

Grafen Katkısının Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplanmış 3005 Alaşımının Erozyon Korozyon Davranışı Üzerine Etkisi

Aysun AYDAY*¹ ORCID 0000-0003-3719-7006

Yaren BALABAN^{1,2} ORCID 0009-0003-8840-7947

Ayça ŞİMŞEK¹ ORCID 0009-0001-8621-1954

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Sakarya

²Adapazarı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş., Sakarya

Geliş tarihi: 06.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: AYDAY, A., BALABAN, Y., ŞİMŞEK, A., (2024). Grafen Katkısının Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplanmış 3005 Alaşımının Erozyon Korozyon Davranışı Üzerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 47-56.

Öz

Çalışmada 3005 alüminyum alaşımı, mikro ark oksidasyon (MAO) teknolojisi ile farklı işlem sürelerinde ve farklı oranlarda grafen ilavesi ile yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Kaplanan numunelerin yüzey karakterizasyonu, faz analizi ve erozyon korozyonu testi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrası alaşımın MAO yöntemi ile başarılı bir şekilde kaplandığı, grafen ilavesi ile daha yoğun bir kaplama tabakası elde edildiği ve yüzeydeki porların azaldığı gözlemlenmiştir. MAO sonrası numunelerde erozyon-korozyon dayanımında belirgin bir artış tespit edilmiştir. Artan grafen oranı ile erozyon korozyonu dayanımının iyileşme gösterdiği raporlanmış ve işlemsiz numuneye göre korozyon dayanımında 17,4% oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, 3005, Grafen, Mikro ark oksidasyon, Erozyon korozyonu

Effect of Graphene Addition on Erosion Corrosion Behavior of 3005 Alloy Coated by Micro-Arc Oxidation Method

Abstract

In the study, surface modification of 3005 aluminum alloy was carried out (different coating time and graphene ratios) with micro arc oxidation (MAO) technology. Surface characterization, phase analysis and erosion corrosion test of the coated samples were performed. After the process, it was observed that the alloy was coated successfully with MAO method, a denser coating layer was obtained with the addition of graphene and the pores on the surface were reduced. After MAO coating, it was detected a significant increase in erosion-corrosion resistance. It was determined that there was a 17.4% improvement in corrosion resistance with increasing graphene content.

Keywords: Aluminum, 3005, Graphene, Micro-arc oxidation, Erosion corrosion

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Aysun AYDAY, aayday@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde, alüminyum ve alaşımları oldukça geniş bir endüstriyel alanda, tıp, otomotiv, spor, havacılık gibi, birçok alanda kullanılmaktadır. Bunun da sebebi, bilindiği üzere sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek ısıl iletkenlik, geri dönüştürülebilir ve kolay şekillendirilebilir olmaları kullanım alanlarını epey arttırmıştır [1,2].

Bununla birlikte, alüminyum ve alaşımları endüstriyel uygulamalardaki kullanımalarında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Endüstride kullanılan pek çok malzeme, kullanım yerine bağlı olarak asidik/bazik kimyasallarla temas etmekte, bu durumlara bağlı olarak da farklı hasarlara uğrayabilmekte ve korozyona maruz kalmaktadır. Ayrıca, kimyasal akışların, akış debisi ve içerdiği aşındırıcı partiküller vasıtası ile aşınmaya da maruz kalabilmektedir. Bu iki etkinin bir araya gelmesi ile erozyon korozyonuna maruz kalması hem mekanik hem kimyasal olarak hasara uğradığı anlamı taşımaktadır [1,3-5]. 3005, bir alüminyum ve mangan alaşımıdır. Diğer Al alaşımlarına göre korozyon direnci de daha iyidir [3-5]. Çalışmada kullanılan 3005 alaşımı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş'den tedarik edilmiştir. 3005 alüminyum levha otomotiv sektöründe otomobil altlarında ve diğer nemli ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım yerinden kaynaklı mekanik olarak hasara uğrama yüzdesi oldukça yüksektir.

Alüminyum alaşımlarında bahsi geçen olumsuzlukların ortadan kaldırılması veya geciktirilmesi amacı ile fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, termokimyasal işlemler, plazma kaplama, anodizasyon, mikro ark oksidasyon (MAO) vs. olmak üzere birçok yüzey işlemi ile yüzey özellikleri iyileştirilmesi sağlanmaktadır [2,5]. Mikro ark oksidasyon teknolojisinde numune için herhangi bir ön hazırlık süreci olmaması diğer teknolojilere göre avantaj sağlamaktadır. Bu durum üretim sürecinde zamanda kazanç sağlarken, kaplama öncesi numune

hazırlamada kullanılan kimyasalların doğaya etkilerinin en aza indirilmesini sağlar.

