



Grafit Nanoplaka Takviyeli Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Tabanlı Nano-Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu

Development and Characterization of Graphite Nanoplate Reinforced Ultra High Molecular Weight Polyethylene Based Nano-Composite Materials

Lütfiye ALTAY¹, Metehan ATAGÜR², Müslüm ERBEKTAŞ³, Mehmet SARIKANAT^{1*}

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir

²İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İzmir

³FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., Oğulbey Mahallesi Kumludere Caddesi No: 11, 06830 Gölbaşı, ANKARA

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: sarikanat.mehmet@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 08.07.2018

Kabul Tarihi / Accepted: 07.03.2019

DOI:10.21205/deufmd.2019216201

Araştırma Makalesi/Research Article

Atıf şekli/ How to cite: ALTAY, L., ATAGÜR, M., ERBEKTAŞ, M., SARIKANAT, M. (2019). Grafite Nanoplaka Takviyeli Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Tabanlı Nano-Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. DEUFMD, 21(62), 323-330.

Öz

Bu çalışmada, 0, 0.02, 0.05, 0.1 ve %0.15 ağırlık oranlarında grafit (Gr) ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) etanol içerisinde dağıtılarak grafit takviyeli UHMWPE nano-kompozit malzemeler üretilmiştir. UHMWPE ve Gr takviyeli kompozit malzemelerin termal performansları termogravimetrik analizler ile tespit edilmiştir. UHMWPE ve kompozit malzemelerin kimyasal yapısı Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi ile incelenmiştir. Bunlara ek olarak; Gr katkısının polimerin çekme özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluk ve sertlik üzerine etkileri incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, Gr eklendikçe kompozit malzemelerin maksimum bozunma sıcaklıkları fazla etkilenmemek ile birlikte elastisite modülü ve sertlik artmakta, yüzey pürüzlülüğü düşmektedir. Çekme dayanımı ise ağırlıkça %0.1 Gr katkı oranına kadar artmakta bu orandan sonra düşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, Grafite, UHMWPE

Abstract

In this study, graphite filled ultra high molecular weight polyethylene nano-composite materials were produced by dispersing 0, 0.02, 0.05, 0.1 and 0.15wt % graphite (Gr) and ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) in ethanol. The thermal performances of UHMWPE and Gr filled composite materials were determined by thermogravimetric analysis. The chemical structure of UHMWPE and composite materials was investigated by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Additionally; the effects of Gr on the tensile properties, surface roughness, density and hardness of polymer were investigated. According to these results, as the graphite is added, the maximum degradation temperatures of the composite materials are not affected much, and the modulus of elasticity and hardness increase and the surface roughness decreases. The tensile strength increased with the addition of Gr up to 0.1wt %, but decreased with the further increase of Gr weight fraction.

Keywords: Composite materials, Graphite, UHMWPE

1. Giriş

Bir milyonu aşan molekül ağırlığına, yüksek darbe mukavemetine, iyi biyouyumluluk özelliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) yüksek performans gerektiren biyomedikal, savunma, yataklama, boru hatları vb. çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1-8]. Özellikle biyomedikal sektöründe, insan vücudundaki suni eklemler için yaygın olarak kullanımı bulunmaktadır.[9]. UHMWPE' nin biyomedikal sektöründe kullanımı esnasında düşük yüzey sertliği ve zayıf aşınma dayanımına sahip olması nedeniyle aşınma esnasında çıkan parçacıklar kemik kaybına, eklem gevşemesine ve yapay eklemlerin ömrünü sınırlayan kemik erimesine yol açmaktadır [10-14].

Günümüzde; ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilenin sürünme davranışını, aşınma direncini, mekanik özelliklerini ve yüzey sertliğini iyileştirme konusu üzerine bir çok çalışma yapılmaktadır. UHMWPE'nin aşınma ve mekanik özelliklerini iyileştirmenin bir yolu inorganik takviye/dolgu malzemelerinin kullanılarak kompozit malzemelerin üretilmesidir [9]. Bu kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Literatürde, kompozitlerde dolgu/takviye malzemeleri olarak kuvars [15], kaolin [16], zirkonyum parçacıkları [17] ve farklı şekillere sahip karbon tabanlı [14, 18-21] takviye/dolgular kullanılmaktadır. Hem endüstriyel hem de ortopedik uygulamalar için UHMWPE'nin tribolojik özelliklerini geliştirmenin yolu matris nano parçacıklar [22-23], nanofiber ve nanotüpler [25] eklemektir. Özellikle, iki boyutlu karbon nano yapısına sahip olan grafen, yüksek Young modülü (0,5-1 TPA), yüksek çekme dayanımı (130 GPa) ve mükemmel esnekliği sebebiyle çeşitli polimer kompozitlerde uygulama alanı bulmaktadır [14, 26-28]. Son yıllarda, farklı yöntemlerle üretilen grafen ve grafen oksit takviyeli polimerik kompozitler üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda grafenin polimer içine az miktarda katılmasıyla birlikte ana polimerin mekanik, aşınma, elektriksel ve termal özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir [13, 29-34].

