

# OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ KOROZYON DAYANIMINA ARK PVD SERAMİK FİLM KAPLAMALARIN ETKİSİ

**Bekir Yalçın \*, Emre Aykan**

Geliş Tarihi/ Received: 19.09.2018, Kabul tarihi/Accepted: 30.10.2018

## Özet

Günümüz otomotiv sektörü, daha az yakıt sarfıyatı ve düşük gaz emisyonunun sağlanması için magnezyum (Mg) gibi hafif ve kolay şekillendirilebilen malzemelerin kullanılmasına yoğunlaşmıştır. Yapılan araştırmada, bu alaşımların düşük korozyon dayanımına sahip olduğu ve ilave kaplama yöntemleri ile geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, çalışmada otomotiv sektörü malzemesi olan AZ91 Mg alaşımı Ark PVD yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak TiN, AlTiN ve ZrN kaplanmış ve kaplamaların korozyon dayanımına etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu seramik film kaplamaların AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımını ciddi bir şekilde arttırdığı ve ortalama olarak AlTiN kaplı AZ91 Mg alaşımının en yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu, bunu sırasıyla TiN ve ZrN kaplamalı AZ91 Mg alaşımları takip etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** AZ91 magnezyum, Ark PVD kaplama, korozyon.

## THE EFFECT OF ARC PVD CERAMIC FILM COATINGS ON TO AZ91 MAGNESIUM ALLOY USED IN AUTOMOTIVE SECTOR ON ITS CORROSION STRENGTH

### Abstract

Today's the automotive sector have extremely focused on using of magnesium (Mg) alloys which has low weight and easy to manufacture, to provide low fuel conception and gas emission. It has been reached that these alloys has low corrosion strength, and need to be improve its corrosion strength by additional coating processes in the literature surveys. With this aim, TiN, AlTiN and ZrN was coated by Arc PVD method using different coating parameters on AZ91 Mg material used in automotive sector, then, the effect of these coatings on its corrosion strength was experimentally determined. It is observed from test results, these coatings severely increased corrosion strength of AZ91 Mg materials and AlTiN coated AZ91 Mg alloys has the best corrosion strength, secondly TiN coated and finally ZrN coated, respectively.

**Key Words:** AZ91 magnesium, Arc PVD coatings, corrosion.

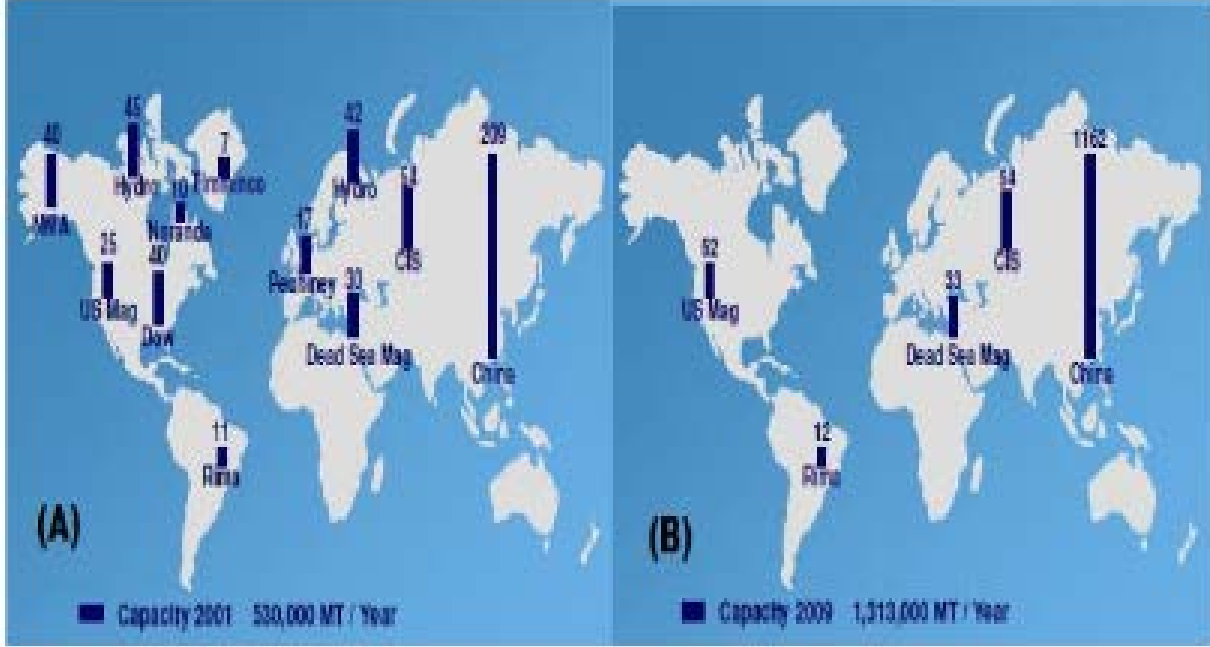
\* Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye  
E-posta: bekiryalcin@isparta.edu.tr