Mikro ark oksidasyon teknolojisi hafif alaşımlara, alüminyum ve alüminyum alaşımlarına, titanyum gibi, magnezyum gibi, zirkonyum gibi geniş bir malzeme ağına uygulanabilmektedir. Benzer teknolojilerden anodizasyon ile kaplanması zor olan yüksek silisyum içeren parçaların ve yine yüksek oranda bakır içeren alüminyum alaşımlarının MAO ile kaplanabilmesi mümkündür. Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan kaplama çözeltileri korozif olmayan, hazırlanması kolay ve ucuz bir karışımdır. Bu hazırlanan karışımın çevreye zararı bulunmamaktadır. MAO işleminde pek çok parametre (çözelti, akım, voltaj, süre) kaplama sonuçlarını etkilediği yapılan çalışmalardan dolayı bilinmektedir. Bu yöntem sayesinde istenilen kalınlıkta oksit tabakası, yüzey sertliği, porozite dağılımı ve oranı, kaplama yapışma dayanımı gibi özellikler optimum işlem parametreleri belirlenerek oldukça düşük maliyette seramik esaslı kaplamalar üretilebilmektedir [6,7].

Yapılan son araştırmalarda, kaplama çözeltilerine ilave edilen takviye malzemeleri ile nano tozlar, seramik takviyeleri gibi kaplamanın mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Chen ve arkadaşları [8], grafen oksidin korozyon dayanımı üzerinde ki olumlu etkisini araştırmışlardır. Ayday ve arkadaşları [9], TiO₂ takviyesinin MAO işleminde Ti alaşımları ve korozyon dayanımı üzerindeki olumlu etkilerini araştırmışlardır. Kaseem ve arkadaşları [10] MoO₂ ve ZrO₂ partiküllerin kaplama karakterizasyonu ve korozyon dayanımına olan etkisi tartışmışlardır. Grafen etkisi son yıllarda özellikle dikkat çeken, MAO kaplama çalışmalarında da etkisi araştırılmak üzere kaplama çözeltilerine katılan takviye elemanıdır. Bu bağlamda MAO yöntemi ile kaplanan malzemelerde grafen etkisinin araştırılması adına yapılan bazı araştırmalar mevcuttur. Liu ve arkadaşları tarafından, MAO ile kaplanan D16T alüminyum alaşımına grafenin kaplama özellikleri üzerine yaptığı etkisi

araştırılmıştır. Çalışmada, kaplama kalınlığının ve kaplama sertliğinin grafen ilavesi ile arttığı, kaplama yüzeyindeki poroziteyi ise azalttığı tespit edilmiştir. Çözeltiye ilave edilen grafenin korozyon dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Yüzeydeki porların azalması ve korozyon dayanımının iyileşmesi grafenin yüksek elektrik iletkenliğine sahip olması ile ilişkilendirilmiştir. Korozyon dayanımı, grafen ilavesi ile MAO prosesindeki elektrik alanı etkilemesi ve yüzeyde kaplama birikiminin artmasıyla açıklanmıştır [11].

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise; grafen ilavesinin farklı bir alüminyum alaşımında (Al6063) olan etkisi ve yüzey özelliklerine olan katkısı araştırılmıştır. Grafen ilavesi ile kaplamada hataların daha az olduğu ve daha uniform bir tabaka elde edildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda da grafen ilavesinin kaplamanın korozyonu arttırdığı rapor edilmiştir [2].

Bu çalışmada unipolar MAO cihazı ile kaplanan 3005 alüminyum alaşımının yüzey karakteristik özellikleri üzerine işlem süresi, grafen etkisi ve çözelti bileşim oranlarının etkisi araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Mikro Ark Oksidasyon Kaplama Süreci

Bu çalışmada, 3005 (AlMn₁Mg_{0.5}) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 0.380x210x297 mm ölçülerindeki alüminyum levhadan 0.380x10x15 mm ölçülerinde kaplama numuneleri hazırlanmıştır. Levha yüzeyi kaplamaya hazır halde olduğundan herhangi bir ön işleme tabi tutulmamıştır. Çalışmada kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AlMn₁Mg_{0.5} kalite alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim (%)							
Ti	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Al
0.015	0.023	0.525	0.128	1.17	0.445	0.056	Kalan

15 kW gücünde bir dış kaynağa sahip bir kaplama ünitesi kullanılarak, MAO kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler farklı konsantrasyonlarda sodyum silikat (%5, %7, %10 g/l) ve grafen (%0.1, %0.2 g/l) banyosunda, sabit voltaj ve akım değerlerinde 5 ve 10 dk kaplama sürelerinde kaplanmıştır. Çözelti pH’ı 11.5-12.2 aralığında ölçülmüştür. Kaplama süresince çözelti sıcaklığı 30 °C’de sabit tutulmuştur. Her numune için yeni çözelti hazırlanıp kaplama işlemi yapılmıştır. MAO işlem parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Kaplama yüzey görüntüleri ve element analizleri SEM (Joel, JSM 6060-LU), EDS analiz test cihazları ile incelenmiştir. Rigaku marka X-Işını difraktometresi faz analizleri için kullanılmıştır. Cihaz 25 kV güç değerlerinde ve numune yüzeyinin 0,2°’lik artışlarla 0-90° arasında taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cu Kα tüpü kullanılmıştır.