Karbon lifi, grafit nanoplakalar, karbon siyahı ve karbon nanotüpleri de dahil olmak üzere çeşitli karbon malzemeleri, iyi termal kararlılık, düşük kayma mukavemeti, yüzey tutunması ve

yağlama özellikleri nedeniyle UHMWPE'de dolgu maddesi olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, grafit nanoplakaların UHMWPE tabanlı kompozitlerde kullanımı ile elde edilen kompozit malzemelerin yüzey pürüzlülüğüne, sertlik ve aşınma özelliklerine etkisinin araştırılması; dolayısı ile özellikle biyomedikal uygulamalardaki kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı ağırlık oranlarında grafit nanoplakalar (Gr) ile takviyelendirilmiş UHMWPE kompozit malzemeler üretilmiştir. Daha sonra bu kompozit malzemelerin çekme testleri, mikrosertlik testleri, termogravimetrik analizleri, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopileri ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizleri yapılmıştır.

2. Malzeme ve Metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, ALDRICH (Kat. No. xxxx) UHMWPE ve takviye malzemesi olarak GRAFEN A.Ş. firmasından sağlanan grafit nanoplaka kullanılmıştır.

2.2. UHMWPE ve Kompozit Film Üretimi

Bu çalışmada, ilk olarak UHMWPE etanol içerisinde mekanik olarak karıştırıldıktan sonra 0, 0.02, 0.05, 0.1 ve %0.15 ağırlık oranlarında grafit nanoplaka eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 70 Hertz'de 30 dk boyunca karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra bu karışımlar petri kabına dökülerek 170 °C' de fırın petri çerisindeki etanolün uçması ve UHMWPE'nin erimesi sağlanmıştır. Elde edilen 1 mm kalınlığındaki filmler (PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr, PE0.15Gr) petri kabından çıkarılarak grafit nanoplaka takviyeli kompozit malzemeler elde edilmiştir. Petri içerisinde kompozit film üretimi aşamaları Şekil 1'de gösterilmektedir.

2.3. Karakterizasyon

Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluk ölçümleri ASTM D792 standardına göre yoğunluk ölçüm cihazı (Densimeter MD-300S, Japonya) kullanılarak yapılmıştır.

FT-IR Analizi

Kompozit malzemelerin FT-IR analizleri 500-3500 cm^{-1} dalga sayısı aralığında yapılmıştır (Perkin Elmer 100).

Çekme Deneyi

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit numunelerin mekanik özellikleri oda sıcaklığında 5kN yük hücreğine sahip Shimadzu Autograph AG-IS serisi universal test cihazı (Shimadzu Autograph AG-IS Universal testing machine, Japonya) kullanılarak ASTM D638-10 standardına göre tespit edilmiştir. Deney yapılırken video ekstensiyometre (SHIMADZU temazsız video ekstensiyometre DVE-101/201) kullanılmıştır. Bütün deney numuneleri 50mm/dk çekme hızı ile test edilmiştir. Her bir deney grubu için 7 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopmadaki birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir.



Şekil 1. Kompozit Film Üretimi

Sertlik Deneyi

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin sertlikleri 10 gr yük altında mikrosertlik cihazı (Shimadzu HMV-G20 mikrosertlik cihazı) ile ölçülmüştür.

Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Ölçülmesi

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla (Mitutoyo SurfTest SJ301) yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri her numune için üç ayrı noktadan yapılmış ve ortalama pürüzlülük değeri alınmıştır.

Termogravimetrik Analiz (TGA)

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin termogravimetrik analizleri 30-600 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 10 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında nitrojen ortamında TGAQ500 cihazı kullanılarak (TA Instruments) gerçekleştirilmiştir.

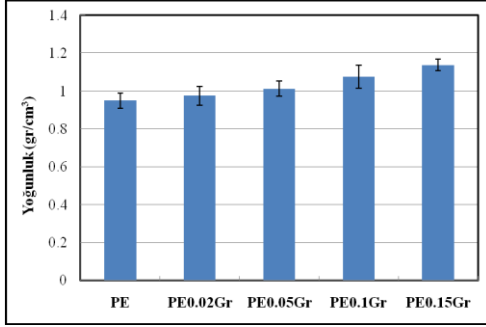
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss 300VP, Almanya) kullanılarak incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yoğunluk Tayini

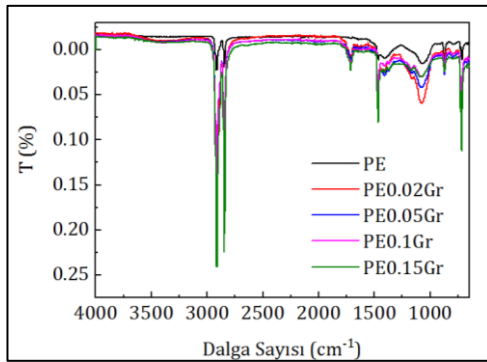
UHMWPE ve grafit içeren UHMWPE kompozitlerin ASTM D792 standardına göre ölçülen yoğunluk değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Sonuçlara göre saf PE malzemenin yoğunluk değeri $0.95 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak belirlenirken grafit nanoplaka eklendikçe kompozit malzemenin yoğunluk değerleri yükselmektedir. PE içerisine ağırlıkça %0.02, %0.05, %0.1 ve %0.15 oranlarında Gr eklendikçe yoğunluk değerleri sırasıyla 0.98, 1.01, 1.08 ve $1.14 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak tespit edilmiştir. Bu durum grafitin yoğunluğunun PE'nin yoğunluğundan daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yang ve arkadaşları (2012) grafitin yoğunluğunu $2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak ölçmüşlerdir[1].



Şekil 2. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri

3.2. FT-IR Analiz Sonuçları

Şekil 3'de PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr'nin FT-IR analizi sonuçları gösterilmektedir. 2848 ve 2916 cm^{-1} pikleri sırasıyla CH_2 ve CH_3 gruplarının simetrik ve asimetrik bağ gerilmelerinin sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. 1472 cm^{-1} piki CH_2 ya da CH_3 deformasyonlarına, 718 cm^{-1} ve 730 cm^{-1} pikleri ise CH_2 - CH_2 grupları arası salınım işaret etmekte olup tüm numunelerde gözlemlenmiştir. Şekil 3' den de görüleceği gibi grafit takviyesinin etkisi 1715 cm^{-1} piki incelendiğinde anlaşılmaktadır. PE numunesinde olmayan bu pik grafit eklendiğinde artmaktadır. 1077 cm^{-1} pikin O-C molekül yapısını temsil ettiği düşünülmekte olup grafit eklenmesiyle birlikte bu pikte kayda değer değişiklikler gözlenmemiştir [42].

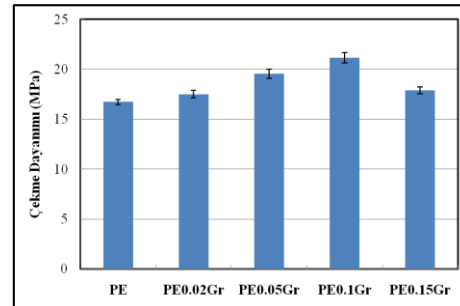


Şekil 3. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin FT-IR spektrumları

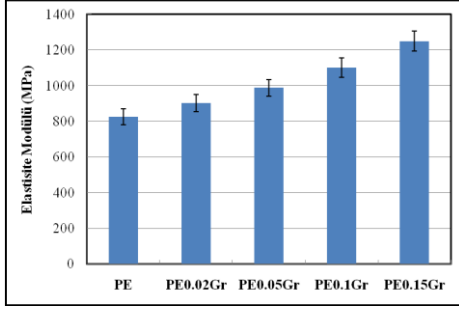
3.3. Çekme Testi

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin çekme dayanımları ve çekme modülleri Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü üzere PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerinin çekme dayanımları sırasıyla 16.72, 17.51, 19.54, 21.15 ve 17.89 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre ağırlıkça %0.1 grafit katkısına kadar çekme dayanımı artış göstermektedir. Bunun sebebi grafit nanoplakaların pürüzlü ve buruşuk bir yüzeye sahip olmasından dolayı matris etrafını sararak daha iyi bir mekanik kitlenme sağlayarak daha iyi kuvvet iletimi sağlanmasıdır [2]. Ancak bu orandan sonra çekme dayanımı düşüş göstermektedir. bunun sebebi daha yüksek oranlarda grafit yüklemesinin polimer içerisinde istenilen düzeyde homojen dağıtılamaması olarak söylenebilir. Şekil 5'e göre çekme modülü grafit yüklemesi ile birlikte artmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan UHMWPE malzemenin elastisite modülü 825 MPa iken ağırlıkça %0.15 grafit yüklenmesi ile birlikte oluşturulan kompozit malzemenin elastisite modülünün 1251 MPa değerine yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebi grafen yapısına benzer grafit nanoplakaların yüksek elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır [3].

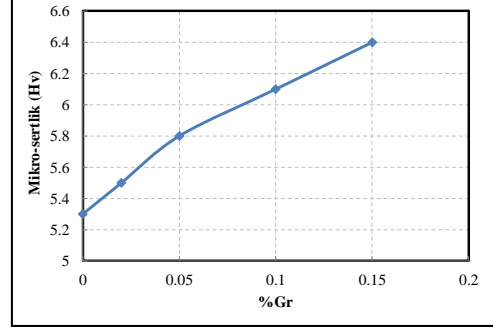
Şekil 6'da ise eklenen grafit miktarı ile birlikte kopmadaki birim şekil değiştirmenin nasıl değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre grafit yüklenmesi ile birlikte malzemelerin kopmadaki birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise yüklenen Gr miktarı arttıkça UHMWPE kompozitlerin plastik deformasyon miktarının azalması olarak gösterilebilir [4].



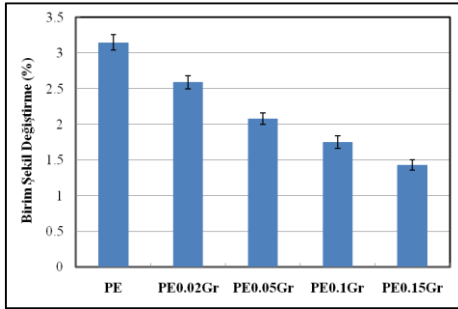
Şekil 4. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin çekme dayanım değerleri



Şekil 5. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin elastisite modülü değerleri



Şekil 7. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin mikrosertlik (Hv) değerleri



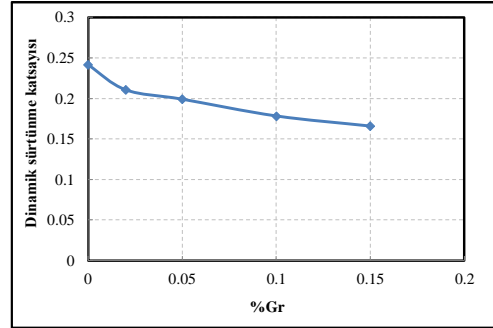
Şekil 6. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin kopmadaki birim şekil değiştirme (%) değerleri

3.4. Sertlik testi

Sertlik deneyi sonucunda elde edilen UHMWPE ve grafit takviyeli kompozit malzemelerin mikrosertlik değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen mikrosertlik değerleri incelendiğinde UHMWPE içerisine grafit eklendikçe kompozit malzemelerin yüzey sertliğinin saf UHMWPE malzeme ile karşılaştırıldığında arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre saf UHMWPE'nin sertliği 5.3 Hv değerinden sırasıyla PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr kompozit filmleri için 5.5, 5.8, 6.1 ve 6.4 Hv değerlerine yükselmiştir. Üstün mekanik özelliklerinden (yüksek elastik modülüne ve sertlik değeri) dolayı grafit nanoplakalarının yükü taşıması ve yük aktarımını yapmasından dolayı mikrosertlik değerlerinin yükseldiği söylenebilir[5-6].

3.5. Sürtünme Katsayısının Tespiti

UHMWPE ve grafit nanoplaka takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerinin yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den görüleceği üzere UHMWPE malzemeden üretilmiş malzemenin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.365 olarak ölçülmüştür. UHMWPE içerisine ağırlıkça 0.02, 0.05, 0.1 ve %0.15 grafit eklenmesi ile ortalama yüzey pürüzlülük katsayısı değerleri sırasıyla 0.31, 0.29, 0.24 ve 0.20 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre UHMWPE içerisine Gr eklenmesiyle yüzey sürtünme katsayısı değerleri azalmaktadır.



Şekil 8. PE, PE0.02Gr, PE0.05Gr, PE0.1Gr ve PE0.15Gr filmlerin sürtünme katsayısı değerleri

Bu düşüşün sebebi grafitin polimer içerisinde yağlayıcı etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır [4, 7-8].

3.6. Termogravimetrik Analiz (TGA)

UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin termogravimetrik analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bozunma sıcaklığı polimer malzemelerde termal kararlılığı belli eden önemli bir parametredir. Bozunma sıcaklık değerleri grafit ekledikçe düşüş göstermektedir.

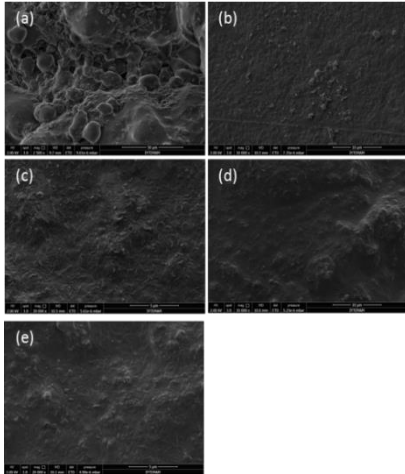
Bu malzemenin termal kararlılığında azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca Tablo 1' den UHMWPE içerisine eklenen grafit takviyesinin ağırlıkça oranı arttıkça bozulan kütle kaybı miktarının anlamlı olarak değişmediği görülmektedir.

Tablo1.UHMWPE ve grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin TGA sonuçları

Örnek	Maksimum Bozunma Sıcaklığı (°C)	Bozulan kütle (%)
PE	484	99.14
PE0.02Gr	481	98.96
PE0.05Gr	480	98.85
PE0.1Gr	480	98.57
PE0.15Gr	480	98.35

3.7. Morfolojik Analiz

UHMWPE ve grafit takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 9' da verilmiştir. Grafit nanoplaka takviyesinin polimer içerisindeki dağılımında gözle görülür miktarda bir topaklanma olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7. a) PE, b) PE0.02Gr, c) PE0.05Gr, d) PE0.1Gr ve e) PE0.15Gr filmlerin SEM görüntüleri

4. Sonuç

Bu çalışmada ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilene ağırlıkça farklı oranlarda grafit nanoplaka eklenmesinin elde edilen kompozit malzemelerin mekanik, termal, fiziksel ve morfolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Grafit nanoplaka katkısının ağırlıkça %0.1 oranına kadar çekme dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Kompozitlerde, elastisite modülünün ve mikro sertlik değerlerinin eklenen grafit nanoplaka miktarı arttıkça arttığı gösterilmiştir. Kopmadaki birim şekil değiştirme ve yüzey pürüz değerleri ise eklenen grafit miktarına bağlı olarak azalmıştır. Grafit takviyeli UHMWPE kompozit malzemelerin termal bozunma sıcaklıklarında UHMWPE'e göre bir miktar azalma görülmüştür. Grafit katkılı UHMWPE kompozit malzemelerin UHMWPE'ne kıyasla artan sertlik ve elastisite modülünün ve azalan yüzey sürtünme katsayıları, grafit nanoplakaların UHMWPE tabanlı kompozitlerde özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılma potansiyelini göstermektedir.

Kaynakça

- [1] Ramazani, S. A. A., Saremi, M. G., Amoli, B. N., Izadi, H. 2012. Production and characterization of UHMWPE/fumed silica nanocomposites, *Polymer Composites*, Cilt: 33(10), s. 1858-1864. 10.1002/pc.22323.
- [2] Kavesh, S., Prevorsek, D. C. 1995. Ultra high strength, high modulus polyethylene spectra fibers and composites, *International Journal of Polymeric Materials*, Cilt: 30(1-2), s. 15-56. Doi 10.1080/00914039508031459.
- [3] Chanda, M. 2006. *Plastics technology handbook*, Taylor and Francis, Florida,
- [4] Li, C. S., Zhan, M. S., Huang, X. C., