

Araştırma Makalesi / Research Article

İyonik Polimer Eyleyicilerde Kullanılan Ag katkılı Grafen-esaslı Elektrot Membranların Özelliklerine İndirgenme Yönteminin Etkisi**Hülya Kaftelen Odabaşı***Fırat Üniversitesi, Havacılık Yüksek Okulu, Uçak Gövde-Motor Bölümü, 23180 Yazıkonak/Elazığ*
e-posta: hkodabasi@firat.edu.tr

Geliş Tarihi: 01.01.2017 ; Kabul Tarihi: 16.08.2017

Özet**Anahtar kelimeler**

"Grafen"; "Elektriksel Direnç"; "İyonik Polimer Eyleyiciler"; "Elektrot Malzemesi"

İyonik elektroaktif polimer eyleyiciler, hafif olmaları ve düşük gerilimlerde (< 5V) elektrik uyarımına karşılık mekanik deformasyon göstererek doğal kasların hareket mekanizmasını en iyi şekilde taklit edebilmelerinden dolayı "yapay kaslar" olarak kullanılabilen malzemelerdir. Ancak, iyonik elektroaktif polimer eyleyicilerde kullanılan Au, Pt gibi geleneksel elektrot malzemeleri, hem pahalı olması hem de eyleyici performansını etkileyen çatlak oluşumuna sebep olması bu tür metal elektrotların kullanımını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, Ag katkılı grafen esaslı elektrot malzemeleri iki farklı indirgenme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Ag parçacık miktarının ve indirgenme yönteminin elektrot malzemelerinin yüzey dirençleri dolayısıyla iletkenlikleri üzerine etkileri incelenmiştir. İndirgenmiş grafen oksit (RGO) tozları, XRD, FTIR ile, elektrot malzemeleri ise XRD, SEM ve Van der Pauw yöntemi kullanılarak karakterize edilmiştir. Sonuçlar, RGO hazırlama metodunun Ag parçacık katkılama ile karşılaştırıldığında yüzey direncinin azalmasında daha etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Elde edilen düşük yüzey direncine sahip (< 5 Ωcm) Ag parçacık/grafen elektrotlar, iyonik polimer eyleyicilerde metal elektrotlar yerine kullanılabilir.

Effect of Reduction Method on the Properties of Ag added Graphene-based Electrode Membranes for Ionic Polymer Actuators**Abstract****Keywords**

"Graphene"; "Electrical Resistivity"; "Ionic Polymer Actuators"; "Electrode Materials"

Ionic electroactive polymer actuators are light weight and showing the mechanical deformation against to low voltage (<5 V) electrical stimulation, and they are useable as artificial muscles due to mimicking the action mechanism of natural muscle in a best way. However, conventional electrode material such as Pt used in ionic electroactive polymer actuators is both being extremely expensive and causing formation of cracks affecting the performance of the actuator which limit the use of such metal electrode. In this study, Ag added graphene-based electrode materials were prepared using two different reduction method. The effects of Ag particle amount and the reduction method on the surface resistance of electrode materials were investigated. Reduced graphene oxides (RGO) were characterized by XRD, FTIR while electrode materials were characterized by XRD, SEM and Van der Pauw method. The results reveals that RGO preparation methods are more effective for reducing surface resistance when compare to Ag particle addition. The obtained Ag particle/graphene electrodes having the low surface resistance (< 5 Ωcm) can be used in ionic polymer actuators instead of metal electrodes.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Eyleyiciler, çalışma prensiplerine bağlı olarak, elektrik, optik, termal veya pnömatik gibi uyarım mekanizmaları ile tersinir bir deformasyon gösteren akıllı malzemelerdir (Okuzaki ve ark. 2013). Şekil bellekli alaşımlar, piezoelektrik seramikler ve elektroaktif polimerler (EAP)

gerilimle çalışan eyleyici malzemelerine örnek verilebilirler (Huang ve ark. 2012). Elektro-aktif polimerlerin bir türü olan iyonik elektroaktif polimerler (İEAP), biomimetik hareket yetenekleri, düşük gerilimdeki (1-5V) elektrik uyarımlarına büyük yerdeğişimi üretebilmeleri, hafif olmaları, istenilen amaç doğrultusunda kolayca minyatürize edilebilmeleri ve düşük maliyetlerinden dolayı