## 1. Giriş

Magnezyum (Mg) ve alüminyum (Al) alaşımları, başta otomotiv sektörü olmak üzere hafiflik gerektiren uzay/uçak, medikal ve elektronik sektörlerde uygulama alanı bulmuş ve özellikle otomotiv endüstrisinde daha az yakıt tüketimi ve yakıt emisyonu kısıtlamalarından dolayı Mg alaşımlarının kullanılma eğilimi giderek artmaktadır. Bazı çalışmalarda bunun nedeniyle ilgili, Mg alaşımlarının ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ) Al alaşımlarına ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) ve çelik malzemelere ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ) göre daha düşük yoğunlukta olması ve özgül dayanımın ön plana çıktığı otomobil parçalarının imalatında yeterli dayanıma ve daha yüksek özgül dayanıma sahip olması gibi yorumlamalara rastlanılmaktadır (Tang vd., 2008; Mert ve Özdemir, 2011; Blawert vd., 2004; Jin vd., 2007). Bununla birlikte, Mg alaşımlarının, kendisine muadil sayılabilecek Al alaşımlarına göre daha iyi titreşim ve ses sönümlenme kabiliyeti, mükemmel dökülebilirlik ve kolay şekillendirilebilirlik, yüksek özgül elastisite modülü ve süneklik karakteri, iyi ısı transferi ve geri dönüşümü gibi özelliklerinden dolayı ilgili sektörlerde yaygınlaştığı ifade edilmektedir (Mert ve Özdemir, 2011; Blawert vd., 2004; Jin vd., 2007). Bu özellikleri ile dikkati çeken Mg alaşımların, otomotiv sektöründe tekerlek jantları, paneller, yağ tapaları, alternatör parçaları, koltuk iskeletleri, krank ve dişli kutuları, pistonlar, radyatör panelleri ve debriyaj pedalları gibi parçaların imalatında kullanıldığı rapor edilmektedir (Buldum vd., 2012; Musfirah vd., 2012). Özellikle, Gwynne ve Lyon (2007), Boeing 727 uçağında 1200 adet Mg esaslı parça bulunduğunu ve bu parçaların genellikle kuyruk kanatları, giriş ve çıkış kapılarının iskeletleri, kontrol panosu, aktuatörs, bazı dişli çarklar, motor dişli kutuları, kontrol pedalları ve yüke maruz kalmayan bağlama elemanlarından oluştuğunu ifade etmektedirler. Ayrıca, Mg elementinin insan metabolizması için temel bir element olduğu, bir insan bedeninin yaklaşık 24 gr Mg içerdiği, bedendeki Mg içeriğinin %54' ünün kemiklerde depolandığı ve biyouyumlu Mg alaşımlarının implant uygulamalarında yüksek biyouyumluluğu sahip olduğu da ileri sürülmektedir (Vormann, 2003). Bu bağlamda, dünyanın en büyük yatırımlarının yapıldığı ve yüksek istihdam potansiyeline sahip otomotiv sektörü, düşük yakıt tüketimi ve emisyon kısıtlamalarından dolayı yüksek performanslı ve hafif malzemelerin kullanımına yönelmiş ve özellikle de elektrikli araçların sektöre girmesiyle de bu hafif malzemelerin kullanımının daha da önemli hale geldiği belirtilmektedir (Odd, 2013; Pişkin, 2017). Örneğin, bir araçtaki %10'luk ağırlık azalmasının 100 km' de 0,8 lt yakıt sarfiyatı sağladığı, 0 ila 100 km/saat arasında hızlanma sürecini 0,5 saniye düşürdüğü, yavaşlamada da 3 m avantaj sağladığı ve yakıt emisyonunda da %7 azalma olduğu ileri sürülmektedir (Sweeder, 2000; Mert vd., 2010). Bilindiği üzere, otomotiv sektörü elektrikli araçların üretimi üzerine yoğunlaşmış olup, yukarıda sıralanan parçaların düşük yoğunluklu malzemelerden imal edilerek daha az elektrik sarfiyatı ile daha uzun süre yol kat edilebileceği ve özellikle de Mg esaslı bataryaların uzun süreli şarj edilebilme ve daha yüksek elektrik enerji depolama kapasitesinden dolayı da lityum bataryaların yerini alacağı rapor edilmektedir (Edelstein, 2016). Intlmag (2018)' in raporunda ise, Mercedes, Audi, Ford, Jaguar, Fiat, Kia otomotiv markalarında yakıt tankı, tekerlek, koltuk iskeletleri ve dişli kutuları gibi parçalarda çelik ve alüminyum alaşımlarının yerini Mg alaşımının aldığı vurgulanmaktadır. Raviv (1996)', Volkswagen' in, ilgili parçalarını basınçlı Mg döküm ile imal etmek için, 50000 ton/yıl Mg üretim potansiyeline sahip İsrail firmasıyla (DSM, Dead Sea Magnesium) işbirliği içerisinde olduğunu ifade etmektedir.

Kuzey Amerika ve Avrupa' daki otomotiv üreticileri, taşıtların hafifletilmesi ile yakıt tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu düşürerek çevreye ve ekonomiye katkılar sağlanabileceği düşüncesi ile gelecekte taşıtların %25 daha düşük yakıt sarfiyatına ve %30 daha az CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip olacağını rapor etmektedirler (Küleççi, 2007). Bu hedefe yönelik, otomobilde Mg kullanımı giderek artmış ve buna paralel olarak ta Mg endüstrisinde %15

büyümenin olduğu ileri sürülmektedir (Küleççi, 2007). Patzer (2009)' da, Mg eldesinde Çin' in başı çektiğini ve 2001 yılında 500000 MT/yıl, 2009 yılında ise 1313000 MT/yıl üretim kapasitesine sahip olduğunu ileri sürmekte olup, dünyada Mg eldesinin yapıldığı diğer bölgeler Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Çin' in Mg eldesindeki kapasitesi ve diğer alanlar (Ertaş vd.,2015).

Mg alaşımlarının karakterizasyonu ile ilgili bazı bilimsel çalışmalar incelenmiş olup, örneğin, Mg alaşımının belirtilen özelliklerine karşın yüksek kimyasal afinitesinden dolayı korozyona uğraması ve aşınma direncinin düşük olmasının kullanım alanını kısıtlayıcı bir özellik olarak görülmektedir. Korozyona karşı direncinin artırılmasıyla korozif ortamlarda çalışma ömrünü iyileştirmek adına Mg üzerine yapılabilecek kaplamalarla ilgili çok sayıda araştırmanın yapıldığı görülmüştür (Li vd., 2011; Lv vd., 2010; Muhaffel, 2012; Barchiche vd., 2007). %0,2–0,5 Ti içeren AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışının incelendiği bir çalışmada (Candan, 2009), ağırlık kaybı ve elektrokimyasal korozyon teknikleri ile %3,5 'luk NaCl solüsyonları içerisinde yapılan korozyon deneyleri neticesinde, AZ91 Mg alaşımına titanyum (Ti) ilavesinin korozyon dayanımını kayda değer bir şekilde arttırdığı rapor edilmektedir. Yunchang vd. (2009), biyouyumlu kaplamaların korozyon dayanımına etkisini incelemek amacıyla, katodik ark ile AZ91 Mg alaşımı üzerine ZrN kaplama yapmışlardır. Vücut sıvısı çözeltisinde yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda korozyon potansiyelinde artış ve akım yoğunluğunda da azalma gözlemlenmiştir. Yaptıkları ZrN kaplamaların AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Ertaş vd. (2015), manyetik alanda sıçratma PVD tekniği ile AZ91D Mg alaşımı üzerine TiN ve VN/TiN kaplamanın korozyon dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde, kaplamaların korozyona karşı koruyucu etkiye sahip olduğunu, VN/TiN çok katmanlı kaplamanın TiN kaplamaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmektedirler.

Otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilen AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımını geliştirme amaçlı yapılan bu deneysel çalışmada, AZ91 alaşımı Ark PVD tekniği ile farklı kaplama parametreleri uygulanarak TiN, AlTiN ve ZrN sert seramik film kaplamalar ile

kaplanmış ve bu kaplamaların korozyon dayanımı üzerine etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Malzeme

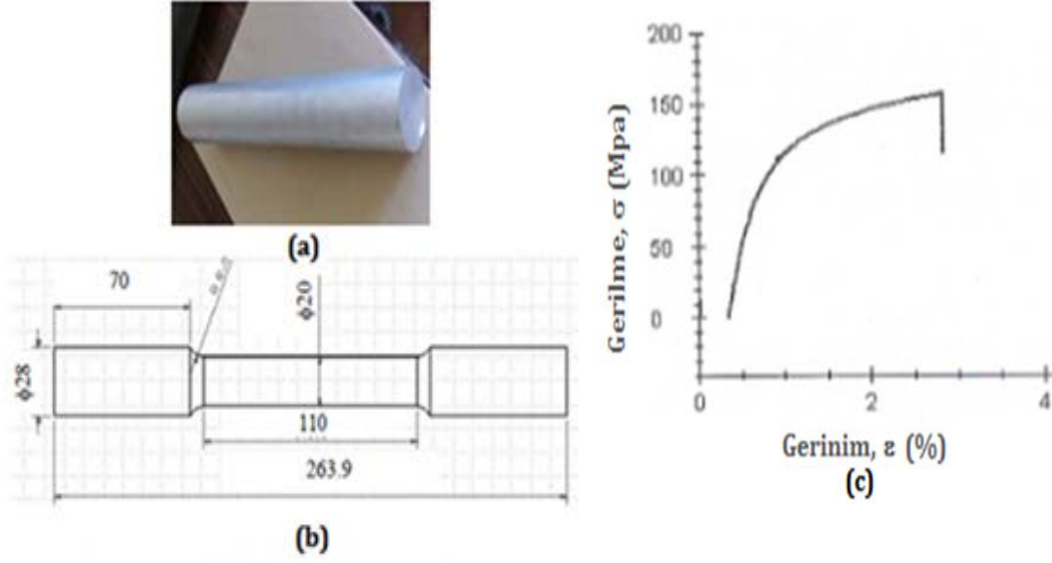
Bu çalışmada, test malzemesi olarak AZ91 Mg alaşımı belirlenmiş ve bu alaşımın kimyasal içeriği Tablo 1’ de verilmiştir. İlk olarak, AZ91 Mg alaşımını kullanarak basınçlı döküm ile Şekil 2-a’ da verilen silindirik numuneler imal edilmiş ve tornalama ile silindirik numunelerden standart statik çekme test numunesi (Şekil 2-b) elde edilmiştir. Yapılan statik çekme testi ve mikrosertlik ölçümlerinde, AZ91 Mg malzemenin ortalama çekme dayanımı 156,06 MPa ve sertlik değerinin de ortalama 63 HV ölçülmüştür (Şekil 2-c).

Tablo 1. AZ91 Mg alaşımının kimyasal içeriği (%)