Çizelge 2. Mikro ark oksidasyon kaplama parametreleri

Deney No	Na ₂ SiO ₃ (% g/l)	Grafen (% g/l)	Süre (Dk.)	pH	Voltaj (V)
1	5	0,1	5	11,5±0,2	500
2	5	0,1	10	11,5±0,2	460
3	5	0,2	5	11,5±0,2	430
4	5	0,2	10	11,5±0,2	460
5	7	0,1	5	11,8±0,2	480
6	7	0,1	10	11,8±0,2	420
7	7	0,2	5	11,8±0,2	460
8	7	0,2	10	11,8±0,2	470
9	10	0,1	5	12,2±0,2	460
10	10	0,1	10	12,2±0,2	440
11	10	0,2	5	12,2±0,2	440
12	10	0,2	10	12,2±0,2	400

2.2. Erozyon Korozyonu Testi

MAO işlemi ile 5 dakika süre ile kaplanan numuneler, oda sıcaklığında 24 saat süre ile erozyon korozyonuna maruz bırakılmıştır. Deney, 750 cm³ saf su dolu beherde, ağırlıkça %3.5 NaCl ve %8 g/l Al₂O₃ tozu (3µm) ilave edilerek erozif bir ortam hazırlanmıştır. Parçacıklar manyetik karıştırıcı yardımıyla 700 rpm hızında karıştırılan erozyon korozyonu için bir ortam oluşturulmuştur. Erozyon korozyon deneyleri öncesi numunelerin

kütle ölçümleri ve yüzey alanları ölçümleri yapılmıştır. İlk tartımlar yarım saat sonra alınmıştır. Ardından 1 saat, 2 saat, 9 saat ve 24 saat sonrasında ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Deney sonrası numunelerin korozyon hızı verileri hesaplanmış ve 24 saat sonrası SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 1'de erozyon korozyon deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 1. Erozyon korozyonu deney düzeneği ve deney sonu numuneler

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Şekil 2 ve Şekil 3'de MAO kaplama sonrası düşük büyütmede ve yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir. Genel görüntüler incelendiğinde kaplamaların tüm numunelerde başarı ile gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Ancak numunelerde yer yer mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Meydana gelen mikro çatlaklar yüzeyde biriken sıcak kaplama tabakası ile elektrolitik kaplama çözeltisi arasındaki ısıtılmaları sebebiyle oluşum göstermektedir [12]. Artan kaplama süresi ve grafen takviyesi ile azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Grafen ilavesinin artışı ile de elde edilen görsellerin nihai mikro ark oksidasyon görseline daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3'de verilen kaplamaların yüksek büyütmelerde ki SEM görüntülerine göre, düşük sürelerde deşarj kanallarının varlığını açıkça görülmektedir. Artan süre ile deşarj kanallarının (por) azaldığı görülmektedir. Ayrıca, yüksek grafen ile kaplanan numunelerin, daha yoğun bir kaplama tabakası elde edildiği ve artan grafen ile yüzeydeki deşarj kanallarının (porların) azaldığı gözlemlenmiştir.