geleceğin eyleyici teknolojisi için büyük ilgi uyandırmıştır (Shahinpoor ve Kim, 2004). Bu tür polimer eyleyiciler, mikro-elektromekanik sistemler (mikropompalar, mikro tutucular), biyomimetik uygulamalar (yapay kaslar, yapay su altı canlıları) ve biyomedikal uygulamalar (kontrollü ilaç salınımı, kateter ve endoskopik görüntüleme cihazları) gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır (Shahinpoor ve Kim, 2004).

İyonik elektroaktif polimer (İEAP) eyleyiciler, iyonik iletken bir elektrolit tabakası ile genellikle iyi iletkenliklerinden dolayı Au, Pt ve Ag gibi metal elektrot tabakaları ile oluşturulan lamine kompozit yapıya sahiplerdir (He ve ark. 2015). Ancak düşük esneklik ve gerinim direnci göstermeleri ve pahalı olmaları, Au ve Pt' in İEAP eyleyicilerde elektrot malzemesi olarak kullanımını sınırlandırmaktadır (Lian ve ark. 2010). Ayrıca, bu metallerin yeterli esnekliğe sahip olmamasından dolayı bükülme hareketleri sonucu eyleyicilerin yüzeylerinde çatlak oluşumu gözlenmiş ve bunun eyleyicilerin hareket performanslarını, dolayısıyla ömrünü azalttığı görülmüştür (Tiwari R., E. Garcia, 2011; Wood ve ark. 2009).

Son birkaç yıl içinde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, Au, Pt, Ag gibi elektrot malzemelerine alternatif, daha esnek, iyi iletken özellik gösteren karbon nanotüp, grafen esaslı yeni elektrot malzemeleri geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Lu ve ark. 2013). Grafen, karbon nanotüp ile karşılaştırıldığında, yüksek yüzey alanına (2600-2700 m²/g) sahip olması, ucuz ve kolay şekilde üretilebilmelerinden dolayı, yüksek performanslı eyleyici eldesi için elektrot malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Lu ve ark. 2012). Çatlaksız, hidrofobik ve sıvı geçişine izin vermeyen grafen elektrotlar, yeni bir iyonik polimer-grafen kompozit eyleyici türünün doğmasına sebep olmuştur (Oh ve Jeon, 2016).

Gümüş katkılı indirgenmiş grafen oksit (RGO) elektrot içeren eyleyicilere ait sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Lu ve ark. 2013, Kaftelen ve ark. 2015). Lu ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada, düşük gerilim ($\pm 2V$) değerlerinde ve geniş frekans aralıklarında (0.01-10 Hz) çalışabilen Ag/RGO elektrot içeren poliviniliden florit (PVDF) eyleyicileri üretmişlerdir. Ag/RGO elektrot malzemesi, hidrazin ve amonyak gibi toksik kimyasallar kullanılarak grafen ile Ag nano parçacıkların indirgenmesi

işlemi, aynı anda gerçekleştirilmiştir. Kaftelen ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada ise, düşük gerilim ($\pm 3V$) altında çalışabilen Ag/RGO/kitosan eyleyicilerin elektrot üretimi, termal indirgenmiş grafenin AgNO₃ çözeltisi içerisinde askorbik asitle çöktürülerek gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan her iki çalışmada da, gerilime karşı yer değiştirme gösteren eyleyicilerin elektrot malzemesinde RGO:Ag oranı yaklaşık 1/35 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise farklı oranlarda (RGO:Ag = 1/2 ve 1/3) Ag ilavesi yanında, literatürdeki (Lu ve ark., 2013; Kaftelen ve ark., 2015) eyleyicilerin düşük voltajlara cevap verebilirliği göz önüne alınarak Ag/RGO oranı literatüre benzer (Ag/RGO: 1/35) şekilde de uygulanmıştır. Elektrot malzemelerinin özelliklerine RGO üretim yöntemlerinin (termal ve çift indirgenme) ve Ag parçacık ilavesinin etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Grafen oksit eldesi

