

Development Of Aluminum Matrix Rgo Reinforced Composites By Electric Current Assisted Sintering

*¹Yakup Pehlivan , ¹ Harun Gül 

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.

* Sorumlu yazar, e-mail: yakuppehlivan@subu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5412-1324>

Submission Date: 30.04.2024

Acceptation Date: 28.06.2024

Abstract

In this study, reduced graphene oxide (rGO) reinforced composites with aluminium matrix were fabricated by using powder metallurgy method by current assisted sintering (ECAS). The average grain size of aluminium used in the produced samples is 20 microns and composite materials were obtained by means of 2 to 5 layers of reduced graphene oxides. For this purpose, pure aluminium, 3%, 8% and 16% rGO doped composite materials were produced by ECAS method under 2000A/14 min conditions. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction analysis (XRD) techniques were used for the characterisation of the composites. Corrosion tests were also carried out to determine the electrochemical behaviour of the composites. Aluminium matrix composite structures with homogeneous distribution were obtained with increasing rGO reinforcement. The presence of rGO phase was also confirmed by XRD analysis. As a result of electro chemical tests, it was determined that corrosion resistance increased with increasing rGO reinforcement. It was revealed that the material with the highest corrosion resistance was obtained with aluminium matrix composite material containing 16% rGO. However, the highest hardness value in composite materials was found in the composite material containing 3% rGO, while the optimum result in terms of wear resistance and friction coefficient was reached in the composite material with the lowest graphene oxide content (3% rGO).

Keywords: Aluminium, rGO, ECAS, Sintering, Corrosion, Wear resistance

Elektrik Akım Destekli Sinterleme Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Rgo Takviyeli Kompozitlerin Geliştirilmesi

Öz

Bu çalışma da toz metalürsiji yönteminden faydalanarak alüminyum matrisli indirgenmiş grafen oksit (rGO) takviyeli kompozitler akım destekli sinterleme yöntemi ile (ECAS) üretilmiştir. Üretilen numularda kullanılan alüminyumun ortalama tane boyutu 20 mikron olup 2 ile 5 tabakalı indirgenmiş grafen oksitler aracılı ile kompozit malzemeler elde edilmiştir. Bu amaçla saf alüminyum, %3, %8 ve %16 rGO katkılı kompozit malzemeler ECAS yöntemi ile 2000A/14 dk şartlarında üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X ışınları kırınım analizi (XRD) tekniklerinden faydalanılmıştır. Ayrıca kompozitlerin elektro kimyasal davranışlarını belirlemek amacıyla korozyon testi yapılmıştır. Artan rGO takviyesi ile homojen dağılıma sahip alüminyum matrisli kompozit yapılar elde edilmiştir. rGO fazının varlığı XRD analizi ile de doğrulanmıştır. Elektro kimyasal testler sonucunda artan rGO takviyesi ile korozyon dayanımının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek korozyon dayanımına sahip malzemenin de

¹ Corresponding author: Tel: 0 264 616 01 63

E-mail: yakuppehlivan@subu.edu.tr

%16 rGO içeren alüminyum matrisli kompozit malzeme ile elde edildiği ortaya konmuştur. Bununla birlikte kompozit malzemelerde en yüksek sertlik değeri %3 rGO içeren kompozit malzemede olduğu, aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı açısından ise optimum sonuca yine en düşük grafen oksit içeren (%3 rGO) kompozit malzemede ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, rGO, ECAS, Sinterleme, Korozyon, Aşınma

1. Giriş

Alüminyum, kimyasal sembolü Al olan ve 13 numaralı atomu bulunan bir metaldir. Doğada genellikle bauxit adı verilen bir mineral içerisinde bulunur ve bauxit madenciliği ve işlenmesi yoluyla elde edilir (Compston et al., 2004). Bu metal, hafifliği, iletkenlik özelliği, korozyona direnci ve şekillendirilebilirliği ile bilinir (Aluminium - Element Information, Properties and Uses | Periodic Table).

Alüminyumun geniş kullanım alanları ve avantajları, endüstriyel ve tüketici ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir malzeme haline gelmesini sağlar (Callister & Rethwisch, 2018).

Grafit: Karbon bazlı bir mineral olan grafit, atomları aralıklı yatay katmanlar halinde düzenlenmiş altı karbon halkasından oluşan katmanlı bir yapıya sahiptir. Oktahedral veya tetrahedral sistemde kristalleşen elmasların aksine, grafit altıgen sistemde kristalleşerek bu element formları arasında belirgin bir yapısal varyasyon sergiler. Dimorfik çiftler genellikle benzer fiziksel özellikler sergiler; ancak grafit ve elmas söz konusu olduğunda kayda değer farklılıklar ortaya çıkar. Grafit doğal olarak oluşan, koyu griden siyaha kadar değişen renklerde, opak ve son derece yumuşak (Mohs ölçeğine göre 1 1/2 puan) bir yapıya sahipken, elmaslar şeffaf ve renksiz olabilir ve olağanüstü sertlikleriyle tanınırlar. Grafit ayrıca yağlı bir doku sergiler (Bi et al., 2023).