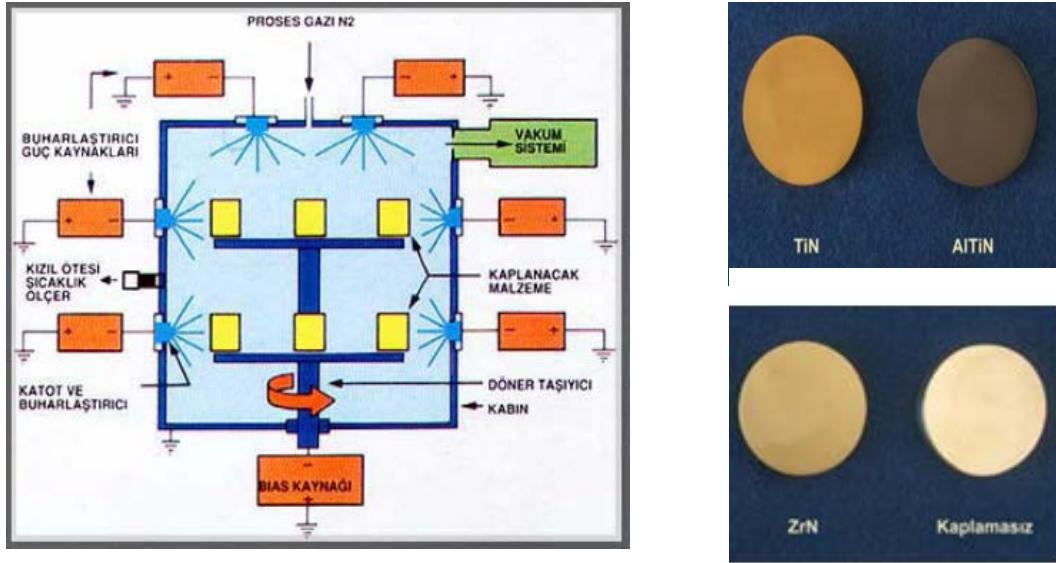
Al	Zn	Mn	Mg
9,28	0,78	0,18	Kalanı

### 2.2. Ark PVD kaplama metodu

Ark PVD kaplanacak numuneler, Şekil 2-a’ da verilen silindirik parçadan tornalama ve kesme işlemleri ile disk şeklinde (çap 54 mm, kalınlık 10 mm) imal edilmiş ve kaplama öncesi parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyleri parlatılan ve kaplamaya uygun hale getirilen AZ91 Mg disk malzeme, Şekil 3’ de verilen Ark PVD yöntemi ile belirlenen değişik kaplama parametreleri (Tablo 2) ile kaplanmıştır (Şekil 4). Tablo 2’ de verilen kaplama parametreleri literatür araştırması (Aykan, 2018) ile belirlenmiştir. Tablo 2’ de verilen kodlamalardan T, TiN kaplamayı, AT AlTiN kaplamayı ve Z ZrN kaplamayı ve K ise kaplamasız numuneleri ifade etmektedir. Ayrıca, kaplanacak malzeme ile katot arası uzaklık 140 mm ve taban malzeme (AZ 91 Mg) sıcaklığı yaklaşık 200oC olup, TiN kaplama için katot akımı 55 A ve vakum basıncı 4 Torr, sırasıyla AlTiN kaplama için 40 A ve 8 Torr, ZrN kaplama için 55 A ve 8 Torr uygulanmıştır.



Şekil 2. a) Basınçlı döküm AZ 91 Mg numune, b) çekme numunesi, c) çekme testi sonucu  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi (Yalçın ve Özileri, 2015)



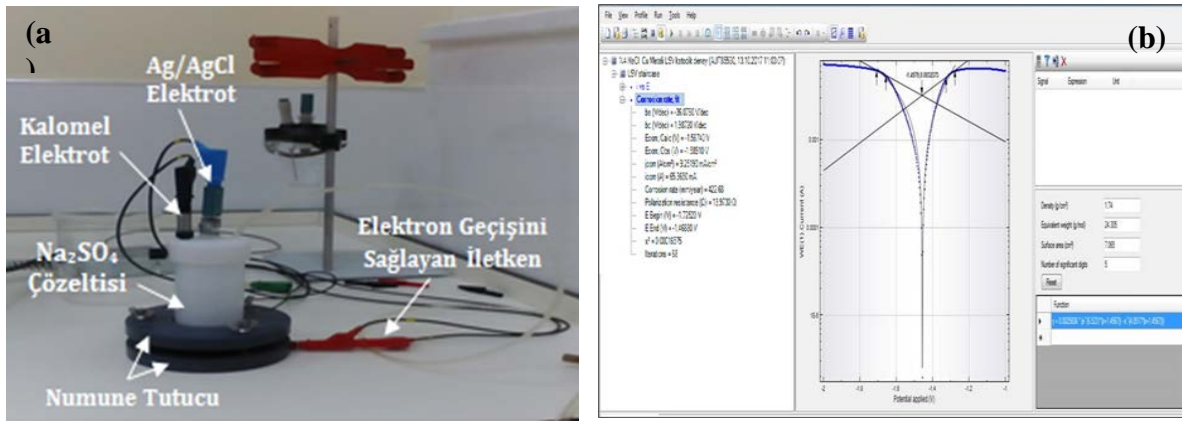
Şekil 3. Ark PVD kaplama metodunun şematığı (Bozkurt, 2016) ve kaplanan numuneler

Tablo 2. Ark PVD kaplama parametreleri

Kod	Kaplama Tipi	Tutma Sıcaklığı (°C)	Bias Voltajı (Volt)	Tutma Süresi (dk.)
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	-	-	-

### 2.3. Korozyon testleri

Korozyon testleri, oda sıcaklığında ve elektro-kimyasal yöntem ile (Şekil 4) 40 mm çapa ve 120 mm yüksekliğe sahip korozyona uğramayan ve yalıtkan olan polimer korozyon hücresi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon testlerinde, referans elektrot (RE) olarak doygun gümüş klorür (Ag/AgCl), karşıt elektrot (CE) olarak doygun kalomel çubuk ve çalışma elektrotu (WE) olarak da AZ91 Mg test numunesi olmak üzere üçlü elektrot tekniğine sahip AUTOLAB marka potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılmıştır (Şekil 4-a). Korozyon testleri, Tablo 3' de verilen korozyon test parametreleri ile yapılmıştır. Korozyon testleri neticesinde, tafel ekstrapolasyon (Şekil 4-b) yapılan her bir kaplamanın ve kaplamasız AZ91 Mg malzemenin korozyon potansiyeli ( $I_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) belirlenmiştir. Burada, korozyon akım yoğunluğu korozyon dayanımının bir ifadesidir.



Şekil 4. a) Elektrokimyasal korozyon test düzeneği, b) Korozyon potansiyeli ( $I_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunluğunu ( $I_{corr}$ ) belirlemek için uygulanan polarizasyon diyagramı

Tablo 3. Korozyon test parametreleri

Solüsyon	Na2SO4
Konsantrasyon (%)	3
Referans Elektrot	Gümüş Klorür (Ag; AgCl)
Karşı 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

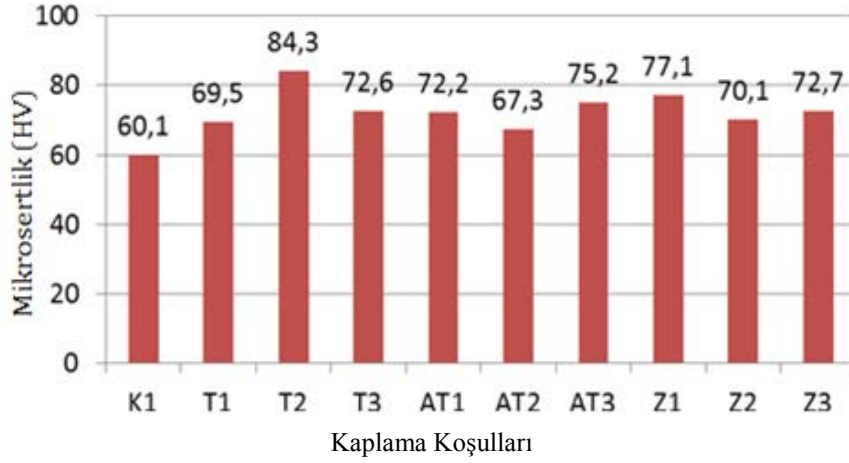
## 2.4. Metalografik analizler

TiN, AlTiN ve ZrN kaplamaların kaplama kalınlıklarının ölçülmesinde Novanosem 650 marka SEM mikroskobu ve korozyona uğramış test numunelerinin karakterizasyonu için Supra 40VP marka SEM mikroskobu kullanılmıştır.