Elektrot malzemelerinin hazırlanmasında başlangıç malzemesi olan grafen oksit üretimi, doğal grafit (%99,8, -325 mesh), sodyum nitrat (NaNO₃, %98), potasyum permanganat (KMnO₄, analitik saflıkta) ve hidroklorik asit (HCl, %38), sülfürik asit (H₂SO₄, > %95) ve hidrojen peroksit (H₂O₂, %50) kullanılarak modifiye edilmiş Hummer metodu ile gerçekleştirilmiştir (Hummers ve Offeman, 1958). Kısaca, grafit tozu (3 g) konsantre sülfürik asit ve sodyum nitrat çözeltisi ile manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra karışım 0 °C'ye soğutulmuştur. Sonrasında kuvvetli oksitleyici olan KMnO₄ reaksiyon sıcaklığı 20 °C altında olacak şekilde çözeltilmeye yavaşça eklenmiş ve çözelti su banyosunda bekletilmiştir. Karışıma 130 ml saf su ilave edilerek en az 4-6 saat karıştırıldıktan sonra sarı renge dönmesi için beklenmiştir. Çözeltiye % 50 H₂O₂ çözeltisi yavaşça ilave edilmiştir ve oluşan ekzotermik reaksiyon sonucu grafen oksit eldesi gerçekleştirilmiştir. Santrifüj (Nüve, NF 400) kullanılarak (4000 rpm) grafen oksitin çözünmemiş kimyasallardan arındırılması ve temizliği gerçekleştirilmiştir. Sonrasında 40 °C'de vakumda

kurutma işlemi ile saf grafen oksit eldesi gerçekleştirilmiştir.

2.1. Ag parçacık takviyeli indirgenmiş grafen oksit (RGO) ve elektrot üretimi

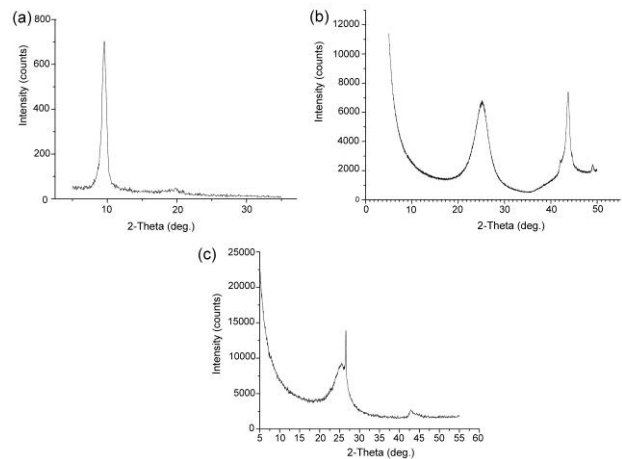
Grafen oksitin indirgenmesi işlemi 2 farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Grafen oksit, öncelikle askorbik asit (%99, Alfa Aesar) ve sonrasında 450 °C'de 45 dk N₂/H₂ ortamında çift aşamalı olarak indirgenmiştir ve bu tozlara Ag ilavesi yapılarak elektrot malzemesi elde edilmiştir. Diğer yöntemde ise grafen oksitin sadece termal yöntemle (450 °C'de 45 dk N₂/H₂) indirgenmesi yapılarak Ag parçacık ilavesi gerçekleştirilmiş ve bu tozlardan da elektrot malzemesi üretilmiştir. Kolaylık olması açısından çift indirgenme yöntemi ile üretilen tozlar Ag/LTRGO ve termal yöntemle üretilen tozlar ise Ag/TRGO olarak adlandırılmıştır. Askorbik asit ile indirgenme yönteminde, 200 mL saf su içerisine grafen oksit ilavesi yapılarak homojen bir süspansiyon elde edilmiştir ve buz banyosuna alınan çözeltiliye yaklaşık 200 mg askorbik asit ilave edilerek 95 °C'de manyetik karıştırıcıda yağ banyosu içerisinde 24 saat soğutucuya bağlanmıştır. Sonrasında süspansiyon içerisindeki tozlar santrifüj cihazı kullanılarak çöktürülmüş ve kurutulmuştur. Bu tozlara termal işlem uygulanarak LTRGO tozları elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Ag parçacık üretimi Dihn ve ark. (2014) yapmış olduğu deneysel çalışma göz önüne alınarak yapılmıştır. Ancak Dihn ve ark. (2014) yapmış olduğu çalışmadan farklı olarak grafen oksit ve Ag parçacıklar eş zamanlı olarak askorbik asit ile indirgenmemiş, Ag parçacıkları ve RGO tozları ayrı ayrı hazırlanmıştır. Buna göre, 5g (0.15 M) AgNO₃ (Sigma Aldrich, ≥99.5%) 200 mL saf su içerisinde ultrasonik banyoda kullanılarak homojen bir çözeltili hazırlanmıştır. Sonrasında çözeltiliye 0.240 g (6.8mM) askorbik asit ilavesi yapılmış ve çözeltili soğutucu kullanılarak yağ banyosunda 95 °C'de 3 saat süre ile karıştırılmıştır (Dihn ve ark. 2014). Yağ banyosundan alınan çözeltili, saf su kullanılarak santrifüjde çöktürülmüştür ve katı Ag parçacıkları elde edilmiştir. Vakumlu etüvde kurutulan Ag parçacıklar, LTRGO ve TRGO tozları ile farklı oranlarda karıştırılarak (RGO: Ag oranı 1/2, 1/3 ve