Grafen oksit, karbon ve oksijen atomlarından oluşan bir karbon nanomateriyaldir. Bu materyal, grafenin oksitlenmiş bir formudur ve grafenin bir türevidir (Flora et al., 2023). Grafen, tek atom kalınlığında karbon atomlarının düzenli bir şekilde düzlem halinde bir araya gelmesiyle oluşurken, grafen oksit ise grafen yapısının bazı karbon atomlarının oksijen atomlarıyla yer değiştirmesi ya da oksijen gruplarının grafen tabakasının üzerine yerleştirilmesi sonucu elde edilir (Edokali et al., 2023).

Doğal grafit öğütülerek saf hale getirilir ve sonra oksitlenme işlemine tabi tutulur. Bu işlem, grafen tabakalarının oksitlenmesini sağlayarak grafen oksit oluşturur (Rudenko et al., 2023). Oluşan grafen oksit yıkanarak temizlenir ve ardından kurutulur. Üretilen grafen oksit örnekleri daha sonra incelenerek özellikleri belirlenir. Grafen oksit üretimi karmaşık bir süreç olup, son ürünün özellikleri üretim adımlarına ve kullanılan tekniklere bağlı olarak değişebilir (Le et al., 2023).

Grafen oksit, grafit tabakalarının oksitlenerek ayrılmış tek katmanlı bir forma dönüşmesidir (Schniepp et al., 2006). Bu materyal, genellikle karbon ve oksijen atomlarından oluşur ve genellikle C:O oranı 3'ten düşüktür, tipik olarak ise yaklaşık olarak 2'ye yakın bir orana sahiptir. Grafen oksit, çeşitli fonksiyonel grupları içerir (Kerli et al., 2017).

Grafenin büyük miktarlarda üretimi için öne çıkan bir yöntem, kimyasal proseslerle üretilen grafen oksidin farklı yöntemlerle indirgenmesidir (Chen et al., 2010). Verimli üretim için düşük maliyetli grafit hammaddelerinin tercih edilmesi, aynı zamanda elde edilen grafitin suya karşı çekim gücünü artırarak stabil çözeltiler hazırlama imkanı tanır. Bu yöntem, grafenin ölçeklendirilebilir ve maliyet etkin olarak üretilmesini sağlar (Bianco et al., 2013).

Grafen oksitin indirgenmesi, oksijen içeren grupların parçalanmasıyla grafen oksidin yalnızca karbon içeren bir forma dönüşümünü ifade eder. Grafen oksidin indirgenmesi sadece yüksek sıcaklıkla gerçekleştirilerek mümkündür, bu işleme termal tavlama yöntemi adı verilir. Grafenin ilk

araştırma aşamalarında, ani ısıtma ($2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) yöntemi grafen oksitin eksfoliasyonu için kullanılıyordu. Ani ısıtılan grafit oksit tabakaları arasında CO ve CO₂ gazlarının oluşturduğu basınç, eksfoliasyonu sağlıyordu. Bu yöntemde eksfoliye edilen tabakalar, doğrudan grafen olarak adlandırılabilir çünkü ani ısıtma işlemi oksijen içeren grupların ayrışmasını ve gaz halinde grafitin oksit tabakalarından uzaklaşmasını sağlayarak bir indirgeme işlemi gerçekleştirir. Bu yöntem, hem eksfoliasyon hem de indirgeme sağladığı için başlangıçta avantajlı gibi görünse de, üretim miktarlarının az olması ve yüksek sıcaklıkta grafitin tabakalarının kısmen bozulması gibi nedenlerle tercih edilen bir yöntem değildir (Schniepp et al., 2006).

Grafitin oksitin grafene indirgenmesi sürecinde, görsel olarak renkte kahverengiden siyaha doğru bir değişim gözlemlenir. Bu değişim, oksijen içeren grupların grafitin oksit yapısından uzaklaşmasıyla bağlantılıdır (Fernández-Merino et al., 2010). Bu süreç aynı zamanda aglomerasyona, yani partiküllerin bir araya gelerek küme oluşturmaya da neden olabilir. Çözeltinin rengindeki değişim, oksijen oranının azalması ve iletkenliğin artması gibi faktörlerle ilişkilidir. Bu değişimler, indirgeme işleminin ne ölçüde gerçekleştirildiğine dair birer gösterge olarak kabul edilir. Örneğin, daha az oksijen içeriği ve artan iletkenlik, grafitin oksitin grafitte indirgenmesinin gerçekleştiğini işaret edebilir (Chua & Pumera, 2014).

Çeşitli kimyasal yöntemler, grafitin oksitin indirgenmesi için kullanılan farklı indirgeyici ajanları içermektedir. Bu yöntemlerin arasında hidrazinler, borhidritler, alüminyumhidritler ve sülfür içeren maddeler gibi bir dizi seçenek bulunmaktadır. Bunların yanı sıra, çevre dostu yaklaşımların bir parçası olarak askorbik asit gibi maddeler de grafitin oksitin indirgenmesinde tercih edilmektedir. Bu farklı indirgeyici maddeler, grafitin oksit yapısının indirgenmesi sürecinde kullanılarak, grafitin özelliklerinde ve son uygulamalarda sağladığı etkilerde farklılıklar ortaya çıkarılabilir (Chen et al., 2010; Fernández-Merino et al., 2010).

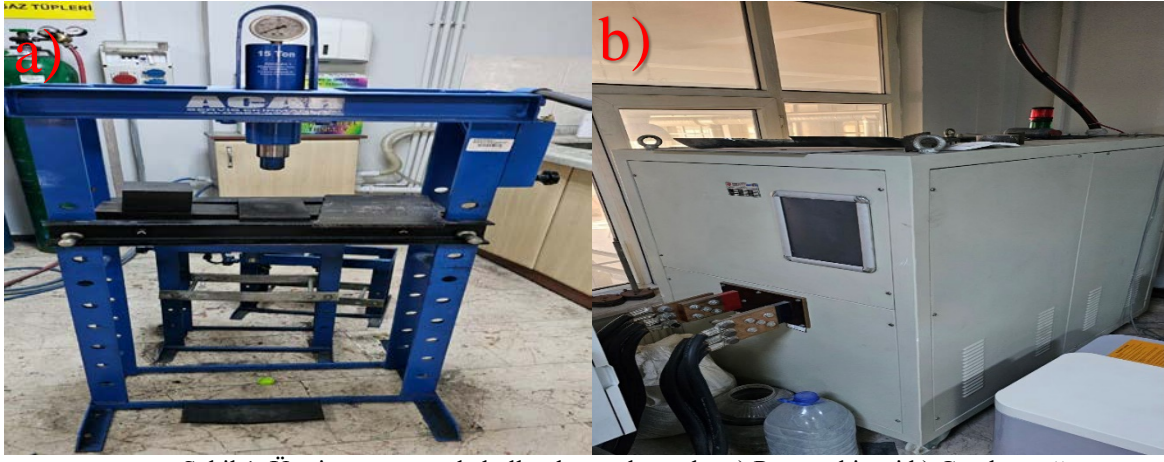
2. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, alüminyum matrisli rGO takviyeli kompozitlerin üretiminde elementel tozlar kullanılarak hazırlanan toz karışım elektrik akımı destekli sinterleme (1400-2000A/14 dak) yöntemleriyle üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin, SEM görüntüleri ile mikroyapıları, kantitatif noktasal EDS analizleri ve x-ışın paternleri ile faz yapıları, vickers mikrosertlik testleri ile sertlik değişimleri, ball on disc yöntemiyle aşınma özellikleri ve elektro-kimyasal korozyon çalışmaları ile korozyon özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen kompozit kaplamaların hem yüzey hem de kesitleri mikroyapısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla SEM (Jeol JSM-6060 LV) cihazları kullanılarak görüntüleme yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü WILSON HARDNESS 402M VD marka model cihaz kullanılarak yapılmıştır. Kompozit kaplamalarda elde edilen kompozit yapıların fazlarının belirlenmesi için RIGAKU D MAX 2200 PC marka x-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Korozyon ölçümleri, oda sıcaklığında, Gamry marka bilgisayar kontrollü test cihazıyla yapılmıştır. Deneysel, üç elektrot tekniği kullanılarak bir deney cam hücresinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon testlerinde %3,5'lik bir NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Numunelerin nihai şeklini alması ve ECAS tekniğiyle üretim için bu haznelerde şekillendirme işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla tasarlanmış olan şekillendirme kalıpları, talaşlı imalat yöntemleriyle üretilmiştir. Kalıplar, AISI 4140 malzemesinden yapılmış olup matris çapı 30 mm ve yüksekliği 45 mm ölçülerindedir. Üretim sonrası elde edilen numuneler, 5 mm kalınlık ve 30 mm çapta nihai şekle sahiptir.