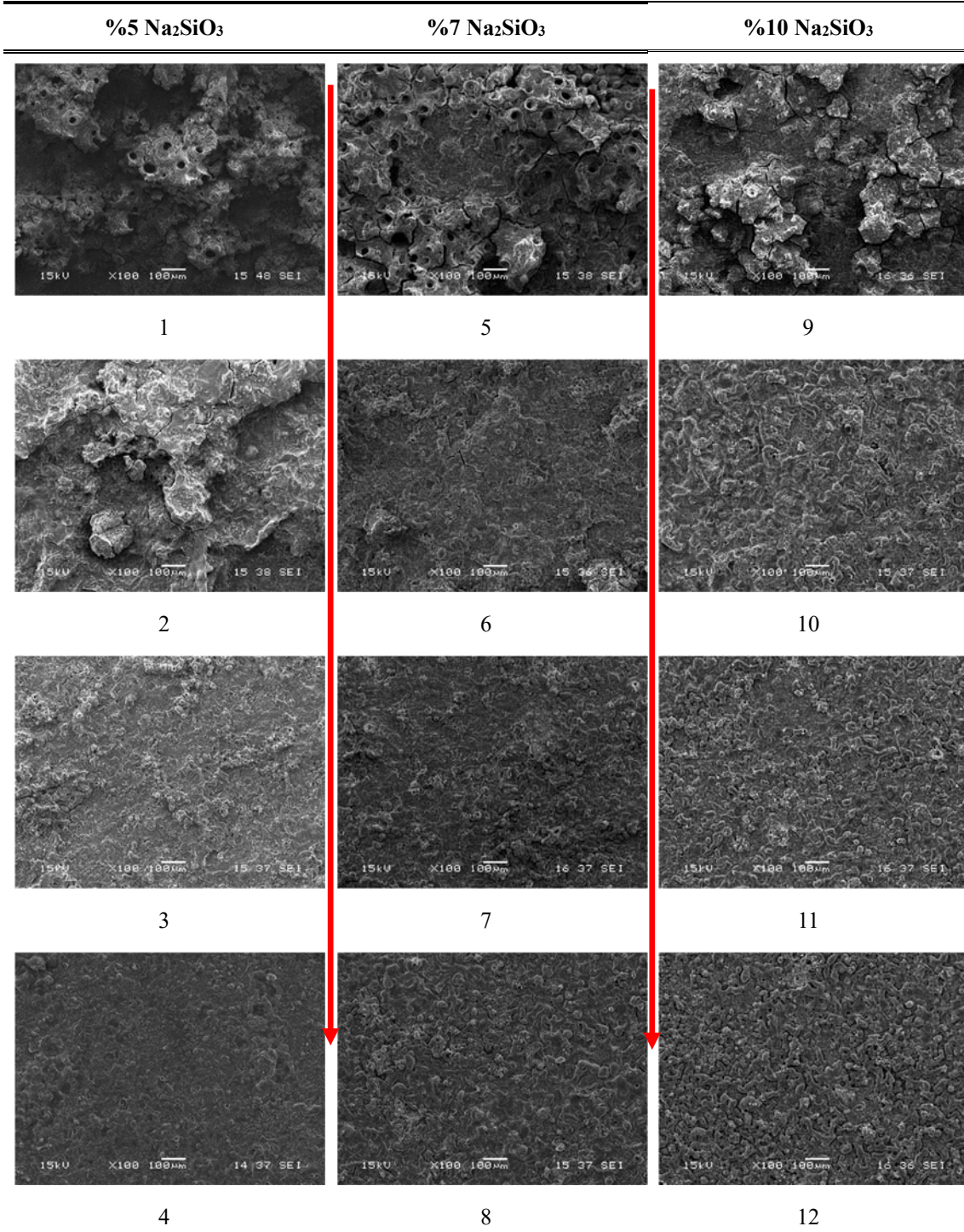
Artan grafen ile azalan porların nedeni, literatüre eş olarak elektrik iletkenliği yüksek olan grafenin MAO prosesindeki elektrik alanı etkilemesi ve kaplamada çözelti birikiminin artmasıyla açıklanmıştır. Ve yapılan inceleme sonrası artan silikat ve süreye bağlı olarak literatüre en yakın mikro ark morfolojisi 11 ve 12 nolu numunelerde elde edilmiştir. Bu durum silikat ilavesi ile artan pH ve elektriksel iletkenliğe bağlı olarak daha homojen ve yoğun bir tabaka elde edildiğine bağlanabilir.

Yapılan literatür çalışmalarında, grafen ilavesiyle, kaplama tabakasında hataların daha az olduğu ve daha uniform bir yapı elde edildiği tespit edilmiştir [2,8,13].