1/35) elektrot malzemeleri elde edilmiştir. Elektrot membran üretiminde bağlayıcı olarak 45 mg kitosan (Sigma Aldrich, orta moleküler ağırlıklı) kullanılmış ve kitosan %2'lik asetik asit çözeltisi içerisinde 60 °C'de 30 dk manyetik karıştırıcı kullanılarak çözdürülmüştür. Ag/LTRGO ve Ag/TRGO tozu ayrı ayrı kitosan karışımına ilave edilmiş ve karışıma 4 mL dimetil formamid (DMF, Merck, analitik saflıkta) ilavesi ile ultrasonik homojenizatör (Bandelin, HD 3200) kullanılarak 15 dk homojenize edilmiştir. Hazırlanan çözeltili teflon kaba dökülerek etüvde 60°C'de kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tozların karakterizasyonu, X-ışını difraksiyonu (XRD) (Rigaku), taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Zeiss, Evo LS) ve Fourier dönüşüm kızılötesi (FTIR) (Schimadzu) cihazları kullanılarak yapılmıştır. Elektrot malzemelerinin mikroyapı incelemeleri, direnç ölçümleri (Keithley 2400) gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

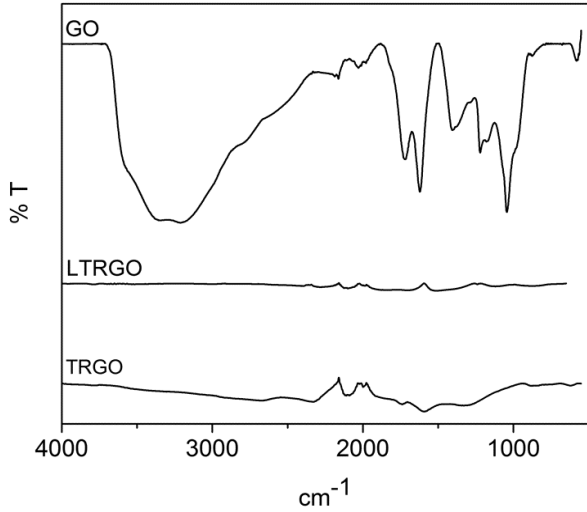
Şekil 1'de grafen oksit (GO) ve çift indirgenmiş grafen oksit (LTRGO) ile 450 °C'de 45 dk termal indirgenmiş grafen oksit (TRGO) tozlarına ait X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri verilmektedir. Şekil 1(a)'da grafen oksite ait karakteristik XRD piki 2θ=9.56°'de görülmektedir.