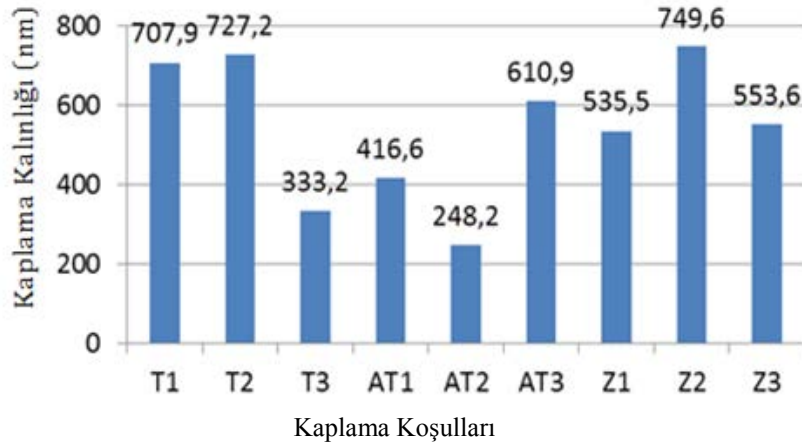
## 3. Araştırma Bulguları

### 3.1. Kaplama kalınlığı ve mikro sertlik sonuçları

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, AZ91 Mg alaşımı üzerine yapılan TiN, AlTiN ve ZrN kaplamaların mikro sertlik değerleri Şekil 5' de verilmiştir. Kaplanmamış AZ91 Mg alaşımının ortalama mikro sertlik değeri 63 HV ölçülürken, seramik film kaplı malzemelerde en yüksek mikrosertlik değerleri sırasıyla; T2 şartlarıyla TiN kaplı AZ91 Mg malzemede 84,3 HV, AT3 şartlarıyla AlTiN kaplı AZ91 Mg malzemede 75,2 HV ve Z1 şartlarıyla ZrN kaplı AZ91 Mg malzemede 77,1 HV ölçülmüştür. TiN kaplamada, bias voltajının 150 V' tan 200 V' a artırılması ve tutma süresi 20 dakika olması durumunda mikrosertlik değerinin 69,5 HV' den 84,3 HV değerine artarken, AlTiN kaplamada bias voltajı 200 V' tan 250 V' a artması ile mikrosertlik değerinin 77,2 HV' den 67,3 HV değerine düşmüştür. Dolayısıyla, AlTiN kaplamada bias voltajının mikro sertliği olumsuz yönde etkilediği ifade edilebilir. Benzer olarak, Şekil 6' da görüleceği üzere, ZrN kaplamada bias voltajının mikro sertliğe etkisi olumsuz yönde olmuştur (Z1 ve Z2 kaplama şartları). Ayrıca, TiN kaplamada tutma süresinin 20 dakikadan 30 dakikaya artırılması durumunda, mikro sertlikte % 4,6 artış (T1 ve T3 kaplama şartları), AlTiN kaplamanın mikro sertliğinde ise %10,5 artış (AT1 ve AT3 kaplama şartları) ve ZrN kaplamanın mikro sertliğinde de % 5,7 düşüş (Z1 ve Z3 kaplama şartları) görülmüştür. Ancak, sert seramik kaplamaların AZ91 Mg alaşımının mikro sertliğini etkili bir şekilde arttırmadığı ifade edilebilir.



Şekil 5. Sert seramik film kaplamalı numunelerin mikro sertlikleri



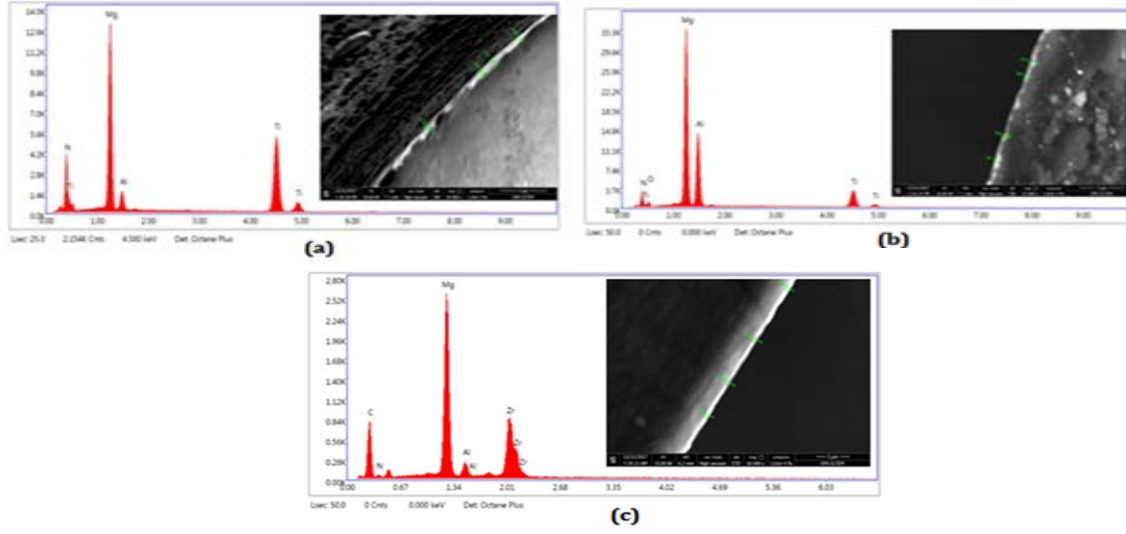
Şekil 6. Sert seramik film kaplamaların tabaka kalınlıkları

Şekil 6' da verilen kaplama kalınlığı ölçüm sonuçlarına göre, en yüksek tabaka kalınlığı, 749,6 nm ile ZrN kaplamada, en düşük ise 248,2 nm ile AlTiN kaplamada elde edilmiştir. TiN kaplamada ise, maksimum tabaka kalınlığı 727,2 nm ile tutma sıcaklığı 200°C, tutma süresi 20 dakika ve 200 V bias voltajı ile elde edilmiştir. AZ91 Mg alaşımı üzerine en yüksek TiN birikimi T2 kaplama koşullarında, en yüksek AlTiN birikimi AT3 kaplama şart ile ve ZrN birikimi ise Z2 kaplama parametresi ile gerçekleşmiştir.