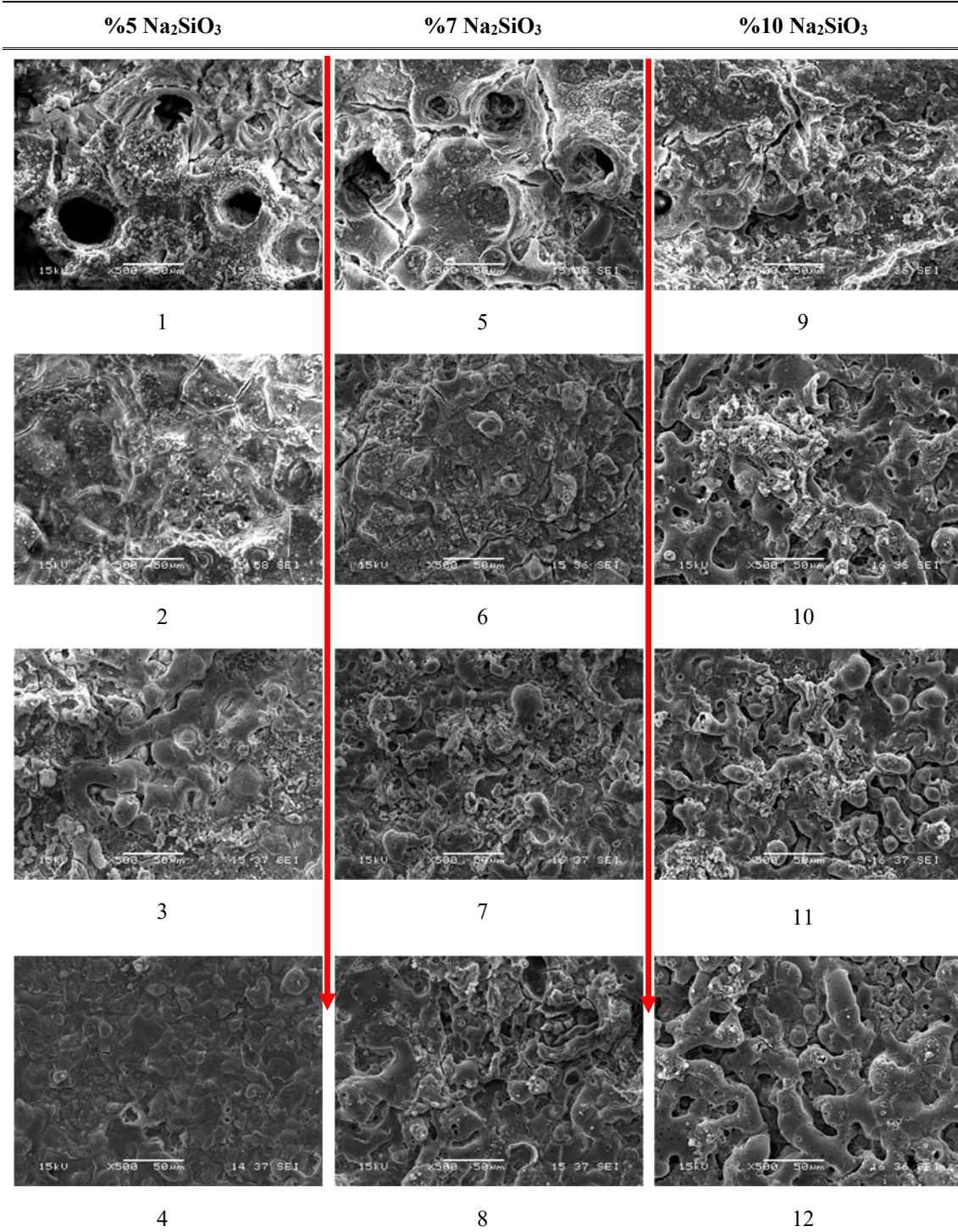
Şekil 4'de 1 nolu numunenin SEM ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Alınan EDS analizine göre yüzeyde Al, O, Na, Mg, Si ve C elementlerine rastlanmıştır. Al, Mg altlıktan gelmektedir. Yüzeyde oksijen elementi olması kaplamanın oksit esaslı seramik olduğu yönünü güçlendirmektedir. Alınan XRD analizleri ile daha detaylı incelenecektir. Kaplamanın yüksek kısımlarında daha çok Si elementi tespit edilmiş olup, Si ve Na ise kaplama çözeltisinden gelmektedir. Kaplamada farklı bir çözelti kullanılmadığı için EDS analizinde farklı bir sonuç beklenmemektedir, sadece elementlerin ağırlıkça yüzdeleri farklılık göstermiştir.

Şekil 5'de 10 dk. işlem süresi ile kaplanan numunelerin tamamı, 8 nolu numune ile işlemsiz 3005 alüminyum alaşım numunesinin XRD analizi sonuçları görülmektedir. Alınan XRD analizleri sonrasında, numune yüzeylerinde alüminyumdan farklı olarak, gama- Al_2O_3 'e rastlanmıştır. Artan süre ve grafen ilavesine bağlı olarak pik şiddetlerinde artış görülse de farklı faz tespit edilmemiştir.

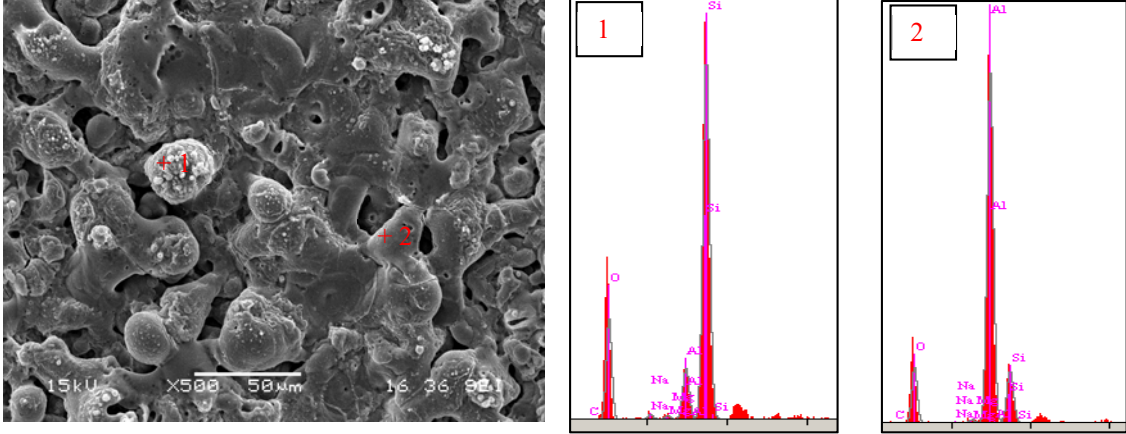
MAO ile büyütülen kaplamalar düşük sıcaklıklarda yarı kararlı faz olan gama- Al_2O_3 oluşmuştur. Yüksek sıcaklıklarda kararlı alfa- Al_2O_3 fazı tespit edilememiştir. Ayrıca bu fazlara ilave olarak 8 nolu numunede kaplama çözeltinin kimyasal bileşimine bağlı olarak müllit ($Al_{4.95}Si_{1.05}O_{9.52}$) fazı da tespit edilmiştir.