Şekil 1. (a) GO, (b) TRGO ve (c) LTRGO tozlarına ait XRD analizleri

Çift indirgenmiş grafen ve termal indirgenmiş oksite ait ana pik (d_{002}) $2\theta=24^\circ-25^\circ$ 'de geniş bir pik şeklinde görülmektedir. $2\theta=43^\circ$ de görülen pikler kısa mesafeli düzende (short range order)

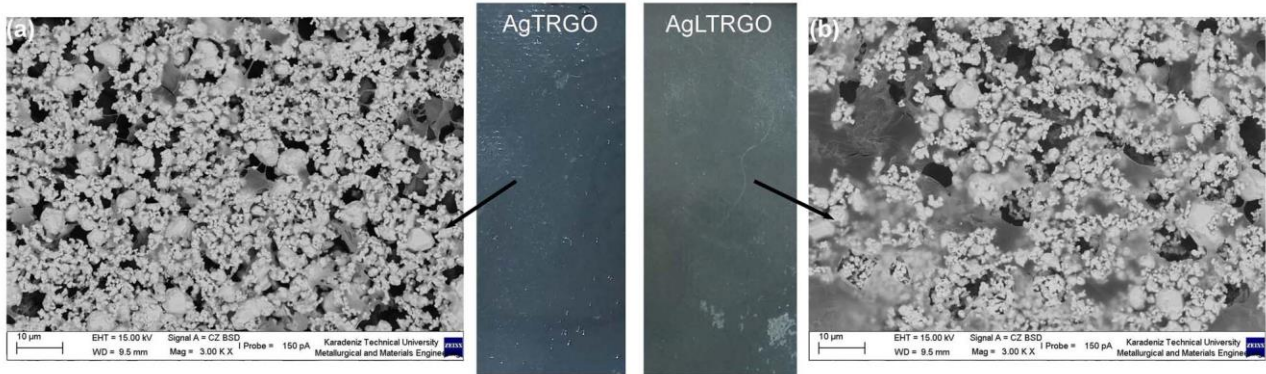
istiflenmiş grafen tabakalarından kaynaklanmaktadır ve literatürde verilen XRD analizleri ile uyumluluk göstermektedir (Stobinski ve ark. 2014; Park ve ark. 2011). Ayrıca, her iki indirgenme yöntemi sonucunda da $2\theta = 9.56^\circ$ 'de görülen pikin bulunmaması, grafen oksitin her iki yöntemle de indirgenmiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. GO, LTRGO ve TRGO tozlarına ait FTIR spektrumları

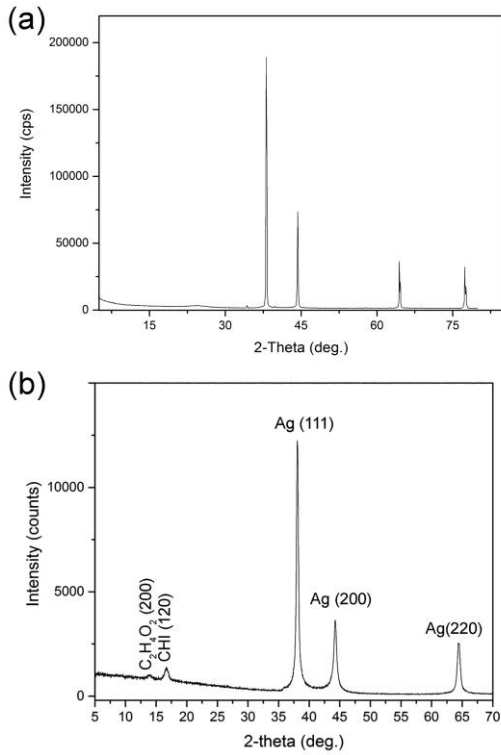
Grafen oksit ve indirgenmiş grafen oksit tozlarına ait FTIR spektrumları Şekil 2 'de verilmektedir.