Bu çalışmada Alüminyum ile indirgenmiş Grafitin oksit bir bileşik oluşturacak şekilde tasarlanmış ve içeriğine %3, 8 ve 16 oranında rGO ilavesi yapılarak özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin kompozisyon aralığı Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan grafitin oksit tozlarının ortalama tane boyutu 20 mikrondur. Ayrıca üretim aşamasında kullanılan pres ve güç kaynağı şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Üretim aşamasında kullanılan tozlar ve ağırlıkça dağılımları

Numune	Elementlerin % Dağılımları (Ağırlıkça %)	
	Al	rGO
1	100	-
2	97	3
3	92	8
4	84	16



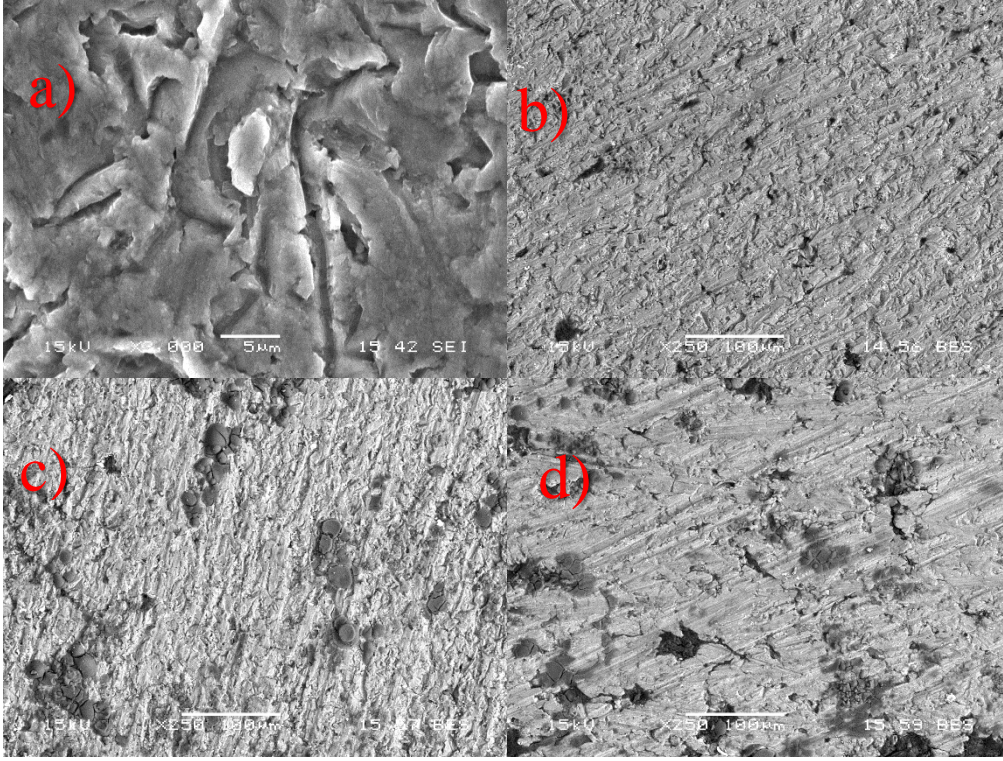
Şekil 1. Üretim aşamasında kullanılan malzemeler a) Pres makinesi b) Güç kaynağı

3. Deneysel Sonuçlar

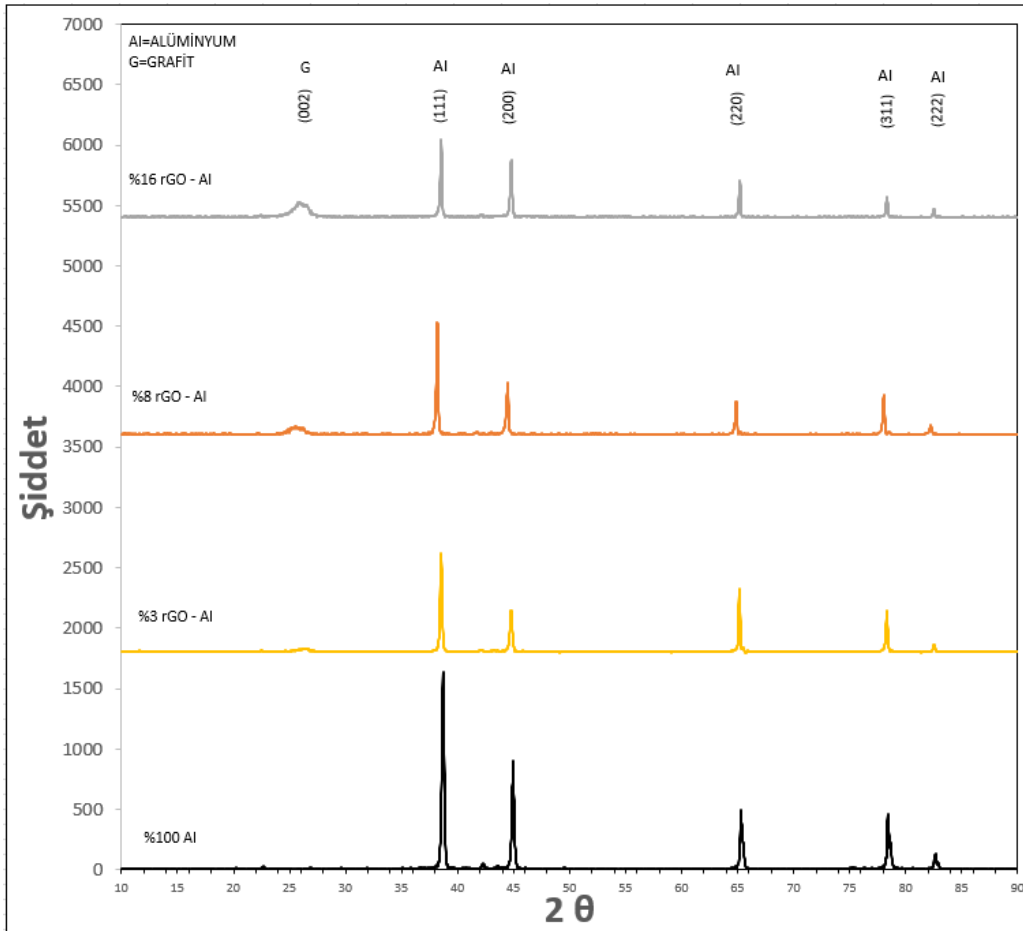
Şekil 2’de saf alüminyum ve %3, %8 ve %16 rGO takviyeli kompozit malzemelere ait SEM görüntüleri görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde artan rGO takviyesi ile birlikte daha fazla rGO karbon yapısı içine girmiş ve homojenliğin arttığı görülmüştür. Beyaz açık renkli parlak gözüken alanlar alüminyumu gösterirken siyah koyu renkli alanlar da karbonu yani rGO’yu ifade etmektedir.