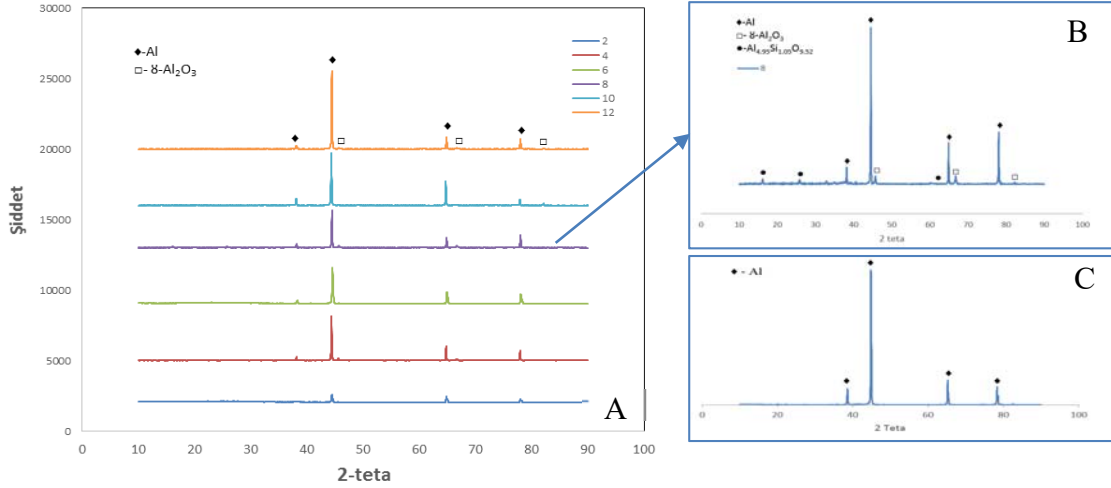
Şekil 2. [1-12] nolu numunelerin sırası ile düşük büyütmedeki SEM görüntüleri



Şekil 3. [1-12] nolu numunelerin sırası ile yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri



Şekil 4. 1 nolu numunenin SEM ve EDS analiz sonuçları

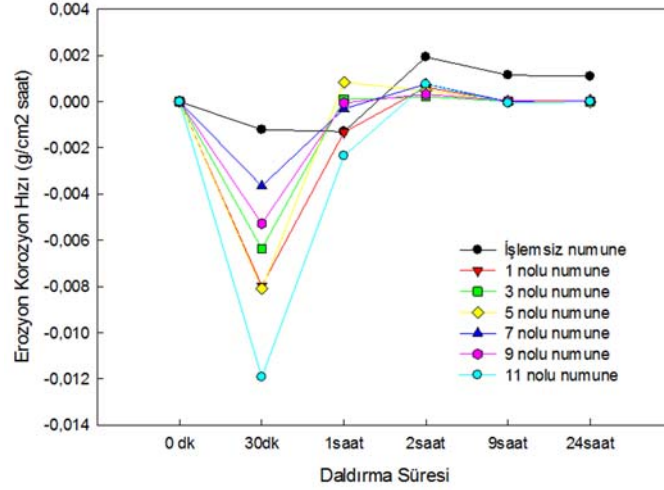


Şekil 5. Numunelerin XRD Grafikleri (A) [2-4-6-8-10-12] nolu numuneler (10dk.), (B) 8 nolu numune ve (C) 3005 işlemsiz numune

Şekil 6'da işlemsiz 3005 ve minimum süre ile kaplanana numunelerin korozyon hızı grafiği verilmiştir. Süre artışı ile daha yoğun kaplama elde edileceği görüşü ile düşük süre ile kaplanan numuneler sadece erozyon korozyonuna tabi tutulmuştur. Grafen ilaveli kaplamalarla ilgili gözenek çaplarını küçülttüğü ve azalttığı görüşü yüzey karakterizasyonun da bahsedilmiştir. Grafen ilave edilen numunelerde, artan kaplama yoğunluğundan dolayı korozyon kaybının daha da azaldığını söyleyebiliriz. İşlemsiz numunenin 2 saat sonunda ağırlık kaybına uğramaya başladığını Şekil 6'dan görebiliyoruz. Kaplanan numunelerin, 24 saat

sonrasında ağırlıklarında yüksek oranda azalma olmadığı tespit edilmiştir.

