² yüzey alanına sahip aşınma izi oluşmuş ve daha çok abrazyon aşınma çizikleri ile birlikte adhezyon aşınma mekanizmasının da geliştiği görülmektedir. Ancak, en düşük aşınan AZ91 magnezyum numunede daha çok abrazyon çiziklerinin etkili olduğu görülmektedir. Bu aşamada (yük 10 N, hız 0,1 m/s ve 500 m kayma mesafesi), adheziv aşınma mekanizmasının gelişmediği kanaati oluşmuştur.



Şekil 4.29. AZ91 magnezyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü

Son olarak, Şekil 4.30' da, magnezyum oksitli AZ91 magnezyum alaşımında, en yüksek ve en düşük aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey fotoğrafları verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre, Şekil 4.30-a' da verilen aşınma yüzeyi 10 N yük, 0,75 m/s hız ve 2000 m sürtünme sonucunda oluşurken, Şekil 4.30-b' de verilen aşınma yüzeyi 30 N yük, 0,1 m/s hız ve 500 m sürtünme sonucunda oluşmuştur. Yüksek kayma mesafesi sonrasında oluşan aşınmış yüzeyde, abraziv çiziklerle birlikte adhezyon aşınma mekanizmasının etkili olduğu Şekil 4.30-a' da görülebilmektedir. Ancak, düşük kayma mesafesinde ise, daha düşük seviyede abraziv aşınma çiziklerinin olduğu

anlaşılmaktadır (Şekil 4.30-b). Bu bağlamda, en düşük aşınma iz alanına sahip optik mikroskop görüntüleri birbiri ile mukayese edilirse, en düşük seviyede abraziv çiziklerinin (smooth) meydana geldiği ve en az aşınma iz alanına ($0,0446 \text{ mm}^2$) sahip olan FR-4 cam takviyeli epoksi kompoziti ve ikinci en düşük abraziv çiziklerinin (iz alanı: $0,0582 \text{ mm}^2$) olduğu malzeme MgO ' lu AZ91 magnezyum olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.30. MgO ' lu AZ91 magnezyum alaşımında en yüksek (a) ve en düşük (b) aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey görüntüsü

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Korozyon Sonrası Değerlendirmeler: PVD tekniğiyle yapılan nitrür kaplamaların korozyon direncinin orta derecede veya az miktarda gelişmesinin nedeni, bu kaplamaların korozyon performanslarının kötü olması değildir. Korozyon çözeltisinin taban malzemeye ulaşmasına imkan veren, kaplamalardaki kusurlardır. Kaplama prosesinden veya altlık malzemeden kaynaklanan bu kusurların korozyon sırasında boyutlarının büyüdüğü ve korozyonu hızlandırdığı düşünülmektedir (Sinici, 2006; Yilbas vd., 1995). Yüzeyleri Ark PVD yöntemiyle seramik film kaplanmış AZ91 magnezyum alaşımı deney numunelerinin yüzeylerinden ve kesitlerinden alınan, SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerinde, mikron mertebesindeki bu kaplama kusurlarının (pinhole) ve mikroçatlakların meydana geldiği görülmüştür.

TiN seramik film kaplama yapılan AZ91 magnezyum alaşımı malzemesinde, AlTiN ve ZrN kaplamalara nazaran, bu kaplama kusurlarının boyut ve sıklığının nispeten daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, TiN ile yapılan kaplamanın daha düzgün ve gözeneksiz yapıda oluştuğunu göstermektedir. ZrN ve AlTiN kaplamalarda oluşan pinhole boşluklarının ise genellikle düzensiz ve küremsi formda olduğu görülmüştür. AZ91 magnezyum alaşımı yüzeyi üzerinde biriktirilen en yüksek kaplama kalınlığı, ZrN kaplamalı malzemede oluşmuştur.

Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonrası elde edilen tafel eğrileri incelendiğinde, nispeten daha yüksek kaplama film kalınlığının ve en az gözenekliliğin meydana geldiği TiN kaplamada, en yüksek korozyon direncinin olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, korozyon sonrası yüzeylerden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, TiN kaplamalı numunelerdeki korozyon hasarının ve mikroçatlakların boyutundaki büyümenin, AlTiN ve ZrN kaplamalara nazaran daha düşük mertebede olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, magnezyum alaşımı üzerine yapılan PVD kaplamalarda, gözenekliliğin azalmasıyla, korozyon direncinin arttırılabileceği, korozyon hızının

düşürülebileceği ve dolayısıyla altlık malzemenin daha fazla korunabileceği söylenebilir (Dong vd., 1997).

Ark PVD yöntemiyle uygulanan farklı BIAS voltajı ve tutma süresi kaplama parametrelerinin, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon dayanımı üzerine lineer bir etkisinin oluşmadığı sonucuna varılmıştır. Şöyle ki, TiN ve ZrN kaplamalarda, BIAS voltajı ve tutma süresindeki artışın korozyon direncine etkisi olumsuz yönde olurken, AlTiN kaplamada ise, BIAS voltajı ve tutma süresindeki artışla birlikte korozyon direncinde nispi artışlar elde edilmiştir.

Na₂SO₄ çözeltisi ile yapılan tüm elektrokimyasal korozyon deneyleri neticesinde, ark PVD yöntemiyle yapılan; TiN, AlTiN ve ZrN seramik film kaplamalar ile, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncinin önemli ölçüde arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. Benzer sonuca (Altun, 2004; Sinici, 2006) tarafından da rastlanılmıştır.

Aşınma Sonrası Değerlendirmeler: Yapılan çeşitli araştırmalar, magnezyum alaşımı yüzeyine yapılan oksit (MgO) film tabakasının, aşınma oranlarını azaltan bir koruyucu katman özelliği gösterdiğini ifade etmektedir (An vd., 2003; Becerik, 2009; Muhaffel, 2012). AZ91 magnezyum alaşımı ile yapılan aşınma deneyleri sonucunda, yüzeyi atmosferik koşullarda bir yıl süreyle oksidasyona uğrayan (MgO'lu) AZ91 magnezyum alaşımı malzemesi, düşük sürtünme katsayısı, daha düşük aşınma iz alanı ve daha düşük iz derinliği oluşturarak, kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımına kıyasla daha iyi aşınma davranışı göstermiştir.

Yapılan birçok araştırmada (Metha vd., 2004; Pıhtılı, 2009; Suresha vd., 2006), aşınmadan kaynaklı oluşan malzeme kaybının kayma mesafesine bağlı olmadığı ve aşınma oranını arttıran en güçlü faktörün artan uygulama yükü olduğu anlaşılmıştır. Uygulama yükünün ve kayma koşullarının aşınmayı oldukça etkilediği belirtilmektedir. FR-4 cam takviyeli epoksi, Etial 150 alüminyum alaşımı, AZ91 magnezyum alaşımı ve MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımı ile yapılan tüm aşınma testleri sonucunda, aşınma iz hacminin, artan kayma

mesafesiyle ilişkili olmadığı görülmüştür. Aşınma oranlarının değişimindeki en büyük etkiyi ise, yukarıda bahsedildiği şekilde artan uygulama yükü göstermiştir. Aşınma testleri sonrasında en iyi aşınma davranışını, FR-4 cam takviyeli epoksi göstermiştir. En düşük aşınma dayanımı ise, Etial 150 alüminyum alaşımında oluşmuştur. Etial 150 alüminyum alaşımının, FR-4 epoksi, AZ91 magnezyum alaşımı ve MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımına göre aşınma direncinin daha düşük oluşmasındaki temel neden, içeriğinde bulunan %Si elementi oranının yüksek olmasıyla açıklanabilir. Yapılan araştırmalar (Ölmez ve Keleşoğlu, 2016; Savaş ve Altıntaş, 1992; Wang, 2004; Uğuz ve Bayram, 2001), Al-Si alaşımlarında, aşınmaya etki eden birincil unsurun matris içerisindeki silisyum (Si) fazının varlığı olduğunu göstermektedir. Alaşım içerisindeki silisyum oranının artmasıyla birlikte, Al-Si alaşımlarının aşınma dayanımının azaldığı bilinmektedir.

Aşınma deneyleri sonrasında 0,1 m/s en düşük kayma hızında, nispeten daha yüksek sürtünme katsayıları oluşmuştur. Bu durumun oluşmasında, yüksek abrazyon aşınma faktörünün olduğu düşünülmektedir. Göreceli yumuşak bir malzemeyle birlikte sert aşındırıcılarla çalışan tribolojik uygulamalarda, düşük kayma hızlarında oluşan yüksek sürtünme katsayısı değerinin, yumuşak ve sert kontak yüzeylerindeki abrazyondan ileri geldiği bilinmektedir (Aung vd., 2008).

Magnezyum alaşımı, alüminyum alaşımı ve epoksi polimer matrisli kompozit malzemelerinin aşınması üzerine yapılan geçmiş birçok çalışmada; en belirgin aşınma faktörünün, adhezif ve üç elemanlı abrazyon aşınma mekanizmalarının olduğu belirtilmektedir (Birol ve Birol, 2008; Ramesh ve Kishore, 1983; Senf ve Brozseit, 1999; Sirinvasan vd., 2009; Suresha vd., 2006; Uğuz ve Bayram, 2001; Wang vd., 2004; Yılmaz, 2013) Aşınma deneyleri sonrası optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, FR-4 Epoksi kompoziti, Etial 150 alüminyum alaşımı, AZ91 magnezyum alaşımı ve MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımı numunelerinin genelinde, literatür çalışmalarıyla paralellik arzedecek şekilde adhezif ve abrazyon aşınma mekanizmalarının olduğu görülmüştür. 0,1 m/s düşük kayma hızı değerlerinde, kontak sürtünmeleriyle başlayan adhezif aşınma mekanizması, yük artışıyla birlikte adhezif ve abrazyon aşınma

mekanizmalarının birlikte oluşmasına sebebiyet vermiştir. Özellikle Etial 150 alüminyum alaşımında, FR-4 epoksi, AZ91 magnezyum alaşımı ve MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımına nazaran daha yüksek boyutlarda yüzey aşınma deformasyonu gözlemlenmiştir. Bu durumun oluşmasında, Etial 150 alüminyum alaşımı içeriğinde bulunan silisum (Si) elementinin oranının yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Al-Si alaşımlarındaki %Si oranı artışının, malzemenin malzeme kayıplarını arttırdığı ve daha büyük aşınma oluklarının oluşmasına neden olduğu belirtilmektedir (Ozioko, 2012; Ölmez ve Keleşoğlu, 2016; Savaş ve Altıntaş, 1992; Uğuz ve Bayram, 2001; Wang, 2004).

MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımıyla yapılan aşınma deneyleri sonucunda, kayma hızı değerinin artışıyla birlikte yüzey hasarlarının ve kayma oluklarının derinliğinin ciddi oranda arttığı görülmüştür. Bu durumun oluşmasında, aşınan kalıntı MgO tabakası partiküllerinin aşınmayı hızlandırıcı bir etki gösterdiği düşünülebilir (An vd., 2008).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmamızda, AZ91 magnezyum alaşımının düşük yoğunluğundan dolayı otomotiv sektöründe kullanım alanına sahip olduğu ve yapılan literatür araştırmasıyla aşınma dayanımı ile birlikte korozyon dayanımında zafiyet olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, teze konu olan AZ91 magnezyum alaşımına muadil olabilecek düşük yoğunluğa sahip Etial 150 alüminyum alaşımı ve FR-4 cam takviyeli epoksi malzemenin aşınma dayanımları ile birlikte AZ91 magnezyum alaşımına yapılan Ark PVD sert sermik film kaplamalarının korozyon ve aşınma dayanımına etkisi bir dizi deneyler ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, aşınma ve korozyon deney numunelerinde metalografik analiz yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan standart deney ve analizler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda, AZ91 magnezyum alaşımı üzerine farklı kaplama parametreleriyle yapılan TiN, AlTiN ve ZrN kaplamaların altlık yüzeye göre en yüksek mikrosertlik değerleri sırasıyla, T2 kodlu kaplama şartında TiN kaplı numunede, AT3 kodlu kaplama şartında AlTiN kaplı numunede ve Z3 kodlu kaplama şartında ZrN kaplı numunede ölçülmüştür.
- T1 ve T2 kaplama şartlarında yapılan TiN kaplamada, bias voltajının artmasıyla mikrosertlik artarken, AT1 ve AT2 kaplama şartlarında yapılan AlTiN kaplamada bias voltajının mikro sertliğe olumsuz etkisi görülmüştür. Benzer olarak, Z1 ve Z2 kaplama şartlarında yapılan ZrN kaplamada, bias voltajının mikrosertliğe etkisi olumsuz yönde olmuştur. Ayrıca, T1 ve T3 şartlarında kaplanan TiN kaplamada voltaj sabit tutma süresinin artması durumunda, mikro sertlik %4,6 artarken, AT1 ve AT3 kaplama şartlarında yapılan AlTiN kaplamanın mikrosertliğinde %10,5 artış ve Z1 ile Z3 kaplama şartlarında yapılan ZrN kaplamanın mikrosertliğinde ise % 5,7 düşüş görülmüştür. Ancak, seramik kaplamaların AZ91 magnezyum alaşımının mikrosertliğini etkili bir şekilde arttırmadığı ifade edilebilir.
- Yapılan tabaka kalınlığı ölçümlerinde, AZ91 magnezyum alaşımı üzerine en yüksek TiN birikimi T2 koduyla yapılan kaplama şartında, en yüksek AlTiN birikimi AT3 koduyla yapılan kaplama şartında ve en yüksek ZrN birikimi ise Z2 şartıyla yapılan kaplamada gerçekleşmiştir.

- Korozyon deneyleri ile elde edilen tafel eğrileri ile belirlenen korozyon dayanımı sonuçlarına göre, en yüksek korozyon direnci göz önüne alındığında, sırasıyla; T1 şartıyla yapılan TiN kaplamada, AT3 şartıyla yapılan AlTiN kaplamada ve Z1 şartıyla yapılan ZrN kaplamada oluşmuştur. En düşük kaplama korozyon dayanımları ise, sırasıyla Z3 kaplama koşuluyla ZrN kaplamada, T2 koşuluyla TiN kaplamada ve AT2 koşuluyla AlTiN kaplamada görülmüştür. Z1 şartlarında kaplanan ZrN kaplamanın korozyon direnci, AT3 şartları ile kaplanan AlTiN ve T1 koşullarıyla kaplanan TiN ile mukayese edildiğinde sırasıyla yaklaşık %50 ve %54 mertebesinde daha düşük olduğu ancak kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini ise yaklaşık 33 kat arttırdığı tayin edilmiştir. Icorr değerlerine esas alınarak korozyon dayanımı en düşükten yüksek değer doğru sıralanacak olursa; Kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımında (K1), Z1 şartıyla ZrN kaplanan AZ91 magnezyum alaşımında, AT3 şartıyla AlTiN kaplanan AZ91 magnezyum alaşımında ve T1 şartıyla TiN kaplanan AZ91 magnezyum alaşımında belirlenmiştir. Kaplama koşullarının korozyon dayanımı üzerine lineer bir etkisi gözlemlenmemiştir.
- Korozyon dayanımı en düşük olan kaplamaların yüzeylerinde oluşan korozyon büyümeleri ve/veya yüzeydeki bozulmalar SEM görüntüsü ile tespit edilmeye çalışılmış olup en fazla korozyon büyümesi ve/veya yüzeye homojen dağılmış korozyon bozulmaları kaplamasız AZ91 magnezyum alaşımında görülmüş olup, seramik film kaplanmış numunelerde ise korozyonun kaplama kusurlarında (pin hole) lokal olarak geliştiği sonucuna varılmıştır.
- AZ91 magnezyum alaşımı üzerine değişik kaplama parametreleri ile yapılan seramik film kaplamaların (TiN, AlTiN ve ZrN), aşınma performansları deneysel çalışmalar ile belirlenmeye çalışılmıştır. 60 HRC sertliğe sahip aşındırıcı AISI 52100 çelik ile düşük aşındırma yükü 0,1 N (0,01 kgf) yapılan nano aşınma deneyi ile TiN, AlTiN ve ZrN film kaplamaların tek strokta (10 mm kayma uzunluğu) yüzeyden kalktığı gözlemlenmiş olup, tezin en önemli sonucu AZ91 magnezyum alaşımı üzerine belirlenen şartlarda yapılan ark PVD ile yapılan TiN, AlTiN ve ZrN film kaplamaların Az91 Mg malzemenin aşınma dayanımına hiçbir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun

nedeninin ise, altlık malzemesi olan AZ91 magnezyum alaşımlarının yumuşak karakterde olması ve yapılan kaplamaların nano düzeyde olması sonucuna varılmıştır.

- 60 HRC sertliğe sahip çelik bilyaya karşı yapılan lineer aşınma testlerinden elde edilen aşınma izi alanı sonuçlarına göre, AZ91 magnezyum alaşımlarının aşınma dayanımının Etial 150 alüminyum alaşımına göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, dört malzeme içerisinde, FR-4 cam takviyeli epoksinin en yüksek aşınma dayanımına sahip olduğu ve magnezyum oksitinin de AZ91 magnezyum alaşımlarının aşınma dayanımını geliştirdiği görülmüştür.
- Aşınma deneylerinden elde edilen dinamik sürtünme katsayısı ve dinamik sürtünme kuvveti verilerinden ortalama sürtünme kuvvetleri ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiş olup, en fazla aşınma kaybı olan Etial 150 alüminyum alaşımında, en büyük ortalama sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı esas alınarak ortalama sürtünme katsayısı değerleri en düşükten yüksek değere doğru sıralanacak olursa; FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitinde, MgO tabakalı AZ91 Mg alaşımı malzemesinde, kaplamasız AZ91 Mg alaşımı malzemesinde ve Etial-150 alüminyum alaşımında belirlenmiştir. En önemli sonuçlardan birisi de, serbest ortamda oluşan oksitlenmenin (MgO' lu AZ91), AZ91 magnezyum alaşımlarının aşınma dayanımını geliştirdiği ve sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmüştür.
- Bu bağlamda, tüm deneylerde Etial 150 alüminyum alaşımlarının sürtünme katsayısı 0,4-0,8 aralığında, AZ 91 magnezyum alaşımlarının sürtünme katsayısı 0,2-0,6 aralığında ve MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımlarının ise 0,2-0,4 aralığında değişim gösterdiği görülmüştür.
- Etial 150 alüminyum alaşımlarının en yüksek ve en düşük aşınan numuneleri için yapılan optik mikroskop incelemesinde, düşük seviyede abrazyon çizikleriyle birlikte daha çok adhezyon aşınmanın etkili olduğu ve ayrıca lokal olarak yorulma aşınma çatlaklarının olduğu da açık bir şekilde görülmüştür.
- FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin aşınmış yüzeyinde abrazyon aşınma mekanizmasının etkili olduğu ve ayrıca yüksek aşındırma yükü altında epoksi yüzeyinde mikron mertebesinde yanıkların olduğu görülmüştür.

- AZ91 magnezyum alaşımında oluşan en yüksek ve en düşük aşınma yüzey görüntülerine göre, daha çok abrazyon aşınma çizikleri ile birlikte adhezyon aşınma mekanizmasında geliştiği ve en düşük seviyede aşınan AZ91 magnezyum numunede daha çok abrazyon çiziklerinin etkili olduğu görülmektedir.
- Nihai olarak, magnezyum oksitli AZ91 magnezyum alaşımında, en yüksek ve en düşük aşınma iz alanına sahip numunelerin optik aşınmış yüzey optik mikroskop görüntülerine göre, yüksek kayma mesafesi sonrasında abrazyon çiziklerle birlikte adhezyon aşınma mekanizmasının etkili olduğu ve düşük kayma mesafesinde ise, daha düşük seviyede abrazyon aşınma çiziklerinin oluştuğu anlaşılmaktadır.
- Muhtemel yapılabilecek çalışmalara neri olarak, AZ91 magnezyum alaşımının aşınma dayanımını arttırmak için mikro oksidasyon yöntemi ile MgO ile kaplanarak aşınma ve oksidasyon çalışmaları yapılabilir. İkinci neri olarak ta, otomobil sektörü malzemesi olan magnezyum alaşımlarının aşınma, korozyon ve sürünme dayanımları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abacı, S., 2013, Katodik Koruma Redresör Üniteleri İçin Scada Kontrolünün Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Akkurt, M., 1990. Makine Elemanları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Altun, H., 2004. Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu Ve PVD Kaplamaların Korozyon Davranışlarına Etkisi. Atarürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- An, J., Li, R.G., Lu, Y., Chen, C.M., Xu, Y., Chen, X., Wang, L.M., 2003. Dry Sliding Wear Behavior Of Magnesium Alloys. Wear, vol. 265, pp. 97-104.
- An, J., Li, R.G., Lu, Y., 2008. Dry Sliding Wear Behavior Of Magnesium Alloys. Wear, 265, 97-104.
- Asi, D., 2008. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- ASM Handbook, 1992. ASM International, Materials Park, vol.13-18, USA.
- Ay, K., 2008. Hasar Analizi; Aşınma Hasarları, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Yayınları, Balıkesir.
- Aydoğdu, G. H., Aydınol, M. K. 2005. AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tanelerarası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi. Erişim Tarihi: 22.07.2017. http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi140/d140_5061.pdf.
- Aung, N.N., Zhou, W., Lim, L., 2008. Wear Behaviour Of Az91d Alloy At Low Sliding Speeds. Wear 265: 780-786.
- Bağcı, M., 2010. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Becerik, D., A., 2009, Mg-Al Alaşımlarının Mikroark Oksidasyon İşlemi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Barchiche, C.E., Rocca, E., Juers, C., Hazan, J. Steinmetz, J., 2007. Corrosion Resistance Of Plasma-Anodized Az91d Magnesium Alloy By Electrochemical Methods. Electrochimica Acta 53, s417-425.
- Basavarajappa, S., Ellangovan, S., ve Arun, K.V., 2009. Studies On Dry Sliding Wear Behaviour Of Graphitte Filled Glass-Epoxy Composites. Materials