Şekil 7' de, kaplama kalınlıklarının tayini sırasında yapılan SEM analizleri verilmiş olup, Şekil 7-a T2 kaplama parametresi ile elde edilen beyaz katmanın TiN seramik film katmanını (727,2 nm), Şekil 7-b AT1 kaplama parametresi ile 416,6 nm kalınlığa sahip AlTiN kaplamayı ve Şekil 7-c ise Z2 kaplama parametresi ile yapılan 749,1 nm kalınlığındaki ZrN kaplamayı göstermektedir. Ancak, kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına, mikro sertliğe ve korozyon dayanımına lineer bir etkisi gözlemlenmemiştir. İlgili kaplama kalınlıklarının içerikleri EDX analizleri ile de desteklenmiştir (Şekil 7). Bütün kaplama koşullarında nano düzeyde kaplama kalınlığı elde edildiğinden dolayı, belirlenen kaplama koşullarında sert seramik film kaplamaların AZ91 Mg alaşımının mikrosertliğini düşük seviyede geliştirilebilmiştir. Örneğin, kaplamasız taban malzemeye göre en iyi sertlik artışı;



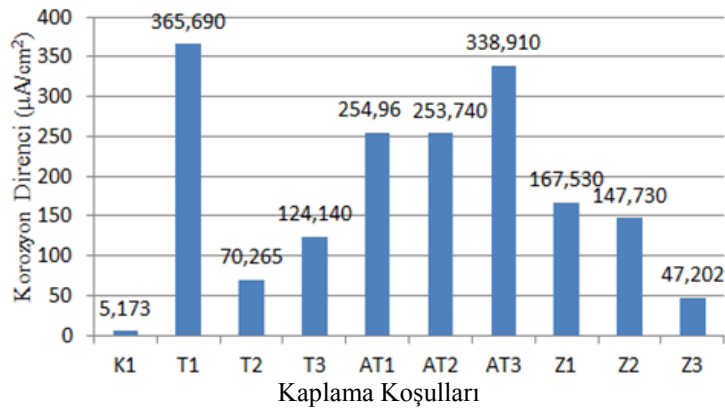
TiN kaplama ile ortalama % 33,8 mertebesinde, AlTiN kaplama ile ortalama % 15,2 ve ZrN kaplamayla da ortalama % 22,2 mertebesinde gerçekleşmiştir.



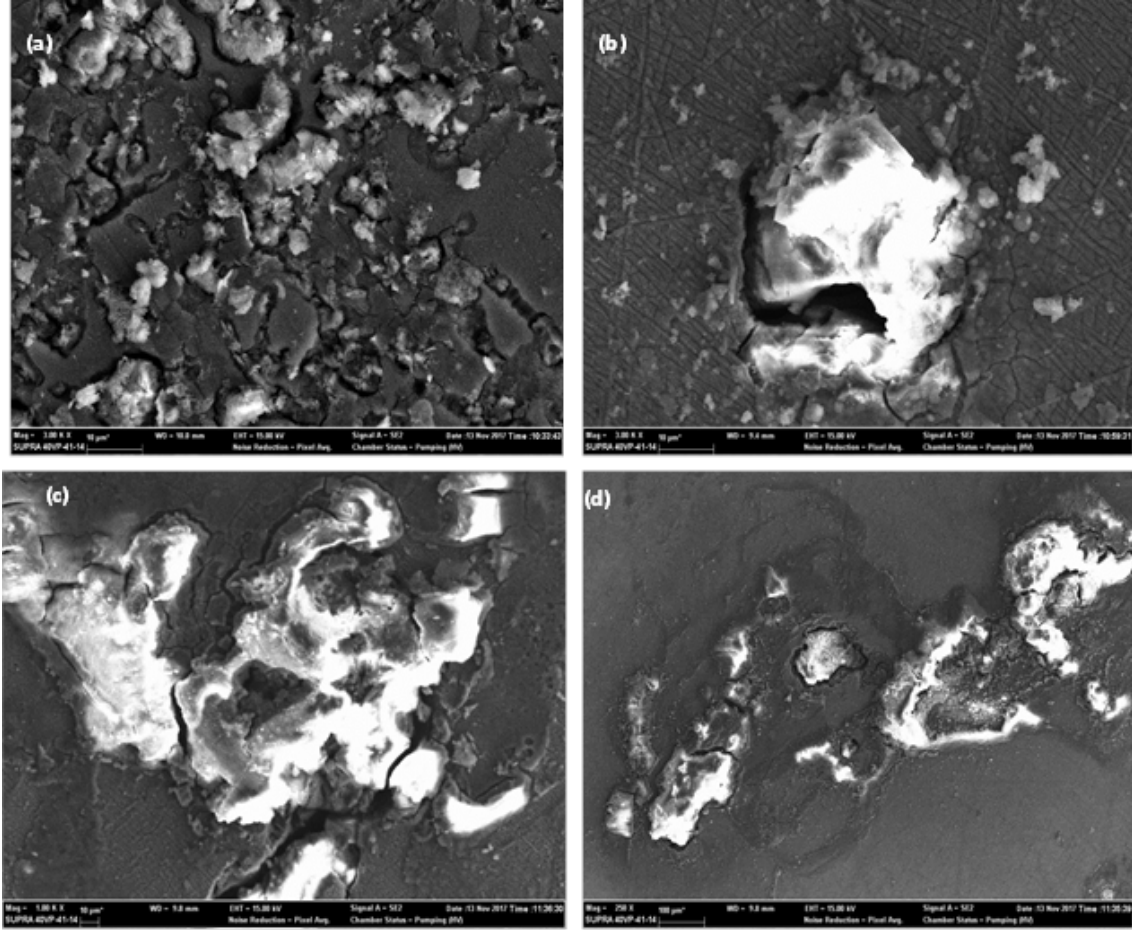
Şekil 7. SEM ve EDX analiz sonuçları, a) T2 parametresi ile TiN tabaka, b) AT1 parametresi ile AlTiN tabaka, c) Z2 kaplama parametresi ile ZrN tabaka

### 3.2. Korozyon test sonuçları

Kaplımsız AZ91 Mg alaşımı ile birlikte TiN, AlTiN ve ZrN kaplı AZ91 Mg test numunelerinin elektrokimyasal korozyon testi ve polarizasyon sonuçlarına göre elde edilen korozyon dayanımları (Icorr değerleri) Şekil 8’ de verilmiştir. Şekil 8’ e göre, kaplımsız AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımı  $I_{corr} = -5,1734 \mu A/cm^2$  ve T1 şartlarıyla TiN kaplı Mg alaşımının korozyon dayanımı  $I_{corr} = -365,690 \mu A/cm^2$  olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre, T1 şartlarıyla TiN kaplamanın kaplımsız AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımını yaklaşık 70 kat daha arttırdığı ve sırasıyla T2 şartlarıyla TiN kaplamanın yaklaşık 13,5 kat arttırdığı ve T3 şartlarıyla TiN kaplamanın ise 24 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ancak kaplama parametrelerinin değişimi ile korozyon dayanımı arasında lineer bir ilişki saptanmamıştır.



Şekil 8. Kaplımalı ve kaplımsız AZ91 Mg alaşımının korozyon dayanımı değerleri (Icorr)



Şekil 9. Yüzeylerde oluşan korozyon büyümelerine örnekler a) Kaplamasız (K1), b) TiN kaplamalı (T2), c) AlTiN kaplamalı (AT2) ve d) ZrN kaplamalı (Z3)

Ayrıca, ölçülen en yüksek korozyon dayanımları (Icorr değerleri) sırasıyla; AT3 şartlarıyla AlTiN kaplı AZ91 Mg alaşımında  $338,91 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , ve Z1 şartlarında ZrN kaplanan AZ91 Mg test numunesinde  $-167,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  elde edilmiştir. En düşük korozyon dayanımları, sırasıyla Z3 koşuluyla ZrN kaplamada, T2 koşuluyla TiN kaplamada ve AT2 koşuluyla AlTiN kaplamada görülmüştür. Bu bağlamda, T1 şartlarıyla TiN kaplama, AT1, AT2 ve AT3 şartlarıyla AlTiN kaplama, Z1 ve Z2 şartlarıyla yapılan ZrN kaplamanın korozyon dayanımı bakımından daha elverişli olduğu söylenebilir. T2 ile yapılan TiN kaplama ile Z3 koşullarında yapılan ZrN kaplamanın korozyon dayanımının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Kaplama koşullarının korozyon dayanımı üzerine lineer bir etkisi gözlemlenmemiştir. Şekil 9’ da kaplamalı ve kaplamasız AZ91 Mg alaşımının, yoğun korozyona uğradığı ile ilgili korozyon büyüme örnekleri verilmiştir. Şekil 9-a’ da verilen SEM fotoğraflarındaki ölçeklere dikkat edilecek olursa; kaplamasız AZ91 Mg alaşımında oluşan beyaz görünümündeki korozyon oluşumlarının çok sayıda yüzeye homojen dağıldığı ve kaplamalı numunenin daha uzun süre korozyona uğratılması durumunda da, gelişen korozyonun yapının tamamına ilerleyerek korozyon hasarına neden olabileceği düşünülmektedir. T2 şartlarıyla kaplanan TiN’ in korozyonun yaklaşık 30 mikron çapında lokal bir alanda geliştiği ve diğer yüzeylerin korozyondan korunduğu ifade edilebilir (Şekil 9-b). AT2 şartlarıyla AlTiN kaplanmış AZ91 Mg alaşımında, daha geniş alanda ve lokal olarak korozyon büyümeleri meydana gelmiştir. Z3 şartlarıyla ZrN kaplanan AZ91 Mg alaşımında da, yine benzer olarak lokal alanda korozyon büyümeleri tespit edilmiştir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Yapılan literatür araştırması ile günümüz otomotiv sektörü, daha az yakıt sarfiyatı ve düşük gaz emisyonunun sağlanabilmesi için, Al ve Mg gibi hafif ve kolay şekillendirilebilen malzemelerin kullanılmasına yönelmiş, ancak Mg alaşımlarının düşük korozyon dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, AZ91 Mg alaşımına yapılan Ark PVD TiN, AlTiN ve ZrN seramik film kaplamaların mikro sertliğe ve korozyon dayanımına etkisi deneysel olarak araştırılmış olup aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- İlk olarak, başlangıçta ortalama 63 HV mikrosertliğe sahip olan kaplamasız AZ91 Mg alaşımı, TiN kaplama ile ortalama 71,3 HV sertliğe, AlTiN kaplama ile ortalama 71,5 HV sertliğe ve ZrN kaplama ile de ortalama 73,3 HV mikro sertliğe sahip olmuştur.
- Başlangıçta  $-5,1734 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  korozyon dayanımına sahip olan AZ91 Mg alaşımı değişik Ark PVD kaplama parametreleri ile yapılan üç farklı numunenin ortalama korozyon dayanımları sırasıyla, TiN kaplamayla  $186,69 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , AlTiN kaplama ile  $282,53 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve ZrN kaplama ile  $120,82 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  mertebesinde ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, AZ91 Mg alaşımı üzerine belirlenen şartlarla yapılan Ark PVD film kaplamaların, korozyon dayanımını ciddi bir şekilde iyileştirdiği, ancak mikrosertliği ise nispeten iyileştirilebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına, mikro sertliğe ve korozyon dayanımına lineer bir etkisi gözlemlenmemiştir.
- Son olarak, literatürde sert seramik film kaplamalar üzerinde gelişen korozyon büyümelerinin kaplama işlemi sırasında tabakada muhtemel oluşan nano/mikro düzeyde kaplama hatalarından (çizik, delik gibi) kaynaklanabileceği rapor edilmektedir (Yılbaş vd., 1995; Sinici, 2006). Ayrıca, çalışma sırasında yapılan literatür araştırmasında, otomobil sektöründe giderek önem kazanan Mg alaşımlarının aşınma ve korozyon dayanımının mikro ark oksidasyon yöntemi ile MgO kaplanarak iyileştirilebileceği görülmüştür (Dou vd., 2017).

#### Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimince (SDÜBAP) 4145-YL1-14 nolu proje ile desteklenmiştir. SDÜBAP birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- Aykan, E., (2018). AZ91 Magnezyum Alaşımının Aşınma Davranışının Farklı Malzemelerle Deneysel Karşılaştırılması ve Üzerine Yapılan Ark PVD Kaplamaların Korozyon Dayanımına Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilimdalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- 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, 417-42.
- Blawert, C., Hort, N., Kainer, K.U., (2004). Automotive Applications of Magnesium and its Alloys. *Trans. Indian Inst. Met.*, 57, 397-408.

- Bozkurt, T., (2006). TiN, AlTiN ve AlTiN Kaplamaların Aşınma Performanslarının İncelenmesi ve Farklı Altlık Malzemede Tin Kaplamanın Etkisinin Araştırılması. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Buldum, B.B., Şık, A., Özkul, İ., (2012). Investigation of Magnesium Alloys Machinability. International Journal Of Electronics; Mechanical And Mechatronics Engineering, 2, 261-268.
- Candan, S., Kuşdemir, H., Türkmen, M., Koç, E., Ünal, M., Candan, E. (2009). AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine Ti Elementinin Etkisi. V. International Advanced Technologies Symposium, 1651-1658.
- Dou, J., Chen, Y., Yu, H., Chen, C., (2017). Research Status of Magnesium Alloys by Micro-Arc Oxidation: A Review. Surface Engineering, 33, 731-738.
- Edelstein, S. (2016). Toyota Believes Magnesium Can Solve Battery Woes, Eventually. Erişim Tarihi: 02.03.2018. <https://www.digitaltrends.com/cars/toyota-research-magnesium-batteries/>
- 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., 9, 53–57.
- Gwynne, B., Lyon, P., (2007). Magnesium Alloys in Aerospace Applications, Past Concerns, Current Solutions. 8. Triennial International Aircraft Fire & Cabin Safety Research Conference, 1-20.
- Intlmag. Automotive Applications. Erişim Tarihi: 04.03.2018. [http://www.intlmag.org/page/app\\_automotive\\_ima](http://www.intlmag.org/page/app_automotive_ima)
- Jain C.C., Koo, C.H. (2007). Creep And Corrosion Properties Of The Extruded Magnesium Alloy Containing Rare Earth. Mater Trans, 2., 265–272.
- Külekçi, M.K., (2007). Magnesium and its Alloys Applications in Automotive Industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39, 851-865.
- Li, X., Liu., X.Y., Luan, B.L. (2011). Corrosion and Wear Properties of PEO Coatings Formed on AM60B Alloy in NaAlO<sub>2</sub> Electrolytes. Applied Surface Science, 257, 9135– 9141.
- 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 AZ91D Magnesium Alloy in Phosphate Based Electrolyte. Surface & Coatings Technology, 205, 36 – 40.
- Mert, F., Özdemir, A., Karataş, Ç., (2010). Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Döküm Yöntemiyle Kalıplanabilirliğinin Değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi, 13, 165-176.

- Mert, F., Özdemir, A., (2011). Magnezyum Alaşımının Basınçlı Dökümü ve Otomotiv Uygulamaları. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 50-55.
- 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.
- Musfirah, A.H, Jaharah, A.G., (2012). Magnesium and Aluminum Alloys in Automotive Industry. Journal of Applied Sciences Research, 8, 4865-4875.
- Odd., (2013). Dünya ve Türkiye Otomotiv Sektörü, Erişim Tarihi: 01.03.2018. <http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/821/ic%20dokumanlar.pdf>,
- Patzer, G., (2010). The Magnesium Industry Today: A Global Perspective, Magnesium Technology Conference, Wauconda, 85-90.
- Pişkin, S. (2017). Türkiye Otomotiv Rekabet Gücü ve Talep Dinamikleri Perspektifinde 2020 İç Pazar Beklentileri. Erişim Tarihi: 02.03.2018. [http://osd.org.tr/Sites/1/upload/files/Otomotiv\\_Sektor\\_Raporu\\_TSKB-2208.pdf](http://osd.org.tr/Sites/1/upload/files/Otomotiv_Sektor_Raporu_TSKB-2208.pdf)
- Raviv, O. (1996). Erişim Tarihi: 06.03.2018. <http://www.globes.co.il/en/article-354713>.
- Sinici, H., (2006). Katodik ark fiziksel buhar biriktirme tekniğiyle yapılan kaplamaların AZ91 magnezyum alaşımının korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Sweeder, T., (2000). Demand for Lightweight Technology. Magnesium Expo, Michigan, USA.
- Tang, A., Pan, F., Yang, M., Cheng, R., (2008). Mechanical Properties and Microstructure of Magnesium-Aluminum Based Alloys Containing Strontium. Materials Transactions, 49, 1203-1211.
- Vormann, J., (2003). Magnesium: Nutrition and Metabolism. Mol Aspects Med, 24, 27-37.
- Yalçın, B., Özileri, E.D., (2015). Experimental Investigation on Turning of Casted Magnesium Alloy Used in Manufacturing Automotive Part. International Symposium of Advances in Materials and Processing Technologies, 14-17.
- 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, 1627-1636.
- Yunchang, X., Chenglong, L., Kaifu, H., Guoyi, T., Xiubo, T., Pasul, K.C., (2009). Corrosion Behavior of ZrN/Zr Coated Biomedical AZ91 Magnesium Alloy. Surface and Coating Technology, 203, 2554–2557.