ECAS tekniğiyle hazırlanan, elementel tozların homojen karışımıyla elde edilen saf Alüminyum ve rGO takviyeli kompozit malzemede oluşan farklı fazları belirlemek için X-ışını difraksiyon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2’de saf alüminyum ve sırasıyla %3, %8 ve %16 rGO takviyeli kompozitlerin XRD analizleri sunulmuştur.

Şekil 3. de verilen XRD analizi incelendiğinde saf Alüminyum için farklı düzlemlerde alüminyum pikleri yer almaktadır. Kompozit malzemeler için bir değerlendirme yapıldığında ise yaklaşık 2 teta=25 derecede grafitte ait piklerin varlığı grafit oksit varlığını doğrulamaktadır. Kompozit malzemelerde artan rGO miktarı ile birlikte 25 derecede yer alan grafit piklerinin şiddetlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Özellikle ağırlıkça % 8 rGO (0,25g) içeren ve daha yüksek konsantrasyonlarda grafit piklerinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu durum da daha fazla grafit oksitin alüminyum matris içerisine girdiğini doğrulamaktadır. Grafit oksit takviyesi aynı zamanda farklı düzlemlerdeki alüminyum piklerinin şiddetinin de azalmasına sebep olduğu görülmektedir. Özellikle (111) ve (220) düzlemlerinde bu pik şiddetlerinde ki azalma bariz bir şekilde görülmektedir.



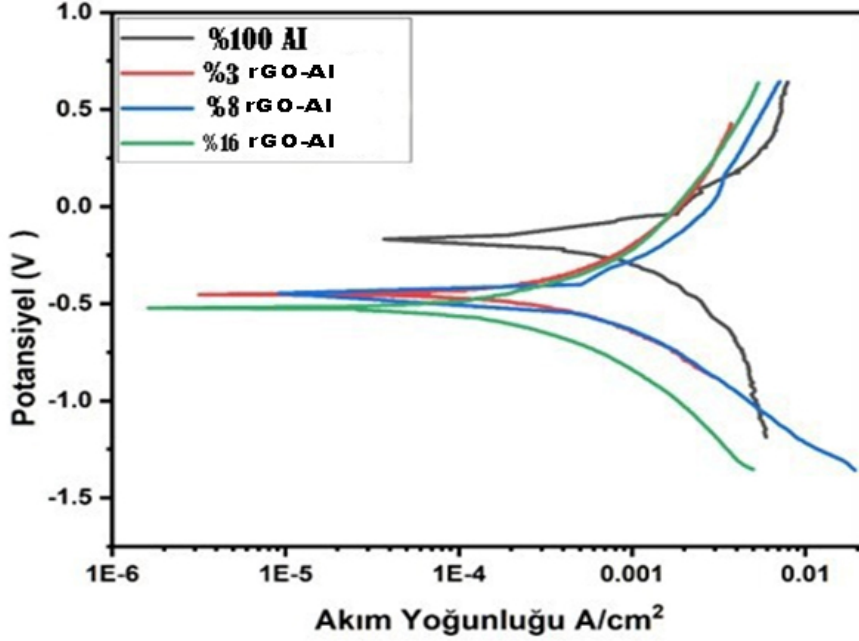
Şekil 2. Alüminyum alaşım ve rGO takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı görüntüleri a) Saf Al, b) %3 rGO-Al, c) %8 rGO-Al, d) %16 rGO-Al



Şekil 3. Saf Alüminyum ve rGO takviyeli kompozit malzemelerin XRD analizi

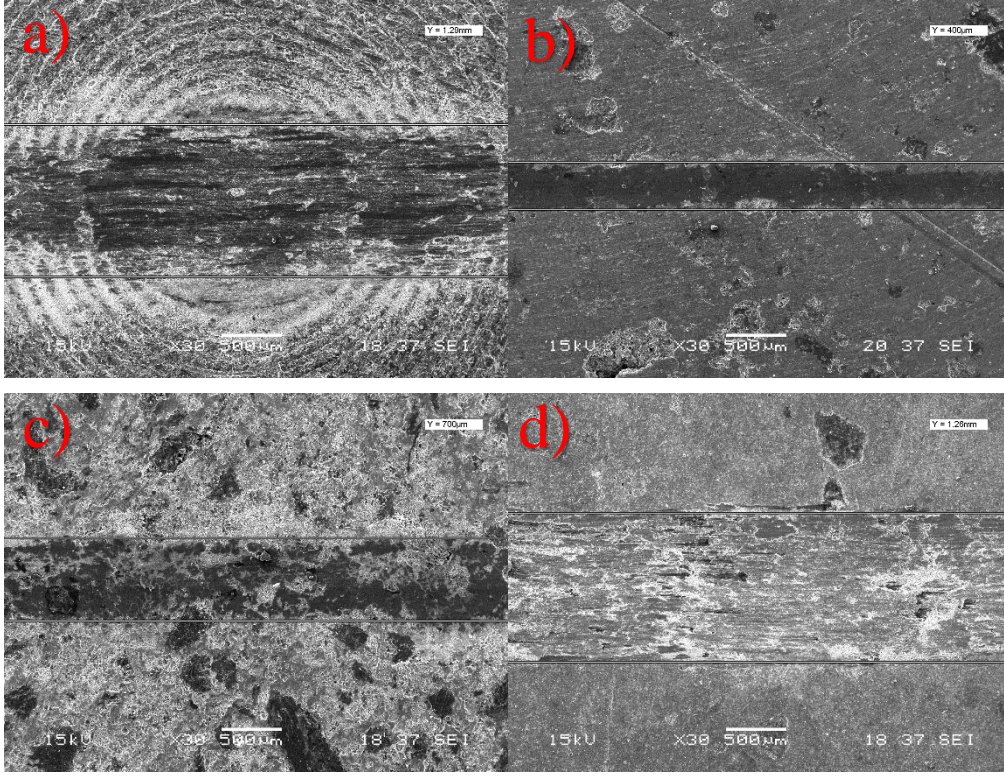
Grafen oksit takviyesi aynı zamanda Alüminyum piklerinin şiddetinin de azalmasına sebep olduğu görülmektedir.

ECAS tekniğiyle oluşturulan, elementel tozların homojen karışımıyla elde edilen saf alüminyum ve rGO takviyeli kompozit malzemelerin %3.5'lik NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. -1V ile +1V arasında değişen potansiyel aralığında 0,5mV/sn tarama hızıyla Tafel eğrileri elde edilmiştir. Saf alüminyum ve rGO takviyeli kompozitlerin Tafel eğrileri Şekil 4'de gösterilmiştir.



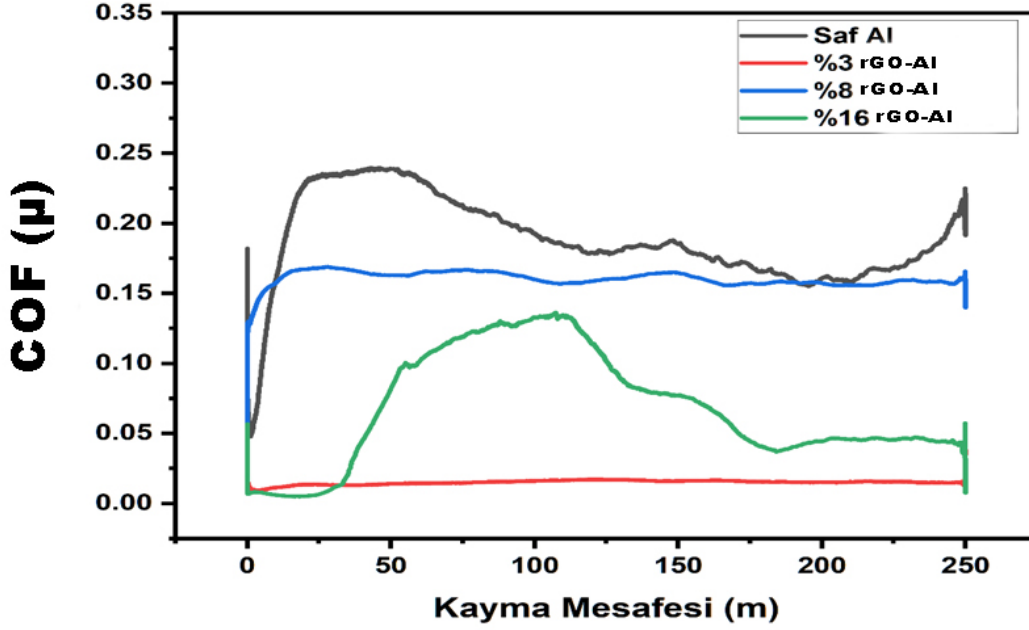
Şekil 4 : %3,5 NaCl çözeltisi ile yapılan elektrokimyasal test sonuçları - tafel eğrileri