- And Design, 30, 2670-2675. Retrieved May 06, 2010, from Elsevier database.
- Bildik, N., 2014. Korozyon Hasarının İş Güvenliği ve İş Sağlığı Açısından Değerlendirilmesi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 17 (4), 1721-1740.
- Bilir, V., 2015. Eğitim Ve Fen Fakültesi Öğrencilerinin Korozyon-Çevre İlişkileri Kavramalarını Algılamalarının Çevre Bilinci Üzerine Etkileri. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Birol, Y., Birol, F., 2008. Wear Properties Of Thixoformed Alsicufe Alloys. International Journal of Material Forming, Springer, 981-984.
- Bozkurt, T., 2006. TİN, TİALN ve ALTİN Kaplamaların Aşınma Performanslarının İncelenmesi ve Farklı Altlık Malzemede TİN Kaplamanın Etkisinin Araştırılması. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Bülbul, E., A., 2013. Kaplamasız, Pvd Tekniği İle Tin Ve Altın Kaplanmış D1n 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Bunshah, R.F., 1994. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, Noyes Publication, New Jersey.
- Candan, S., Kuşdemir, H., Türkmen, M., Koc, E., Unal, M., Candan, E., 2009. AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine Ti Elementinin Etkisi. V.International Advanced Technologies Symposium, 13-15 Mayıs, Karabük.
- Çakır, A., 2013. Korozyon Ekonomisi ve Demir Çelik Ürünlerinin Korozyonu, Galvaniz Dünyası Dergisi, 12, Sayfa: 20-22.
- Çelikkalp, S., 2011. Tarım Alet Ve Makinelerinde Metallerin Birleştirilmesinde Kullanılan Malzemelerde Oluşan Korozyon Etkisinin Araştırılması. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Chen, H., Alpas, A.T., 2000. Sliding Wear Map For The Magnesium Alloy Mg-9al-0.9 Zn (Az91). Wear, 246: 106 – 116.
- Demirci, A. H., 1988. Seçilen Bir Al-Cu Alaşımında (% 4.5 Cu) Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellik Değişimlerine Etkisi, 3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, s. 633-639, Ankara.
- Doğan, H., Karamolla, M., 2013. Yüzey Kaplama Teknolojileri-Çelikleri Borlama ve Pvd. Erişim Tarihi: 27.08.2017. <http://arge7.com/detay.asp?id=1542>.

- Dong, H., Sun, Y., Bell, T., 1997. Enhanced Corrosion Resistance Of Duplex Coatings. Surface and Coatings Technology, 90, pp 91-101.
- Doruk, M., 1982., Korozyon ve Önlenmesi. ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:70, Ankara.
- Durum, M., Gül, F., Ünal, M., Türen, Y., Erdem, İ., 2011. “Bi ve Co İlavesinin AZ91 Alaşımının Abrasif Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi”, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs, Elazığ, 334-338.
- Eker, A., A., 2008. Al ve Alaşımları. Erişim Tarihi: 11.09.2017. http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf.
- Eker, A., A., 2009. Korozyon ve Korozyon Mekanizmaları. Erişim Tarihi: 11.09.2017. <http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/korozyonve/~Koro.pdf>
- El-Tayep, N.S.M., Yousif, B.F., Yap, T.C., 2008. An Investigation on Worn surfaces of Chopped Glass fibre Reinforced Polyester Through SEM Observations. Tribology International, 41, 331-340.
- Elmadağlı, M., Perry, T., Alpas, A.T., 2007. Parametric Study Of The Relationship Between Microstructure And Wear Resistance Of Al-Si Alloys. Wear, 262, pp. 79-92.
- Ertaş, M.U., Önel, A.C., Ekinci, G., Toydemir, B., Durdu, S., Usta, M., Arslan, C.L., 2015. Investigation of VN/TiN Multilayer Coatings on AZ91D Mg Alloys, Int. J. Chem., Nuclear, Mater. Metall. Eng., vol. 9, no. 1, pp. 53-57.
- Evcin, A., Metalik Biyomalzemeler. Erişim: 18.09.2017 <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2016/10/metalik.pdf>.
- Denizdekiler, 2017. Gemilerdeki katodik koruma. Erişim: 14.09.2017. <http://denizdekiler.com/index.php/tr/bilgi-tazele/719-gemilerde-katodik-koruma>.
- Gözüaçık, K. N., 2012. Az91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolit Bileşiminin Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Gültekin, N., 2011. Etial 150 Alüminyum Alaşımının Talaşlı İşlenebilme ve Mekanik Özelliklerine Enjeksiyon Parametrelerinin Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Gürlek, K., Z., 2009, Asidik Ve Bazik Akımsız Nikel Kaplamaların Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Gürleyik M.Y., 1978 Aşınmanın Azaltılabilmesi İçin Soğuk Deformasyondan Yararlanma. , Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Gürleyik, M.Y., 1986. Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları, Mühendis ve Makine, 27, 323, Sayfa 3-14.
- Gündüz, O., Oktar, F., Salman, S., 2005. Effect Of Pulse Bias Voltage On Zn Coatings By Cathodic Vacuum Arc. Journal of Engineering and Natural Sciences, Sayfa 49-57.
- Gündoğdu, A., Malzeme Bilgisi. Erişim Tarihi: 24.01.2017. http://abs.mehmetakif.edu.tr/upload/0186_1982_dosya.pdf.
- Harsha, A.P., Jha, S.K., 2008. Erosive Wear Studies Of Epoxy-Based Composites Atnormal Incidence. Wear, 265, 1129-1135.
- Hsiao, H. Y., Tsai, W. T., 2005. Characterization of Anodic Films Formed on AZ91D Magnesium Alloy. Surface and Coatings Technology, 190, 299-308.
- Holmberg, K., Matthews, A., 1994. Coatings Tribology. Tribology Series, 28.
- İnce, U., Toksoy, M., Güden, M. 2004. İzmir-Balçova Jeotermal Doğrudan Isıtma Sisteminde Kullanılan St-37 Karbon Çelik Malzemesinin Değişik Akışkan Hızlarındaki Korozyon Davranışı Ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimler. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 83, s. 3-12.
- Kishore, Sampathkumaran P., Seetharamu, S., Murali, A., Kumar, R.K., 2001. On the SEM Features of Glass-Epoxy Composite System Subjected to Dry Sliding Wear. Wear, 241, 208-213.
- Kishore, Samapthkumaran, P., Seetharamu, S., Murali, A., Kumar, R.K., 1999. Dry Sliding Wear Behavior of Glass-Epoxy Composite. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 18, No 01, p. 55-62.
- Makeitform, 2016. Nema Grade FR-4 (gee-f) Glass-epoxy. Laminate Erişim: 14.09.2017. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/NEMA-Grade-FR-4-GEE-F-Glass-Epoxy-Laminate>.
- Muhaffel, M. R., 2012. Mikro Ark Oksidasyon İşlemi Uygulanmış Silisyum Karbür Takviyeli Az91d Magnezyum Alaşımının Korozyon Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Lancaster, J.K., 1968. The Effect Of Carbon Fiber Reinforcement On Friction And Wear Of Polymers. J. Appl. Phys., vol. 1, pp. 549-555.
- Friedrich, K., Lu, Z., Hager, .1996. A.M., "Recent Advances İn Polymer Composites Tribology. Wear, 190, 139-144.

- IonBond, 2011. Doküman Ve Teknik Bilgi Broşürleri. Erişim Tarihi: 4.11.2015
http://www.ionbond.com/fileadmin/ionbond/global/Brochures/EN/Ionbond_Cutting_Tools_EN.pdf
- Kalaycı, F., 2013. Çift Merdaneli Sürekli Döküm Tekniği İle Üretilmiş Az31, Az61 Ve Az91 Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı Üzerine Isıl İşlemin Etkisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van.
- Keleşoğlu, E., 2011. Sert kaplamalar üretim teknikleri ve özellikleri. Erişim Tarihi:22.03.2017. <http://www.yildiz.edu.tr/SertKaplamlarErgun.pdf>.
- Kılıç, D., 2013. Az91d Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolite Karbon Nanotüp İlavesinin Yüzey Özelliklerine Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kiahosseini, S.R., Afshar, A., Larijani, M.M., Yousefpour, M., 2013. Adhesion, Microstrain, And Corrosion Behavior Of Zn-Coated Az91 Alloy As A Function Of Temperature. J. Mater. Res., 28, pp. 2709-2714.
- Kishore, Sampathkumaran, P., Seetharamu, S., Vynatheya, S., Murali, A., Kumar, R. K., 2000. Sem Observations Of The Effects Of Velocity And Load On The Sliding Wear Characteristics Of Glass Fabric-Epoxy Composites With Different Fillers. Wear, vol. 237, pp. 20-27.
- Kmycorrosionlab, 2013. Alüminyum ve Alaşımları. Erişim Tarihi: 11.05. 2016. <http://www.kmyocorrosionlab.duzce.edu.tr/Dokumanlar/>.
- Korozyon Kimyası, 2016. Erişim Tarihi: 17.09.2017. http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/65942/46852/korozyon_kimyas%C4%B1_mart_2016.pdf.
- Kuşdemir, H., 2008. AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük.
- Li, X., Liu, X.Y., Luan, B.L., 2011. Corrosion And Wear Properties Ofpeo Coatings Formed On Am60b Alloy İn NaAlO₂ Electrolytes. Applied Surface Science 257, 9135- 9141.
- Lindfords, P.A., Mularie, W.M., Wehner, G.K., 1986. Cathodic Arc Deposition Technology. Surface and Coatings Technology, 29, 275-290.
- Ludema, K.C., 1996. Friction, Wear, Lubrication, A Textbook in Tribology, U.S.A.
- Lv, G.H., Chen, H., Wang, X.Q., Pang, H., Zhang, G.L., Zou, B., Lee, H.J., Yang, S.Z. 2010. Effect Of Additives On Structure And Corrosion Resistance Of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings On Az91dmagnesium Alloy İn

Phosphate Based Electrolyte. Surface & Coatings Technology 205, S36 – S40.

Mattox, D.M., 1998. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Noyes Publication, New Jersey.

Meriç, C., 1989. Uçak Yapı Malzemeleri ve Al-Li Alaşımlarının Uçak Yapı Malzemesi Olarak Kullanabilirliği. 3. Denizli Malzeme Sempozyumu, 29-31 Mart, Denizli.

Mert, F., Özdemir A., Karataş, Ç., 2010. Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi. Journal of Polytechnic, 3, s. 165-176.

Metha, D. S., Mashood, S. H, Song, W. Q., 2004. Investigation Of Wear Properties Of Magnesium And Aluminum Alloys For Automotive Applications. Material Processing Technology, vol. 155-156, pp. 1526-1531.

Metallerin Korozyonu, 2016. Erişim Tarihi: 5.07.2017. [aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx~/Bölüm+13+\(Metallerin+korozyonu.pptx.](http://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx~/Bölüm+13+(Metallerin+korozyonu.pptx.aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx~/Bölüm+13+(Metallerin+korozyonu.pptx.)

Metallerin Korozyonu. 2015. Erişim Tarihi: 5.07.2017. [https://docslide.com.br/download/link/metallerin-korozyonu.](https://docslide.com.br/download/link/metallerin-korozyonu.https://docslide.com.br/download/link/metallerin-korozyonu.)

Metallurjik, 2018. Alüminyum Alaşımının Özellikleri. Erişim Tarihi: 1.1.2018 [http://www.metallurjik.net/aluminyum/aluminyum-alasimlarinin-ozellikleri.html.](http://www.metallurjik.net/aluminyum/aluminyum-alasimlarinin-ozellikleri.html.http://www.metallurjik.net/aluminyum/aluminyum-alasimlarinin-ozellikleri.html.)

Mehta, D.S., Masood, S.H., Song, W.Q., 2004. Investigation Of Wear Properties Of Magnesium And Aluminum Alloys For Automotive Applications. J Mater Process Tech, 155–156: 1526–1531.

Muratoğlu, S., 2008. Pirinç'in Sulu Çözeltilerdeki Korozyonu. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Ozioko, F. U., 2012. Synthesis And Study On Effect Of Parameters On Dry Sliding Wear Characteristics Of Al-Si Alloys. Leonardo Electronics J. Of Practices And Technologies, 20, 2012, pp.39-48.

Ok, S., 2012. Korozyon ve Korozyondan Korunma. Erişim Tarihi: 17.07.2017. [http://socidoc.com/korozyon-ve-korozyondan-korunma.pdf.](http://socidoc.com/korozyon-ve-korozyondan-korunma.pdf.http://socidoc.com/korozyon-ve-korozyondan-korunma.pdf.)

Ölmez, S., Keleşoğlu E., 2016. Alüminyum Silisyum Alaşımların Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Journal of Engineering Sciences and Design, 4(1), pp. 31-39.

Özakın, B., 2014. Alüminyum Alaşımlarının Farklı Ortamlardaki Gerilmeli Korozyon Davranışının İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.

- Özsoy, N., 2015. Polimer esaslı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Pıhtılı, H., 2009. An Experimental Investigation Of Wear Of Glass Fibre-Epoxy Resin And Glass Fibre-Polyester Resin Composite Materials. European Polymer Journal, 45, 149-154. Retrieved July 23, 2010, from Elsevier-ScienceDirect database.
- Ramesh, R., Kishore, 1983. Dry Wear Studies On Glass-Fibre-Reinforced Epoxy Composites. Wear 89, 131-136.
- Reiners, G., Griepentrog, M., 1995. Hard coatings on magnesium alloys by sputter deposition using a pulsed d.c. Bias voltage. Surface and Coatings Technology, 76-77, Part 2, Pages 809-814.
- Sarıköse, S., 2015. Fe Esaslı Süperalaşımın Tuz Banyosunda Korozyon Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Savaş, M.A., Altıntaş, S., 1992. Control Of Mechanical And Wear Properties Of A Commercial Al-Si Eutectic Alloy. Journal of Materials Science, pp 27, 1255-1260.
- Seykoç, 2013. Alaşımli Alüminyum. Erişim Tarihi: 22.11.2017 <http://blog.seykoc.com.tr/alasimli-aluminyum/>.
- Senf, J., Broszeit, H., 1999. Wear And Corrosion Protection Of Aluminum And Magnesium Alloys Using Chromium And Chromium Nitride Pvd Coatings. Engineering Materials. vol. 1 no:1, pp. 133-137.
- Sinici, H., , 2006. Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniğiyle Yapılan Kaplamaların Az91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Song, G.L., Atrens, A., 2000. Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys, Advanced Engineering Materials, 1(1), 11-33.
- Sönmezoğlu, S., Koç M., Akın S., 2012. İnce Film Üretim Teknikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(5), pp. 389-401.
- Srinivasan, P.B., Blawert, C., Dietzel, W., 2009. Dry Sliding Wear Behaviour Of A Conventional And Recycled High Pressure Die Cast Magnesium Alloys. Materials characterization 60, 843-847.
- Srivastava, V.K., 2006. Effects Of Wheat Starch On Erosive Wear Of E-Glass Fibre-reinforced Epoxy Resin Composite Materials. Materials Science and Engineering, A 435-436, 282-287.

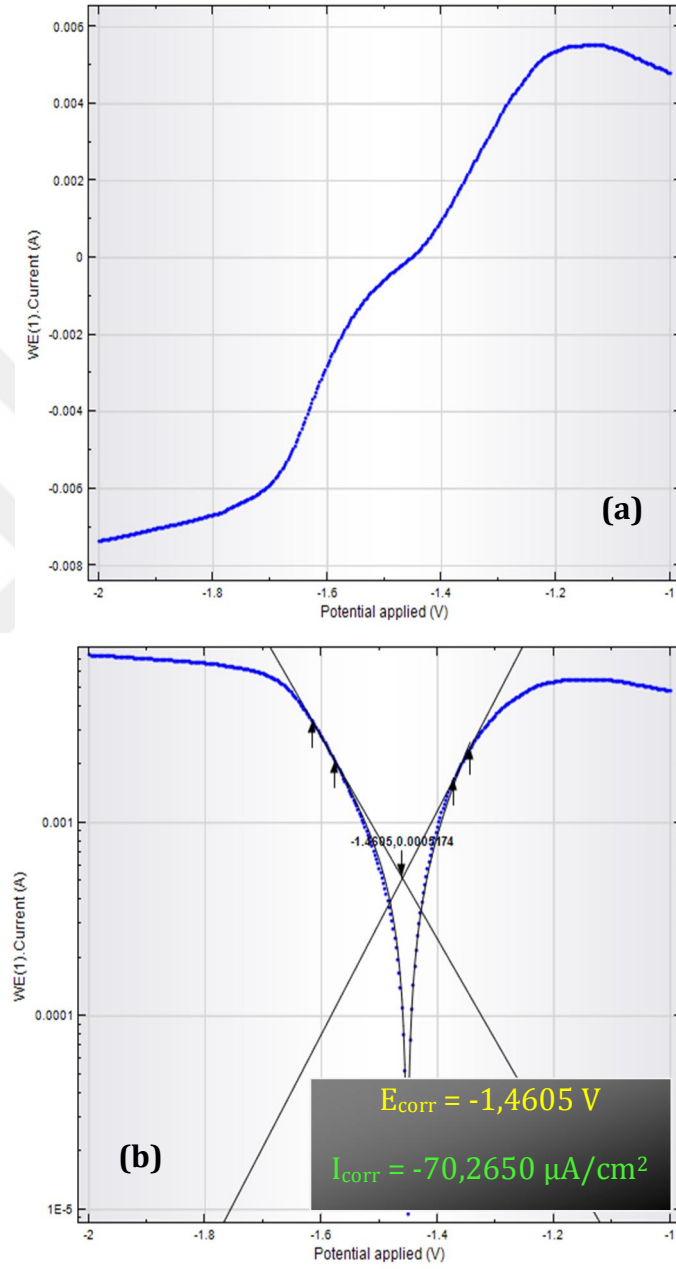
- St Elektrik, Korozyonun Önlenmesinin ve Katodik Korumanın Önemi. Erişim Tarihi:13.09.2017. <https://www.haberortak.com/46930-korozyonun-onlenmesi~>.
- Suresha, B., Chandramohan G., Siddaramaiah, Samapthkumaran P. Seetharamu S., Vynatheya S., 2006. Friction And Wear Characteristics Of Carbon-Epoxy And Glass-Epoxy Woven Roving Fiber Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 25, No 7, p. 771-782.
- Şafak, H. E., 2008. Yüzeyi Pvd Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Şendenel, E., 2004. Katodik Koruma. Erişim Tarihi: 18.10.2017 <https://tr.scribd.com/document/6705770/Katodik-Koruma-Es>.
- Tai, C.N., Kolt, E.S., Akari. K, 1990. Macroparticles on TiN films prepared by the arc ion plating process. Surface and Coatings Technology, 44: 324-335.
- Tamirci, M., Korozyon Çeşitleri. Erişim Tarihi: 14.09.2017. <http://www.angelfire.com/mt/mehmettamirci/korozyon1/cesitler.htm>.
- Tari, A., Asl, K.M., Khomamizadeh, F., 2009. Effect Of Deep Cryogenic Treatment On Microstructure, Creep And Wear Behaviors Of Az91 Magnesium Alloy. Mater. Sci. Eng., A 523, 27–31.
- Taşçı, A. 1993. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Ve Korozyon Dayanımları. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Taşçı, S., 2000. Crn Ve Tin Kaplamaların Galvanik Korozyon Davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Temiz, V., 2003. Dişli Çark Mekanizmaları. Erişim Tarihi: 12.12.2017. <http://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/%20mekanizmalari.pdf>.
- Tokluk, S. Ş., 2017. Tokluk Ve Kırılma. Erişim Tarihi: 19.12.2017. https://dokupdf.com/download/tokluk-ve-kirilma-dodrsalim-ahn-tokluk-5a01d021d64ab2b9bd748319_pdf.
- Topbaş, M. A., 1993. Isıl İşlemler. Prestij Yayınevi., İstanbul.
- Tripaty, B.S., Furey, M.J., 1993. Tribological Behaviour Of Unidirectional Graphite-Epoxy And Carbon-Peek Composites. Wear, vol. 162–164, Part-1., pp. 385–396.
- Tsubakino, H., Yamamoto, A., Fukumoto, S., Watanabe, A., Sugahara, K., Inoue, H., 2003. High-purity Magnesium Coating on Magnesium Alloys by Vapor Deposition Technique for Improving Corrosion Resistance. Mater Trans, 44, p. 504-510.