Grafen oksit (GO) tozuna ait FTIR grafiği, O-H titreşimleri 3210 cm^{-1} , C=O titreşimleri 1720 cm^{-1} , okside olmamış grafitin iskelet yapısından kaynaklanan geçirgenlik piki 1620 cm^{-1} , C-OH titreşimleri 1220 cm^{-1} ve C-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanan yüzde geçirgenlik değerleri 1045 cm^{-1} 'deki dalga sayısında görülmektedir. Grafen oksite ait FTIR pikleri ile karşılaştırıldığında 2 farklı yöntemle üretilen indirgenmiş grafen oksit tozlarının FTIR grafiğinde oksijenin fonksiyonel grubuna ait önemli pik görülmemesi indirgenmenin gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Şekil 3 'de Ag/TRGO (TRGO: Ag=1/35) ve Ag/LTRGO (LTRGO: Ag=1/35) tozlarından elde edilen elektrot membranlara ait makro ve mikroyapı görüntüleri verilmektedir. SEM görüntülerinden Ag parçacıklarının geniş boyut aralığına sahip olduğu görülmektedir. Nanoboyutta bulunan Ag tanelerinin de bir arada bulunduğu ve bu Ag parçacıkların elektrot yüzeyinde bütün bölgelere homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 3. Elektrot malzemelerinin makro ve SEM görüntüleri (a) Ag/TRGO, (b) Ag/LTRGO

Ayrıca, Ag parçacıkların kitosan ile bağlanmış olduğu ve grafen tabakaları arasında da bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4. (a) Ag/LTRGO tozu (b) Ag/LTRGO elektrot malzemelerine ait XRD analizleri

Ag katkıli indirgenmiş grafen oksit (Ag/LTRGO) tozuna ait XRD analizinde (Şekil 4a) 38.1°, 44.2° 64.4° ve 77.4° piklerin sırasıyla yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip gümüşe ait sırasıyla (111), (200), (220) ve (311) kristalografik düzlemlerini göstermektedir. Ag/TRGO tozuna ait XRD grafiği Şekil 4a'da verilen grafiğe benzer olduğundan burada sadece Ag/LTRGO tozlarına ait XRD grafiği verilmiştir. Ag/LTRGO tozlarından elde edilen elektrot malzemesine ait XRD analizleri Şekil 4 (b)'de verilmektedir. Elektrot malzemelerinin XRD analizlerinde ana pikler, kübik kristal yapısına sahip Ag'e (JPDS no. 001-1172) aittir. Ag pikleri yanında ayrıca eser miktarda asetik asit (C₂H₄O₂) (JPDS no. 037-1615) pikleri ile (C₁₂H₂₁NO₁₁)_n formülüne sahip monoklinik kristal yapısına sahip kitosan (JPDS no. 054-1952) polimerine ait pikler de bulunmaktadır. Kitosan polimerini çözmek için kullanılan asetik asit fazının XRD analizlerinde görülmesinin sebebi, elektrot malzemesinin kurutulması sırasında asetik asitin tamamının buharlaşmamasından kaynaklanmaktadır.

Eyleyicilerin performanslarını etkileyen en önemli parametrelerden biri elektrot malzemelerinin

yüzey dirençleri dolayısıyla da iletkenlik değerleridir. İki farklı yöntemle indirgenmiş, farklı oranlarda Ag parçacık ilaveli elektrotların özdirenç değerleri (Tablo 1), Van der Pauw yöntemi ile belirlenmiştir. Tabloda verilen Ag/TRGO ve Ag/LTRGO elektrot membranlarının kalınlıkları 0.01 cm ile 0.02 cm arasında değişmektedir. En düşük elektriksel direnç değeri olan 0.0668 Ωcm değerine, çift indirgenmiş grafen oksit içeren ve LTRGO:Ag oranı 1/35 olan elektrot malzemesi ile ulaşılmıştır. Dolayısıyla en yüksek iletkenlik değeri 14.96 S/cm değerine Ag/LTRGO (RGO:Ag = 1/35) elektrot malzemesinde elde edilmiştir. Ag katkı oranı arttıkça elektrotların özdirenç değerleri düşmekte dolayısıyla iletkenlik değerleri artmaktadır.

Tablo 1'den görüleceği üzere, aynı oranda (örneğin, 1/2) Ag içeren Ag/TRGO ve Ag/LTRGO elektrotlarının özdirençleri karşılaştırıldığında, Ag/TRGO elektrotunun özdirençinin yaklaşık 1.5 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, Ag/LTRGO elektrotunda Ag katkı oranı 3 katına çıktığında ise özdirenç değeri 2.66 Ωcm değerinden 2.22 Ωcm değerine düşmektedir (Tablo 1). Buradan, elektrotların özdirenç değerlerinin azalmasında dolayısıyla iletkenliğin artmasında Ag ilavesinden çok RGO üretim yönteminin etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Elektrotların farklı akımlara karşı özdirenç ve iletkenlik değerleri

Elektrot	Uygulanan Akım (A)	Özdirenç (Ωcm)	İletkenlik (S/cm)	Kalınlık (cm)
Ag/TRGO	0.01	0.1630	5.65	0.016
	0.005	0.1725		
	0.001	0.1808		
	0.0005	0.1915		
ortalama		0.1770		
Ag/TRGO (TRGO:Ag=1/35)	0.001	4.3973	0.22	0.02
	0.0005	4.4178		
	0.0001	4.5348		
	0.002	4.4101		
ortalama		4.4395		
Ag/LTRGO (LTRGO:Ag=1/2)	0.001	2.8337	0.37	0.011
	0.0005	2.6018		
	0.0001	2.6482		
	0.002	2.5819		
ortalama		2.6664		
Ag/LTRGO (LTRGO:Ag=1/3)	0.001	2,2080	0.45	0.015
	0.0005	2.2143		
	0.0001	2.2874		
	0.002	2.1821		
ortalama		2.2230		
Ag/LTRGO (LTRGO:Ag=1/35)	0.01	0,0682	14.96	0.013
	0.005	0.0761		
	0.001	0.0620		
	0.0005	0.0610		
ortalama		0.0668		

4. Tartışma ve Sonuç

Hummer metodu ile hazırlanmış grafen oksitten iki farklı yöntemle indirgenmiş grafen oksit elde edilmiştir. Bu RGO'lere farklı oranlarda Ag ilavesi yapılarak iyonik polimer eyleyicilerde kullanılacak elektrot malzemeleri üretilmiştir. İyonik polimer eyleyicilerde yüzey elektrik direncinin düşük olması eyleyicinin yüksek bükülme yeteneğine sahip olması açısından önemlidir (Punning ve ark. 2007). Bu çalışmada, Ag miktarının artması ile elektrot malzemelerinin yüzey dirençlerinin düştüğü görülmüştür, ancak direnç değerlerinin azalmasında RGO üretim yönteminin Ag katkısından daha etkili olduğu görülmektedir. Chen ve ark. (2009) yapmış olduğu çalışmada, Nafion elektrolit membran üzerine Ag kaplama sonucu üretilen iyonik polimer eyleyicilerin yüzey dirençlerinin 5 Ωcm 'den daha küçük olduğu ve bu eyleyicinin 2.1 V gerilim altında maksimum deformasyon (90°) gösterdiğini raporlamışlardır. Tablo 1'de yüzey dirençlerinin 5 Ωcm 'in altında olması bu elektrotlardan elde edilecek eyleyicilerin gerilim altında bükülme hareketi sağlanabileceğini göstermektedir.

Lu ve ark.(2013)'ünün çalışmasında, 0.15 mm kalınlığındaki Ag/grafen elektrot malzemesinin öz direnç değeri 0.004 Ωcm olarak raporlanmıştır. Bu öz direnç değerinin (0.004 Ωcm) Tablo 1'de verilen benzer oranda Ag içeren Ag/LTRGO elektrotuna göre daha düşük olmasının nedeninin RGO hazırlanması aşamasında indirgenme ajanının (hidrazin hidrat) farklı olması ve Ag katkılanmasının RGO hazırlanması sırasında gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, çift indirgenme yöntemi ile üretilen membranların yüzey dirençlerinin daha düşük olması, bu yöntemin termal indirgenme yöntemine göre daha etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Yüzey elektrotlarının homojenliği ve düşük dirence sahip olmaları eyleyicilerin performansını doğrudan etkilediğinden, bu çalışmada en düşük dirence (0.066 Ωcm) sahip LTRGO:Ag (1/35) elektrotundan üretilebilecek eyleyicinin daha iyi bükülme hareketi göstermesi beklenmektedir. Ayrıca, yapılan bu çalışma ile,

Ag/RGO elektrot malzemeleri, biyouyumlu iyonik elektroaktif polimer eyleyiciler için kolay ve ucuz bir yöntem olan askorbik asit ve sonrasında termal indirgenme kullanılarak üretilmişlerdir.