Saf alüminyum ve rGO takviyeli kompozitler için tafel eğrileri değerlendirildiğinde saf alüminyumda her ne kadar enpozitif potansiyel söz konusu olsa da akım açısından değerlendirildiğinde en yüksek akım değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda korozyon davranışı kötü olacaktır. Kompozit malzemeler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise %16 rGO takviyeli kompozit malzemede en düşük akım yoğunluğu söz konusu olduğu görülmektedir. Buna rağmen potansiyel açısından diğer katkılı yüzdeleri kompozitlere yakın olmakla beraber en negatif potansiyel değeri en yüksek katkılı kompozit malzemenin sergilediği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak potansiyel ve akım açısından değerlendirildiğinde en yüksek katkılı kompozitin (%16) en yüksek korozyon direncine sahip olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 5: Numunelerin Sem görüntüleri a) % 100 Al, b) %3 rGO, c) %8 rGO, d) % 16 rGO

Aşınma testleri sonrası yüzeyden alınan SEM görüntülerinden aşınma izlerinin genişlikleri tespit edilmiş olup grafen oksit konsantrasyonuna bağlı olarak iz genişliklerinde ki değişim şekil 5.4.'de verilmiştir. Sem görüntüleri incelendiğinde takviyesiz yani saf alüminyum, aşınma sonrası yaklaşık 1,30 mm iz genişliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Grafen oksit takviyeli kompozitlerde ise takviye fazının artışına bağlı olarak ters orantılı bir ilişki söz konusudur. En düşük grafen oksit konsantrasyonu olan %3 GO takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemede aşınma sonrası iz görüntüsü incelendiğinde (Şekil 5/b) iz genişliğinin 400 μm değerine kadar düştüğü görülmektedir. Ancak artan konsantrasyon ile sırası ile 700 μm ve 1,26 mm lik iz genişlikleri elde edilmiştir. Azalan konsantrasyon ile iz genişliklerinde meydana gelen düşüş aşınma dayanımında artışı ortaya koymaktadır. Artan konsantrasyon ile aşınma dayanımında meydana gelen düşüşün sebepleri ortaya konmaya muhtaçtır. Muhtemel sebepler olarak artan konsantrasyon ile ara yüzey mukavemetindeki muhtemel bozulma ve yine artan konsantrasyon ile mikro gözeneklilik-porozitedeki artışlar sayılabilir.



Şekil 6: Sürtünme katsayısı -Kayma mesafesi

Sürtünme katsayıları ile kayma mesafeleri kompozit ve alaşım için Şekil 6.'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf alüminyumun en yüksek sürtünme katsayısı sergilediği görülmektedir. Kompozit malzemeler için grafik incelendiğinde ise şekil 5'de verilen iz genişliklerindeki ilişki ile örtüşen şekilde en düşük sürtünme katsayısı en düşük grafen oksit konsantrasyonu içeren kompozit malzemede (%3 GO) elde edildiği görülmektedir. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise sürtünme katsayısında artış ve sürtünme katsayısı kararlılıklarında bozulma olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca en yüksek konsantrasyon olan %16 grafen oksit içeren kompozit malzemedeki davranışın daha düşük katsayısına sahip olmak ile birlikte saf alüminyuma benzer olduğu görülmektedir.

Sertlik değerlerinin tespiti, numunelerin mekanik özellikleri hakkında bilgi vermesi açısından oldukça önemlidir. Mikrosetlik cihazında Vickers sertlik ucu kullanılarak yapılan ölçümlerin sonucunda saf Alüminyum malzemesinin sertlik değeri 47,8 HV, %3 GO içeriğine sahip malzemenin sertlik değeri 44.5 HV, %8 GO içeriğine sahip malzemenin sertlik değeri 39.7 HV, %16 GO içeriğine sahip malzemenin sertlik değeri 33.5 HV olarak tespit edilmiştir. Bu deneyler sonucunda numunede GO içeriğinin artması ile sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

- ECAS yöntemiyle saf Alüminyum ve rGO takviyeli kompozitleri (%3, %8 ve %16) başarılı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.
- XRD analizi ile rGO katkılı kompozitlerin üretildiği ve rGO fazının varlığı 2 teta=25 derecede doğrulanmıştır.
- Üretilen kompozitlere ait mikro yapı görüntüleri SEM aracılığı ile verilmiş olup görüntülerden kompozitlerin başarılı bir şekilde üretildiği anlaşılmaktadır. Takviye miktarına bağlı olarak takviye fazının yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıtıldığı ortaya konmuştur.
- Saf Alüminyum ve kompozitlerden alınan korozyon test sonuçları en yüksek korozyon direncine sahip malzemenin en yüksek katkılı kompozite ait olduğunu göstermiştir. Artan takviye oranı korozyon dayanımının artmasına sebep olmuştur.

- Kompozit malzemelerde en yüksek sertlik değeri %3 rGO içeren kompozit malzemede 44.5 HV olarak elde edilmiştir.
- Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı açısından optimum sonuca en düşük grafen oksit içeren (%3 rGO) kompozit malzemede ulaşılmıştır.

Hakem değerlendirmesi: Harici hakem değerlendirmesi.

Yazar katkıları: Veri Toplama ve/veya İşleme - Y.P.; Literatür Taraması, Yazım -H.G.

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir

Finansal Açıklama: Yazarlar bu çalışmanın finansal destek almadığını beyan etmişlerdir

Kaynaklar

- Aluminium - Element information, properties and uses | Periodic Table. (n.d.). Retrieved November 21, 2023, from <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
- Bi, Y., Xing, Y., He, J., Qin, Y., Zhao, H., & Li, Y. (2023). Effect of graphite addition on microstructure and properties of TiC–Ti5Si3–SiC composite coatings reacted from Ti–SiC-graphite powders. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 6211–6224. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.11.032>
- Bianco, A., Cheng, H. M., Enoki, T., Gogotsi, Y., Hurt, R. H., Koratkar, N., Kyotani, T., Monthieux, M., Park, C. R., Tascon, J. M. D., & Zhang, J. (2013). All in the graphene family – A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials. *Carbon*, 65, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2013.08.038>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering AN INTRODUCTION*. [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20(z-lib.org).pdf)
- Chen, W., Yan, L., & Bangal, P. R. (2010). Chemical reduction of graphene oxide to graphene by sulfur-containing compounds. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(47), 19885–19890. https://doi.org/10.1021/JP107131V/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JP-2010-07131V_0005.GIF
- Chua, C. K., & Pumera, M. (2014). Chemical reduction of graphene oxide: A synthetic chemistry viewpoint. *Chemical Society Reviews*, 43(1), 291–312. <https://doi.org/10.1039/C3CS60303B>
- Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M. J., Kalyanasundaram, S., & Mosse, L. (2004). Comparison of surface strain for stamp formed aluminum and an aluminum-polypropylene laminate. *Journal of Materials Science*, 39(19), 6087–6088. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000041707.68685.72/METRICS>
- Edokali, M., Bocking, R., Mehrabi, M., Massey, A., Harbottle, D., Menzel, R., & Hassanpour, A. (2023). Chemical modification of reduced graphene oxide membranes: Enhanced desalination performance and structural properties for forward osmosis. *Chemical Engineering Research and Design*, 199, 659–675. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2023.10.022>
- Fernández-Merino, M. J., Guardia, L., Paredes, J. I., Villar-Rodil, S., Solís-Fernández, P., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D. (2010). Vitamin C is an ideal substitute for hydrazine in the reduction of graphene oxide suspensions. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(14), 6426–6432. https://doi.org/10.1021/JP100603H/SUPPL_FILE/JP100603H_SI_001.PDF
- Flora, B., Kumar, R., Tiwari, P., Kumar, A., Ruokolainen, J., Narasimhan, A. K., Kesari, K. K., Gupta, P. K., & Singh, A. (2023). Development of chemically synthesized hydroxyapatite composite with reduced graphene oxide for enhanced mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 142, 105845. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2023.105845>
- Kerli, S., Sistemleri Mühendisliği Bölümü, E., Teknoloji Fakültesi, E., Sütçü İmam Üniversitesi, K., & Geliş, T. (2017). İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT-ÇİNKO OKSİT-TİTANYUM DİOKSİT KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE UYGULAMASI. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 220–225. <https://doi.org/10.28948/NGUMUH.298162>

- Le, H. N., Thai, D., Nguyen, T. T., Dao, T. B. T., Nguyen, T. Do, Tieu, D. T., & Ha Thuc, C. N. (2023). Improving safety and efficiency in graphene oxide production technology. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4440–4453. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.04.050>
- Rudenko, R. M., Voitsihovska, O. O., & Poroshin, V. N. (2023). Enhancement of electrical conductivity of hydrazine-reduced graphene oxide under thermal annealing in hydrogen atmosphere. *Materials Letters*, 331, 133476. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.133476>
- Schniepp, H. C., Li, J. L., McAllister, M. J., Sai, H., Herrera-Alonson, M., Adamson, D. H., Prud'homme, R. K., Car, R., Seville, D. A., & Aksay, I. A. (2006). Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide. *The Journal of Physical Chemistry. B*, 110(17), 8535–8539. <https://doi.org/10.1021/JP060936F>