- Tuna, N., 2013. Çinko Ve Nikel Kaplanmış Düşük Karbonlu Çelik Plaka Ve Vidaların Korozyon Davranışının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Uğuz, A., Bayram, A., 2001. Effect of Si content and microstructure on the wear Behaviour of Al-Si alloys. Metall-Forschung, pp 758-761.
- Üçüncü, E. K., 2006. Overhole Giren Gemilerde Görülen Korozyon Hasarları Ve Bu Hasarların Giderilme Yöntemleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Üneri, S., 2004. Elektrokimya ve Korozyonun Türkiye'deki Gelişimi ve Bugünü. Korozyon Dergisi, 12, 3-12.
- Vyskocil, J., Musil, J., 1990. Ark Evaporation Of Hard Coatings Process And Film Properties. Surface and Coatings Technology, 43: 299-311.
- Walczak, M., Zwierzchowski, M., Bienias, J., Caban, J., 2017. The Tribological Characteristics Of Al-Si/Graphite Composite. Tribologia, 1, 97-104. ISSN 0208-7774.
- Wang, F., Liu, H., Ma, Y. ve Jin, Y., 2004. Effect Of Si Content On The Dry Sliding Wear Properties Of Spray-Deposited Al-Si Alloy. Materials and Design, 25, pp 163-166.
- Wang, J., Gu, M., Songhao, S., 2003. Investigation Of The Influence Of Mos₂ Filler On The Tribological Properties Of Carbon Fiber Reinforced Nylon 1010 Composites. Wear, vol. 255, pp. 774-779.
- Yalçın, B., İpek, O., Kuru, M., Gültekin, N., 2012. Basınçlı Döküm Yöntemiyle İmal Edilen Etial 150 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Ve Mikroyapısına Kalıp Tasarımı Ve Enjeksiyon Parametrelerinin Etkisi. 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), 10-11 Ekim, Denizli.
- Yalçın, B., Kuru, M., İpek, O., Özgür, A.E., 2017. Effect of Injection Parameters and Vacuum on the Strength and Porosity Amount of Die-Casted A380 Alloy. International Journal of Metalcasting, Springer. 11, 2, 195-206.
- Yamamoto, A., Watanabe, A., Sugahara, K., Tsubakino, H. ve Fukumoto, S., 2001. Improvement Of Corrosion Resistance Of Magnesium Alloys By Vapour Deposition. Scripta Materialia, 44, 1039-1042.
- Yasmin, T., Asad, A., Khalid, M.M., 2004. Haquetribological (Wear) Properties Of Aluminium-Silicon Eutectic Base Alloy Under Dry Sliding Condition. J Mater Process Technol, 153-154 , pp. 833-838.
- Yaylacı, E., 2010, Pvd Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi. Erişim Tarihi: 11.04.2016. <http://eyupyaylaci.com/pvdfiziksel-buhar-biriktirme-yontemi/>.

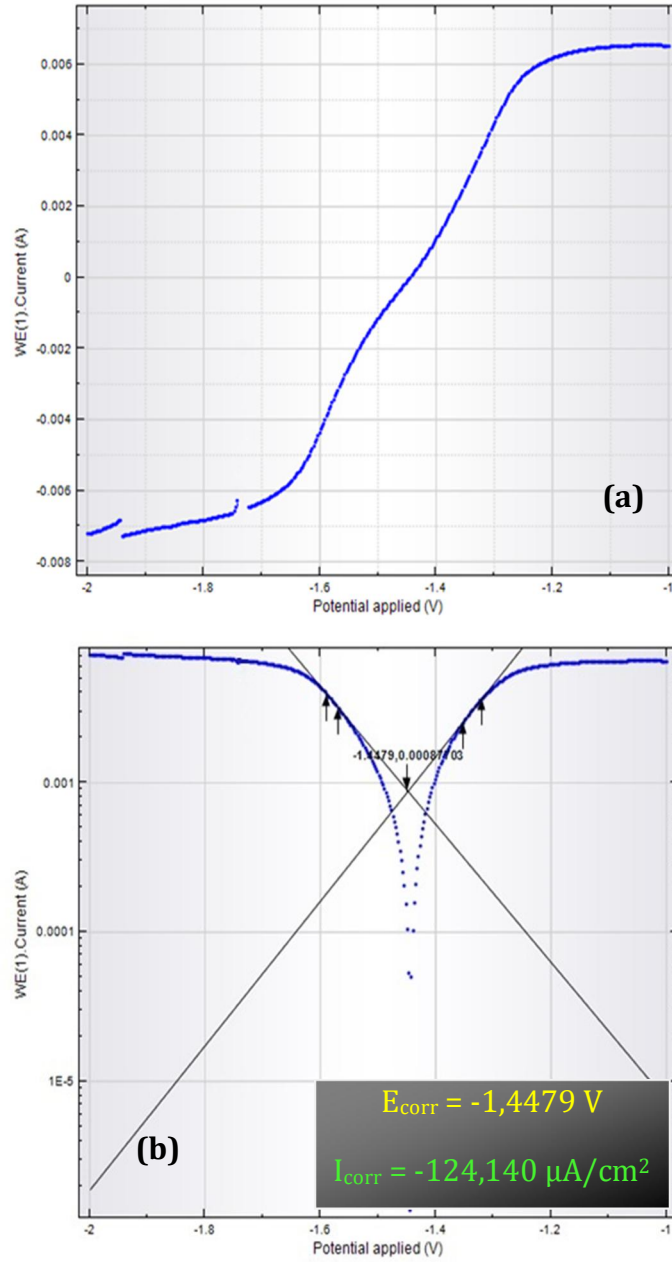
- Yılbaş, B.S., Şahin, A.Z., Ahmad, Z., Abdulaleem, J., 1995. A study of the corrosion properties of TiN coated and nitrided Ti-6Al-4V. Corrosion Science, 37, 10, Pages 1627-1636.
- Yıldızlı, K., Odabaşı, D., Nair, F., 2016. Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 130-140.
- Yılkomer, 2015. Korozyonun Önlenmesi Ve Katodik Koruma. Erişim Tarihi: 14.09.2017. <http://www.yilkomer.com/korozyonun-onlenmesi-ve-katodik-kor~/>.
- Yılmaz, M., 2013. Kompozitlerin Kuru Kaymadaki Aşınma Davranışlarının Deneyisel Olarak Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Yunchang, X., Chenglong, L., Kaifu, H., Guoyi, T., Xiubo, T., Pasul, K. C., 2009. Corrosion behavior of ZrN/Zr coated biomedical AZ91 magnesium alloy. 203, pp. 2554-2557.
- Zafari, A., Ghasemi, H.M., Mahmudi, R., 2014. An Investigation On The Tribiological Behavior Of Az91 And Az91 + 3 Wt% Re Magnesium Alloys At Elevated Temperatures. Materials and Design, 54, 544-552.
- Zanotto F., 2009. Corrosion Behaviour of the AZ31 Magnesium Alloy and Surface Treatments for Its Corrosion Proteciton. Università degli Studi di Ferrara, Dell'Ingegneria, Dottora Di Ricerca In Scienze, Ferrara.
- Zega, B., 1989. Hard Decorative Coatings By Reactivephysical Vapour Deposition. Surfce and Coatings Technology, 39: 507-520.
- Zeren, M., Yamanoğlu, R., German, R.M., 2012. Solidification Characteristics of Atomised AlCu4Mg1-SiC Composite Powders. J.Min.Metall. Sect. B-Metall, 48(1), 73-79.
- Zeren, M., 2012. Demir Dışı Düşük Sıcaklık Metal Ve Alaşımları. Erişim Tarihi: 21.08.2017. <http://docplayer.biz.tr/11000756-Demir-disi-dusuk-sicaklik-metal-ve-alasimlari.html>.
- Zeytin, H. K., Arısoy, O., Teymur B. 2001. Bazı Döküm Alüminyum Alaşımlarında Tane Yapısının Ortaya Çıkarılması. MAMTEK 2001, Manisa, s. 11-20.
- Zhang, S.W., 1998. State Of The Art Of Polymer Tribology. Tribol. Int., vol. 31, pp. 49-60.
- Zulkifli, M. R., Zaimi, M., Juoi, J. M., Mahamud, Z., (2015). "Nanocomposite TiAlBN Coatings as a Corrosion Protection Layer for AZ91 Mg Alloy Substrate in NaCl. Materials Science Forum 819, 109-114.