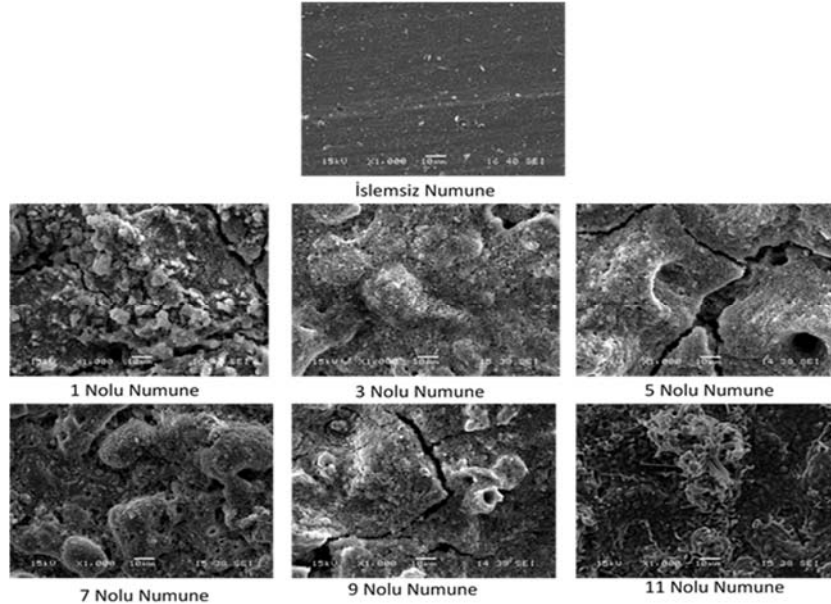
Korozyon testinin sonunda 11 nolu numunenin işlemsiz numuneye göre %17.4 oranında daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, MAO işlemine grafen ilavesinin korozyon ve aşınma direncini artırdığı, MAO kaplamaların dezavantajı olan poroziteli yapının azaldığı ve daha homojen yapıda kaplamalar elde edildiği görülmektedir [2,8,13]. Yapılan çalışmamızda da benzer veriler elde edildiğini alınan sonuçlarımızı desteklediğini söyleyebiliriz [13].



Şekil 6. İşlemsiz Al alaşımı ve minimum süre ile kaplanan numunelerin korozyon hızı grafiği

Şekil 7’de işlemsiz Al ve minimum süre de MAO ile kaplanana numunelerin erozyon korozyonu sonrası SEM görüntüleri, Şekil 8’ de işlemsiz Al ve 11 nolu numunenin EDS analizi sonuçları sırası ile verilmiştir. Erozyon korozyonu sonrası işlemsiz numunede oyuklanmaların (Şekil 8.a) meydana geldiği yüzeyin korozyona uğradığı net bir şekilde görülmektedir.

Grafen oranı düşük olan (1-5-9 nolu) MAO kaplamalarda ise erozyon korozyonu sonrası kaplamada kırılmalar dökülmeler meydana gelmiştir. Alınan veriler ve görseller neticesinde en iyi korozyon dayanımı 11 nolu numunede görülmektedir. Korozyon sonrası kaplama görselini kaybetmediğini yüzeyinde NaCl birikintilerinin olduğu alınan EDS analizi sonrası tespit edilmiştir.



Şekil 7. İşlemsiz Al alaşımı ve minimum sürede MAO ile kaplanan numunelerin erozyon korozyonu sonrası SEM görüntüleri

Elt.	Line	Conc-1	Conc-2	Conc-3	Conc-4	Units
C	Ka	0.000	0.000	0.000	0.000	wt.%
O	Ka	17.327	14.509	10.360	6.825	wt.%
Na	Ka	0.199	0.421	0.273	0.236	wt.%
Al	Ka	70.473	77.560	88.713	89.196	wt.%
Si	Ka	2.333	0.169	0.491	3.541	wt.%
Cl	Ka	9.668	7.341	0.162	0.201	wt.%
		100.00	100.00	100.00	100.000	wt.%

Elt.	Line	Conc-1	Conc-2	Conc-3	Units
C	Ka	0.000	0.000	0.000	wt.%
O	Ka	33.980	3.536	29.613	wt.%
Na	Ka	2.038	30.978	7.497	wt.%
Al	Ka	61.100	4.024	45.871	wt.%
Si	Ka	0.000	0.100	0.198	wt.%
Cl	Ka	2.881	61.363	16.821	wt.%
		100.000	100.000	100.000	wt.%