Kaynaklar

- Chen Q., Xiong K., Bian K., Jin N. and Wang, B. 2009. Preparation and performance of soft actuator based on IPMC with silver electrodes. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, **4**, 436–440.
- Dinh D.A., Hui K.S., Hui K.N., Cho Y.R., Zhou W., Hong X., Chun H-H. 2014. Green synthesis of high conductivity silver nanoparticle-reduced graphene oxide composite films, *Applied Surface Science*, **298** 62–67.
- He, Q., Yu, M., Yang, X., Kim, K., J. and Dai, Z. 2015. An ionic electro-active actuator made with graphene film electrode, chitosan and ionic liquid. *Smart Materials and Structures*, **24**, 1-9.
- Huang Y., Liang J.J. and Chen Y.S. 2012. The application of graphene based materials for actuators. *Journal of Materials Chemistry*, **22**, 3671-3679.
- Hummers W.S. and Offeman R.E. 1958. Preparation of graphitic oxide. *Journal of American Chemistry Society*, **80**,1339-1339.
- Kaftelen H., İtik M., Çakır A.O., Sancak C. 2015. Ag Nanoparticle Doped Reduced Graphene Oxide-based Electroactive Biopolymer Actuators, Metech'15 III: International Conference on Innovative Materials and Structures Technologies in Metallurgical Engineering, İstanbul, Türkiye, 43-50.
- Lian Y. F., Liu Y. X., Jiang T., Shu J., Lian H. Q. and Cao M. H. 2010. Enhanced Electromechanical Performance of Graphite Oxide-Nafion Nanocomposite Actuator. *Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 9659-9663.
- Lu L. H., Liu J. H., Hu Y., Chen W. 2012. "Large volume variation of an anisotropic graphene nanosheet electrochemical–mechanical actuator under low voltage stimulation", *Chemical Communication*, **48**, 3978-3980.
- Lu L., Liu J., Hu Y., Zhang Y., Chen W. 2013. Graphene-stabilized silver nanoparticle electrochemical electrode for actuator design. *Advanced Materials*, **25**, 1270-1274.
- Oh H-K. and Jeon, J-H. 2015. Graphene-based Ionic Polymer Actuators, Chapter 3, Ionic Polymer Metal Composites: Smart Multi-Functional Materials and

Artificial Muscles, Shahinpoor, M. (Ed.) Royal Society Chemistry Smart Materials, ISBN: 978-1-78262-077-8, USA, 148-168.

Okuzaki H., Kuwabara T, Funasaka K., Saido T. 2013. Humidity sensitive polypyrrole films for EAP actuators. *Advanced Functional Materials*, **36**, 4400-4407.

Park, S., An, J., Potts, J. R., Velamakanni, A., Murali, S. and Ruoff, R.S., 2011. Hydrazine-reduction of graphite- and graphene oxide. *Carbon*, **49**, 3019-3023.

Punning, A., Kruusmaa, M. and Aabloo A., 2007. Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators. *Sensors and Actuators A*, **133**, 200–209.

Shahinpoor M. and Kim K.J. 2004. Ionic polymer-metal composites: III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles, *Smart Materials and Structures*, **13**, 1362-1368.

Stobinski, L. , Lesiak, B., Malolepszy, A. , Mazurkiewicz, M. , Mierzwa, B., Zemek, J., Jiricek, P. and Bieloshapka, I. 2014. Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **195**, 145–154.

Tiwari R., E. and Garcia E. 2011. The state of understanding of ionic polymer metal composite architecture: a review. *Smart Materials and Structures*, **20**, 083001-16.

Wood D. L., Chlistunoff J., Majewski J. and Borup R. L. 2009. Nafion Structural Phenomena at Platinum and Carbon Interfaces. *Journal of American Chemical Society*, **131**, 18096-18104.