EKLER

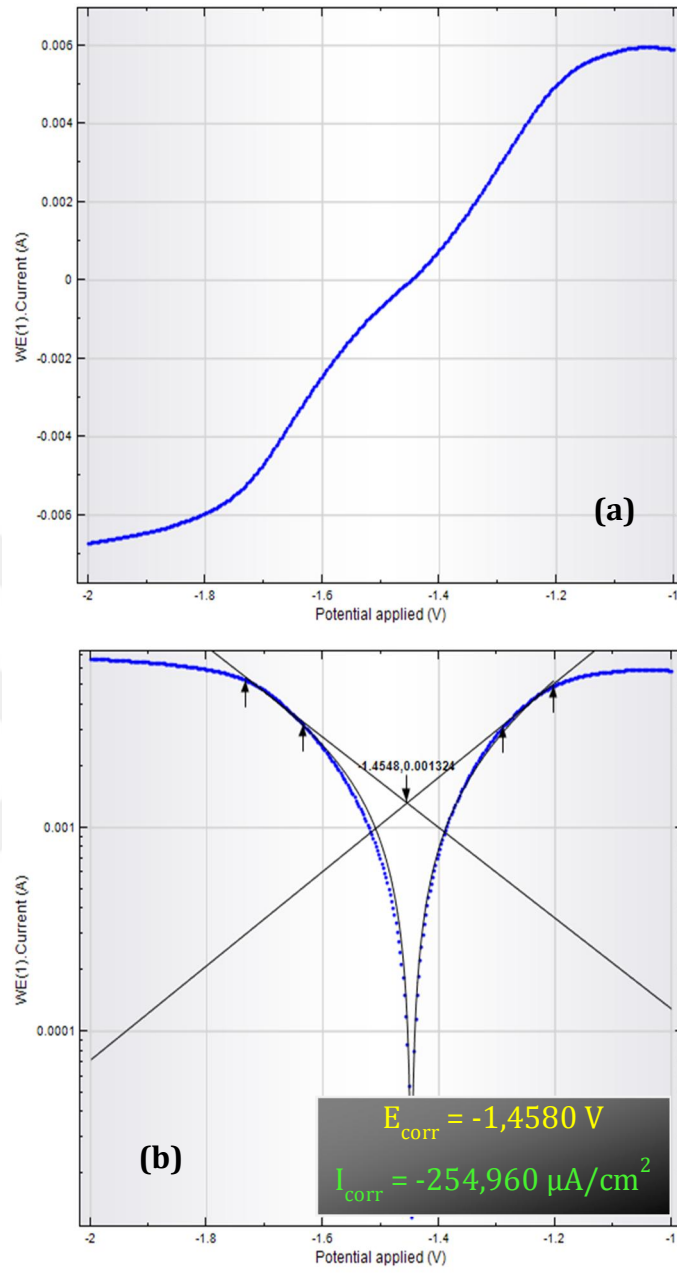
EK A. Korozyon Tafel Eğrileri



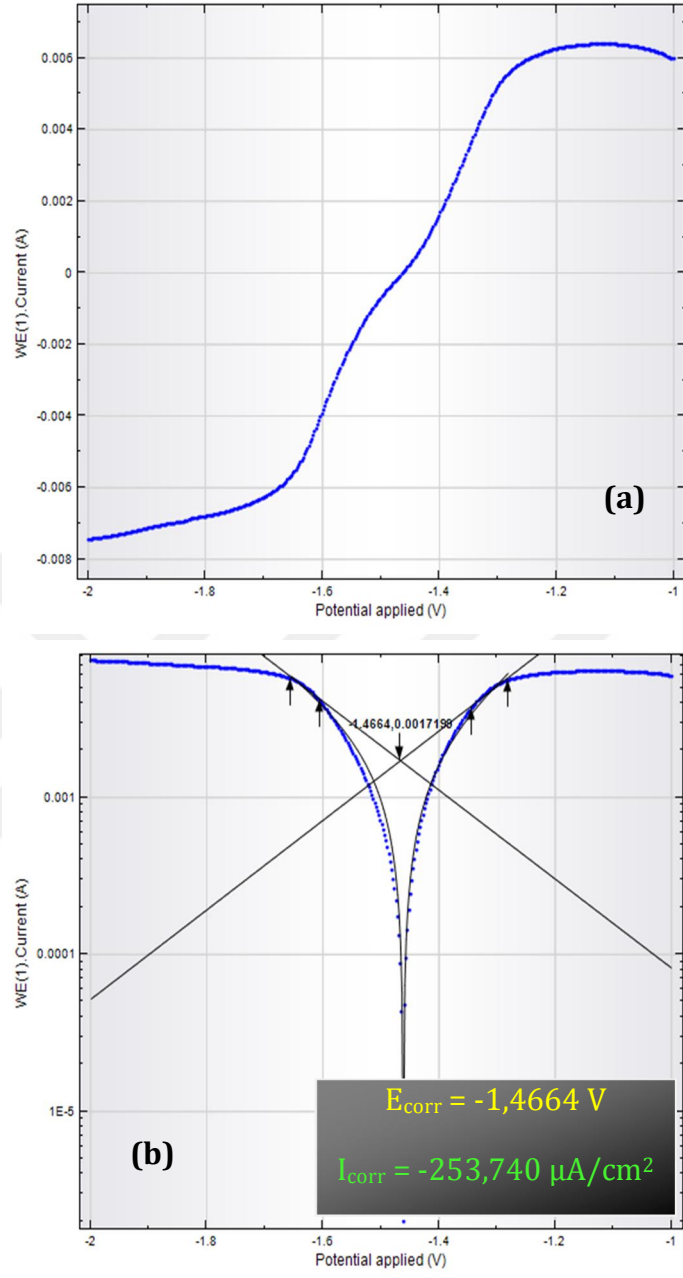
Şekil A.1. T2 Deney No lu TiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi



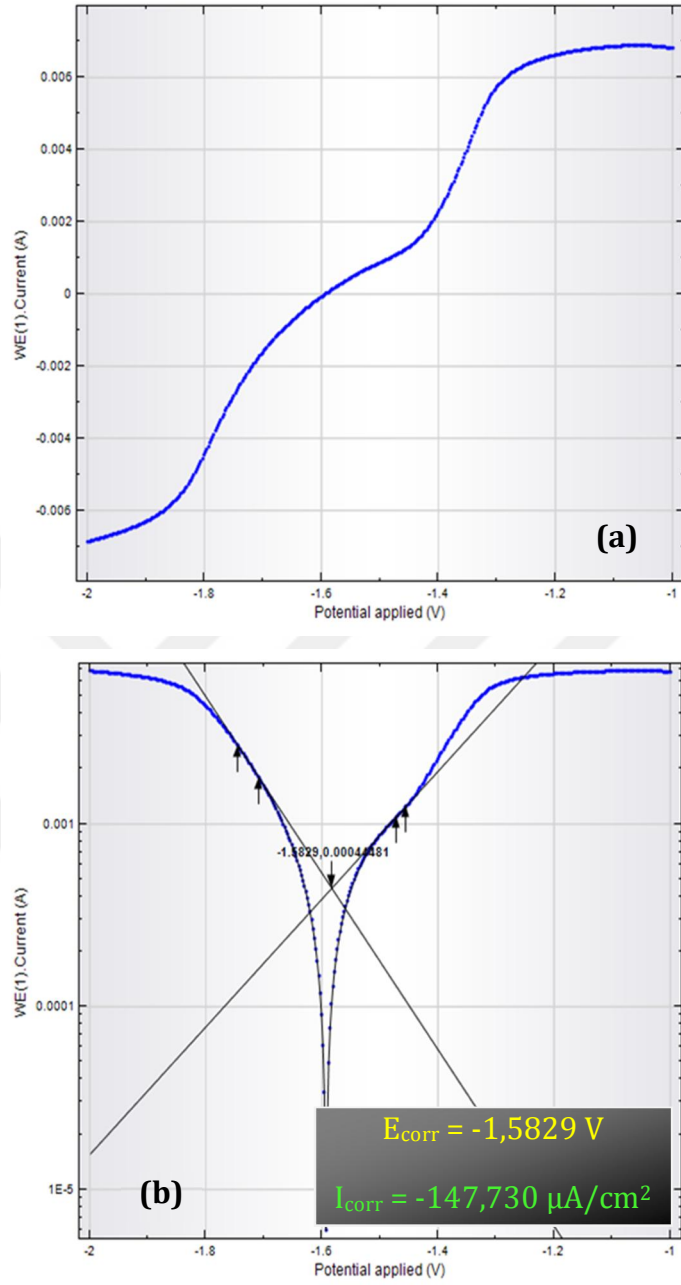
Şekil A.2. T3 Deney No lu TiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi



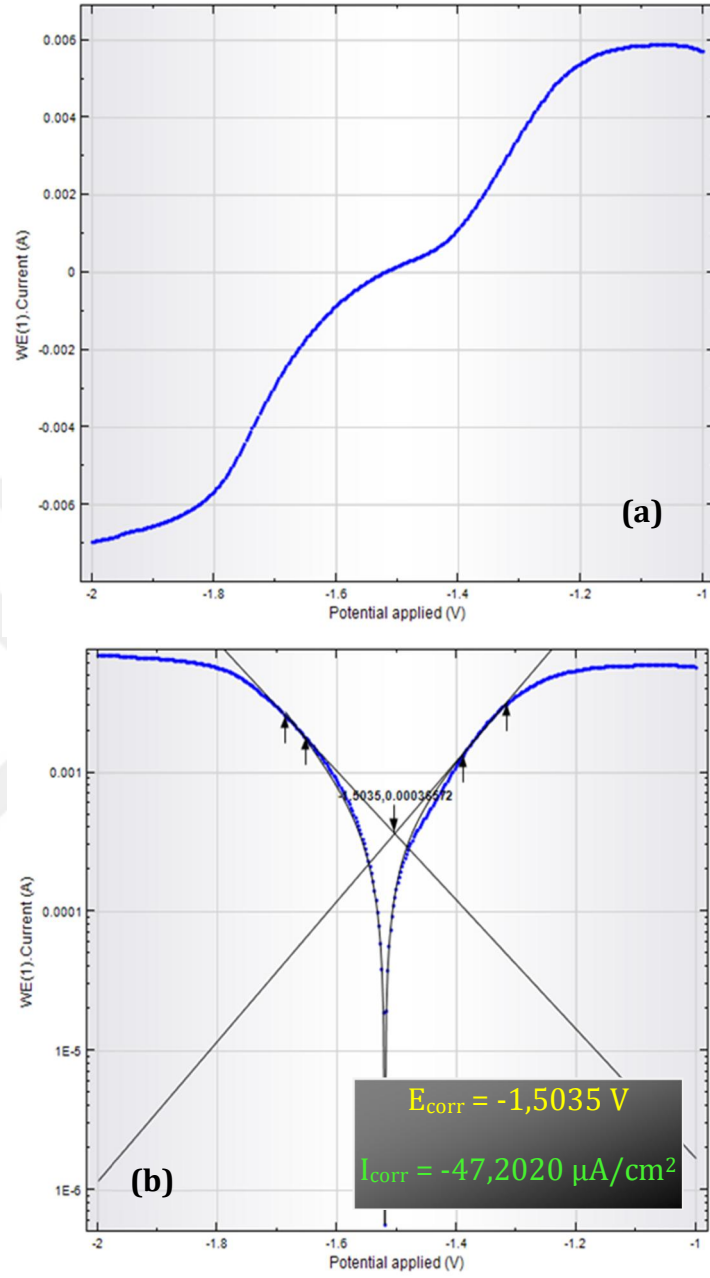
Şekil A.3. AT1 Deney No lu AlTiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi



Şekil A.4. AT2 Deney No lu AlTiN kaplamalı AZ91 Mg alaşımlarının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

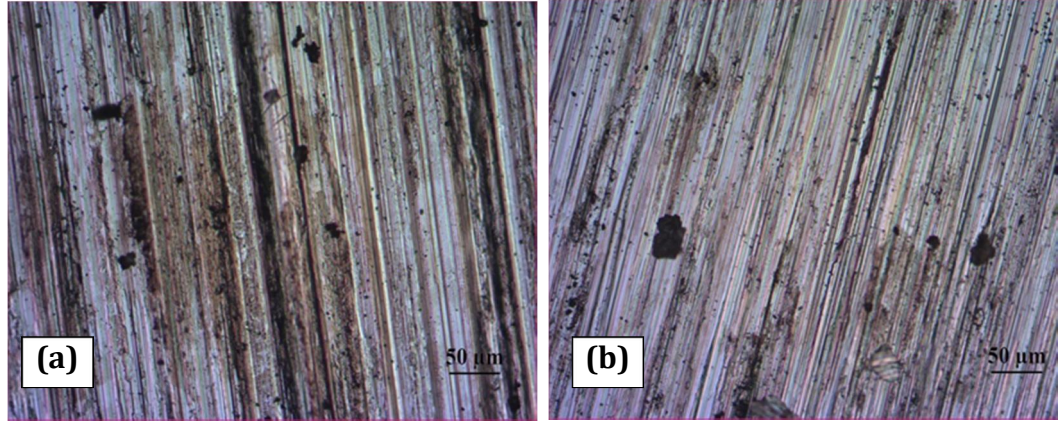


Şekil A.5. Z2 Deney No lu ZrN kaplamalı AZ91 Mg alaşımının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

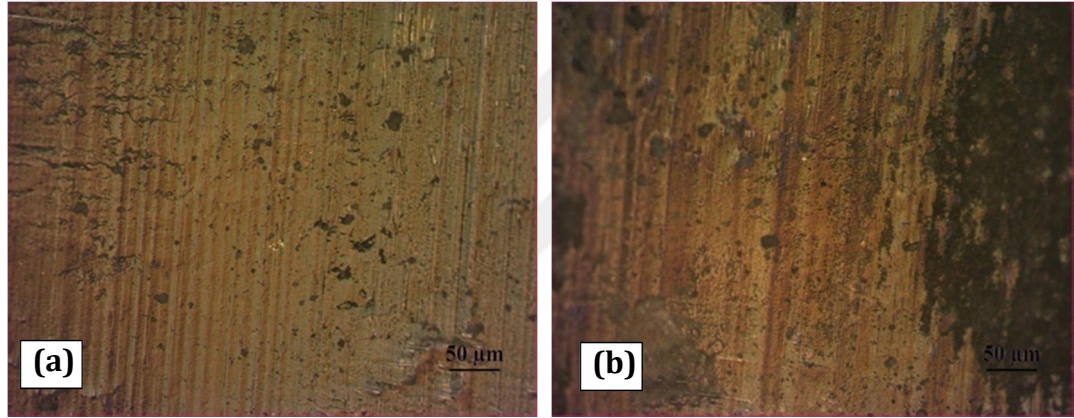


Şekil A.6. Z3 Deney No lu ZrN kaplamalı AZ91 Mg alaşımlarının a) Potansiyel grafiği, b) Tafel eğrisi

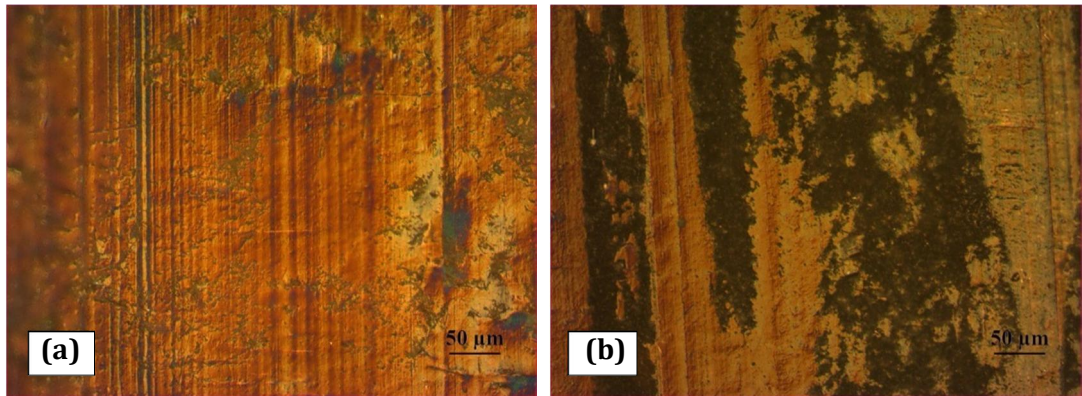
EK B. Aşınma Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri



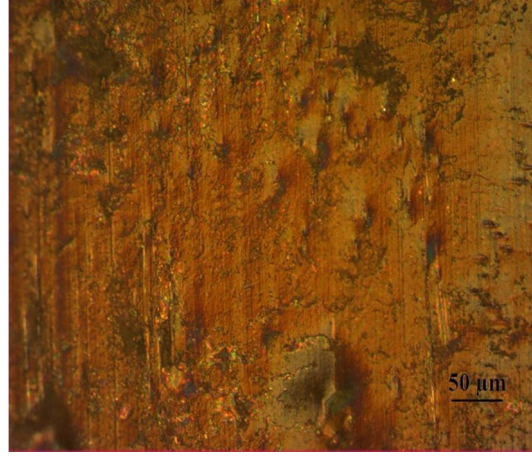
Şekil B.1. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a)10N yük - 0,1 m/s hız - 500m sürtünme mesafesi, b)10N yük - 0,75 m/s hız - 2000m sürtünme mesafesi



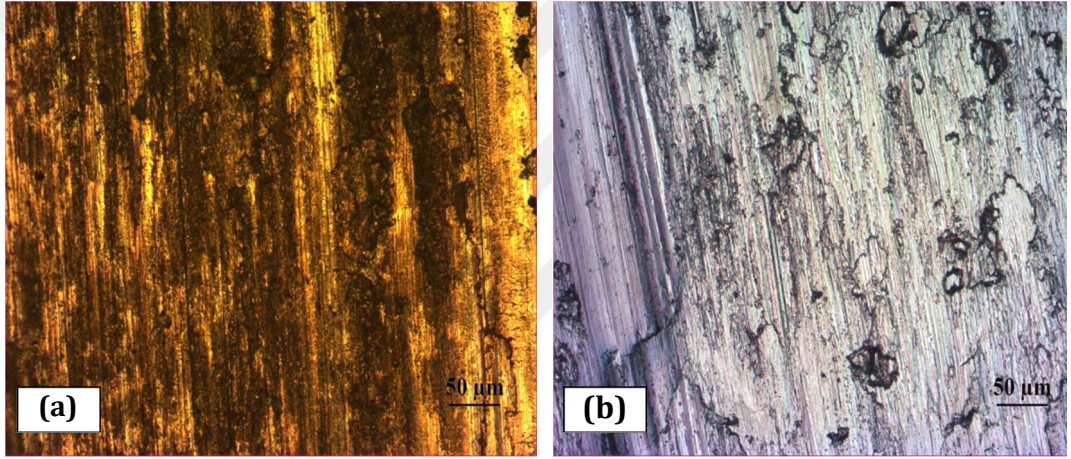
Şekil B.2. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi



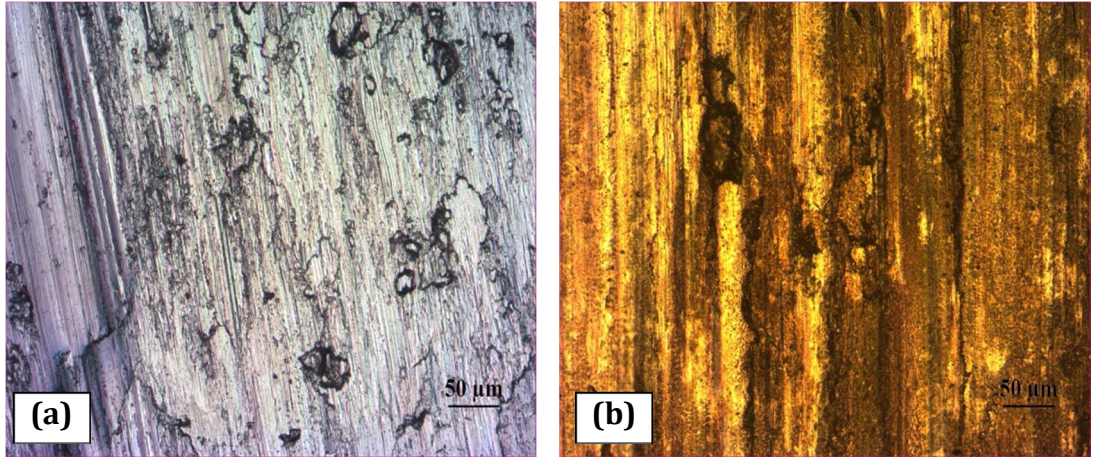
Şekil B.3. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi



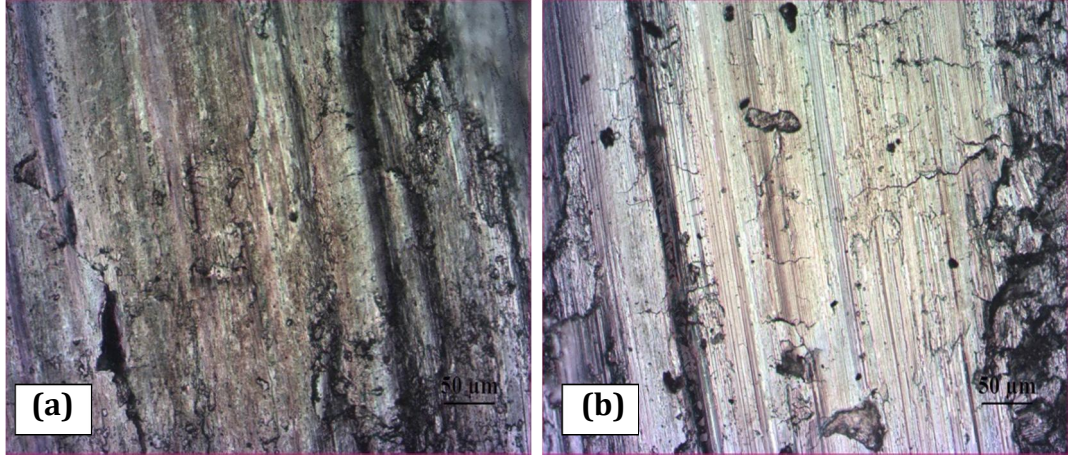
Şekil B.4. FR-4 cam takviyeli epoksi kompozitin deney şartlarına göre 30 N yük – 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesindeki optik aşınmış yüzey görüntüleri



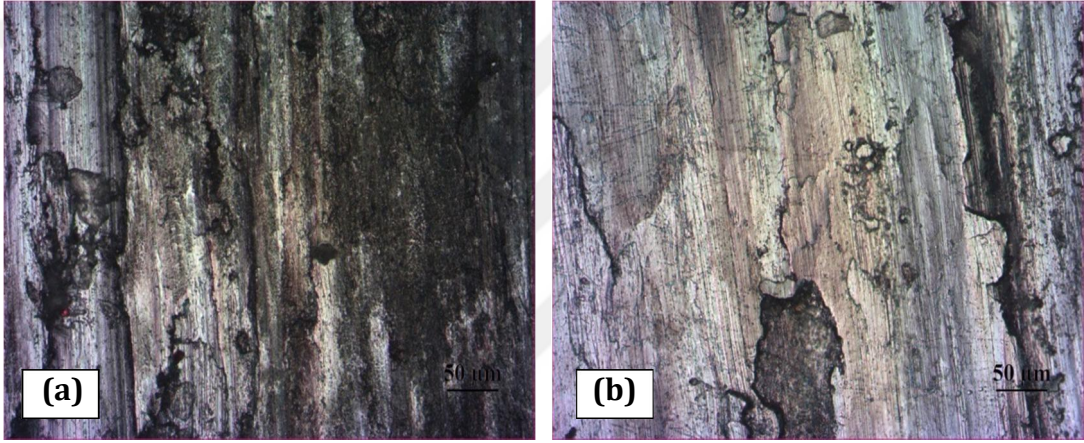
Şekil B.5. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük – 0,1 m/s hız – 500 m sürtünme mesafesi



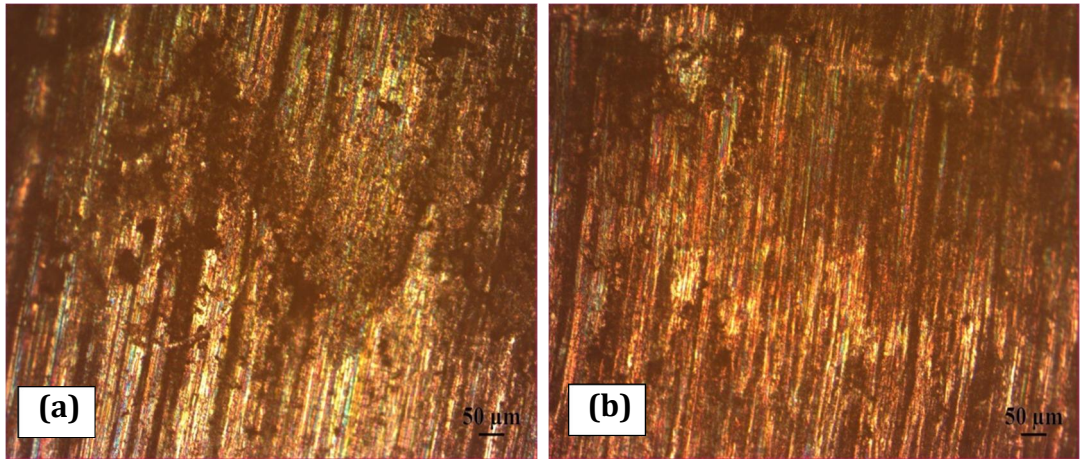
Şekil B.6. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 30 N yük – 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 10 N yük – 0,4 m/s hız – 1000 m sürtünme mesafesi



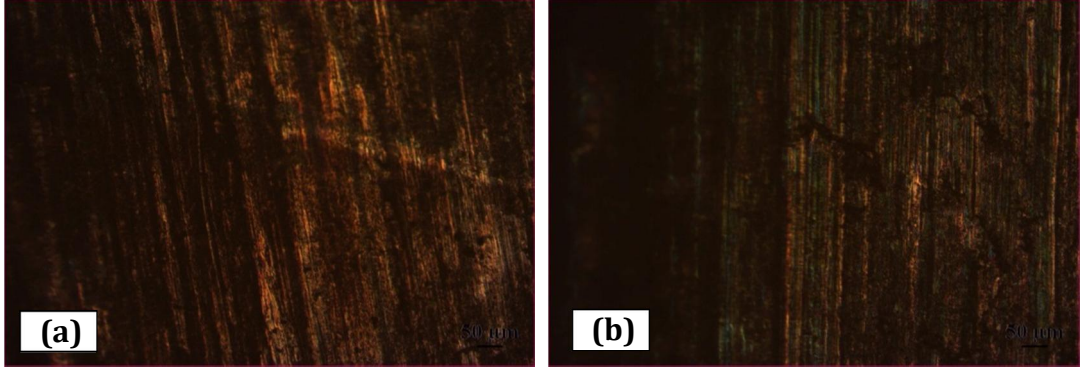
Şekil B.7. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi



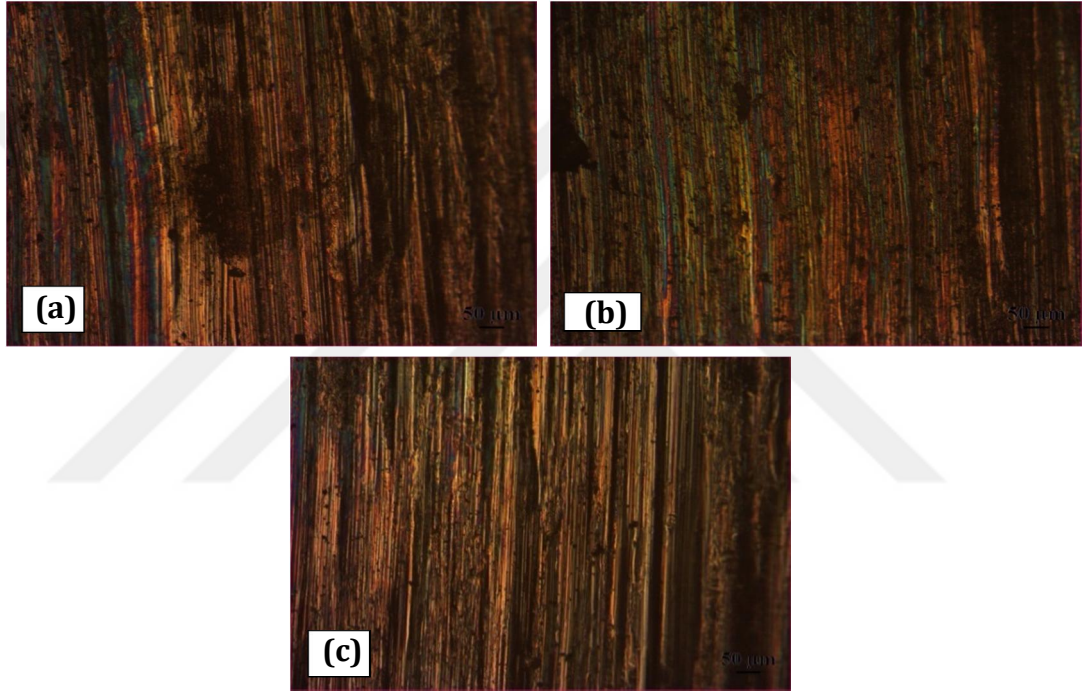
Şekil B.8. Etial 150 alüminyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi



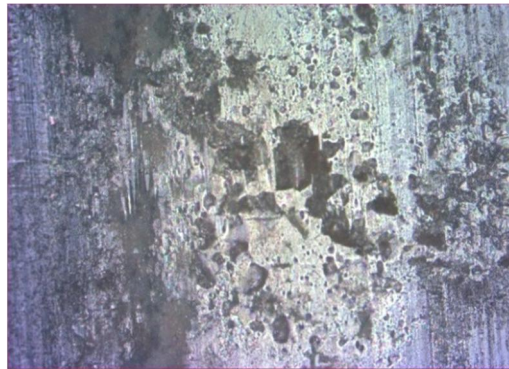
Şekil B.9. AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 10 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi



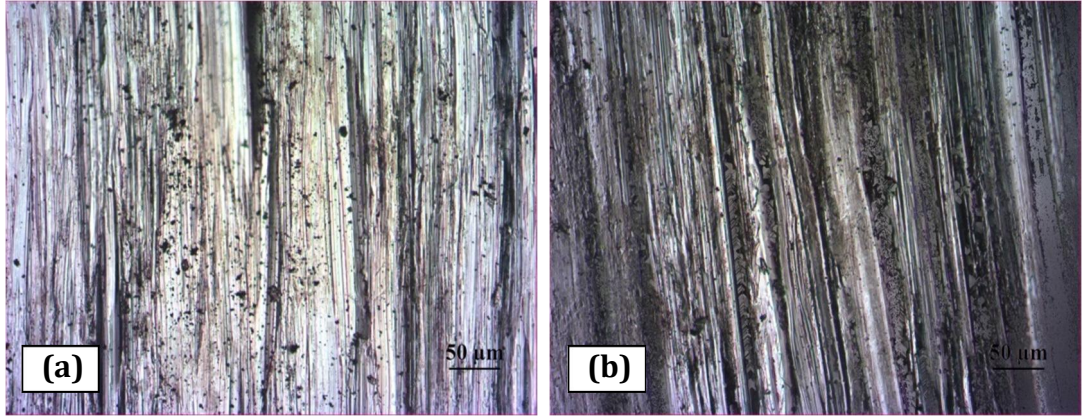
Şekil B.10. AZ91 magnezyum alaşımlarının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi



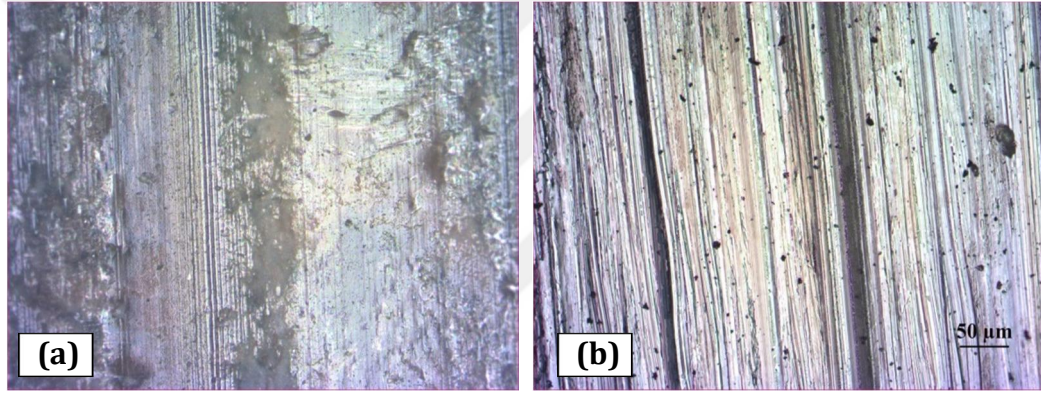
Şekil B.11. AZ91 magnezyum alaşımlarının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 20 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi, b) 30 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, c) 30 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m



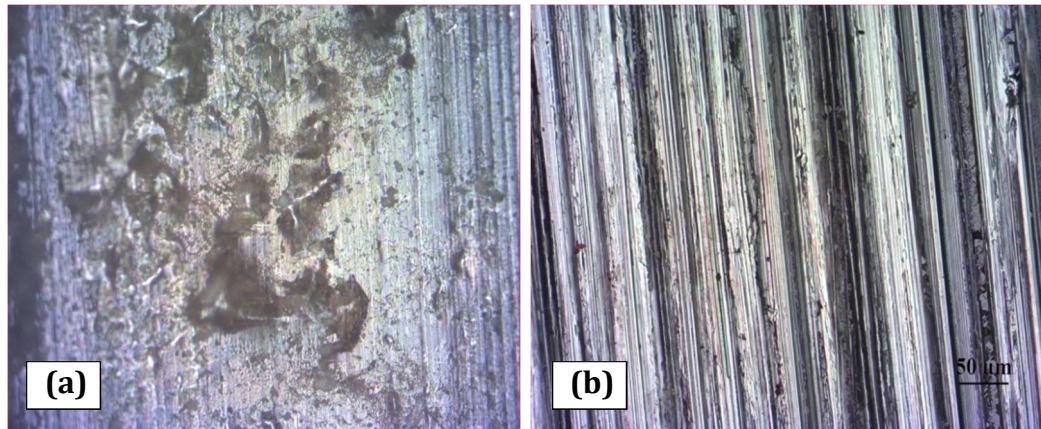
Şekil B.12. MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımlarının deney şartlarına göre 30 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesindeki yüzey görüntüleri



Şekil B.13. MgO'lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,1 m/s hız - 500 m sürtünme mesafesi



Şekil B.14. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 10 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi



Şekil B.15. MgO' lu AZ91 magnezyum alaşımının deney şartlarına göre optik aşınmış yüzey görüntüleri a) 30 N yük - 0,4 m/s hız - 1000 m sürtünme mesafesi, b) 20 N yük - 0,75 m/s hız - 2000 m sürtünme mesafesi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre AYKAN
Doğum Yeri ve Yılı : Bursa, 1988
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
e-posta : emreaykan88@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Bursa Tophane Anadolu Meslek Lisesi, Bilgisayar, 2006
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Tasarım ve Konstrüksiyon
Öğretmenliği, 2012
Lisans : Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 2017

Mesleki Deneyim

Epsan Plastik A.Ş. 2013-2014

Yayınlar

Yalçın, B., , Kıran, K., Aykan, E., Çolak, O., 2013. Experimental Study on Machinability of AISI H13 Tool Steel., Proceedings of the 12th International Conference on Management of Innovative Technologies & 4th International Conference on Sustainable Life in Manufacturing MIT&SLIM 2013., pp:179-184., Slovenia.