Şekil 8. İşlemsiz Al alaşımı ve 11 nolu numunenin erozyon korozyonu sonrası SEM ve EDS analizleri

4. GENEL SONUÇLAR

Uygulanan farklı sürelerde ve farklı oranlarla ilave edilen grafen takviyesinin kaplama dayanımı üzerine olan etkisi araştırılmış olup, MAO işlemi sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- MAO işlemi sonrasında tüm numune yüzeylerinde oksit tabakası oluşmuştur. Oluşan oksit tabakası γ -Al₂O₃ formundadır.
- Kaplama tabakası grafen ilavesine ve artan süreye bağlı olarak daha homojen ve yoğun bir oluşum sergilemiştir. Kaplama süresinin artmasıyla beraber yüzeyde daha çok birikme olmasına neden olmuştur.

Yapılan erozyon korozyonu deneyi sonrasında kaplanan numunelerin korozyon dayanımlarında iyileşme görülürken, en iyi sonuçlar grafen takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Erozyon

korozyon testinin sonunda 11 nolu numunenin işlemsiz numuneye göre %17,4 oranında daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim dalında bitirme tez çalışması olarak başarıyla tamamlanmıştır.

Çalışmaya Adapazarı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.'ye alüminyum sarf desteklerinden dolayı teşekkür ediyoruz.

6. KAYNAKLAR

1. Ling K., Mo Q., Lv X., Qin G., Yang W., Li, L., Li, W., 2022. Growth Characteristics and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation

- Coating on Al–Mg Composite Plate. *Vacuum*, 195, 110640.
2. Chen, Q., Jiang, Z., Tang, S., Dong, W., Tong, Q., Li, W., 2017. Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties. *Applied Surface Science*, 423, 939-950.
 3. Dai, W., Zhang, C., Zhao, L., Li, C., 2022. Effects of Cu Content in Al-Cu Alloys on Microstructure, Adhesive Strength, and Corrosion Resistance of Thick Micro-Arc Oxidation Coatings. *Materials Today Communications*, 33, 104195.
 4. Korkmaz, K., Çakır, A., 2017. Mikro-Ark Oksidasyon Yöntemi İle Oksitlenen 2017A Alüminyumun Erozyon- Korozyon Direncinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 979-983.
 5. Huang, J., Dun, Y., Wan, Q., Wu, Z., Zhao, X., Tang, Y., Zhang, X., Zuo, Y., 2022. Improved Corrosion Resistance of MAO Coating on Mg-Li Alloy by RGO Modified Silanization. *Journal of Alloys and Compounds*, 929, 167283.
 6. Zhang, J., Dai, W., Wang, X., Wang, Y., Yue, H., Li, Q., Yang, X., Guo, C., Li, C., 2023. Micro-Arc Oxidation of Al Alloys: Mechanism, Microstructure, Surface Properties, and Fatigue Damage Behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4307-4333.
 7. Guan, S., Qi, M., Li, Y., Wang, W., 2020. Morphology Evolution of the Porous Coatings on Ti-xAl Alloys by Al Adding Into Ti During Micro-Arc Oxidation in Na₂B₄O₇ Electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 395, 125948.
 8. Chen, Y., Wu, L., Yao, W., Wu, J., Yuan, Y., Xie, Z., Jiang, B., Pan, F., 2022. Synergistic Effect of Graphene Oxide/Ternary Mg-Al-La Layered Double Hydroxide for Dual Self-Healing Corrosion Protection of Micro-Arc Oxide Coating of Magnesium Alloy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 655, 130339.
 9. Ayday, A., 2018. Coatings of Bioactive TiO₂ Films on Ti6Al4V Alloy by Micro Arc Oxidation. *Acta Physica Polonica A*, 134.
 10. Kaseem, M., Lee, Y.H., Ko, Y.G., 2016. Incorporation of MoO₂ and ZrO₂ Particles Into the Oxide Film Formed on 7075 Al Alloy Via Micro-Arc Oxidation. *Materials Letters*, 182, 260-263.
 11. Liu, W., Liu, Y., Lin, Y., Zhang, Z., Feng, S., Talha, M., Shi, Y., Shi, T., 2019. Effects of Graphene on Structure and Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on D16T Al Alloy. *Applied Surface Science*, 475, 645-659.
 12. Sundararajan, G., Krishna, L.R., 2003. Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings Through the MAO Coating Technology. *Surface and Coatings Technology*, 167, 269-277.
 13. Aydin, F., Ayday, A., Turan, M.E., Zengin, H., 2020. Role of Graphene Additive on Wear and Electrochemical Corrosion Behaviour of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings on Mg–MWCNT Nanocomposite. *Surface Engineering*, 36(8), 791-799.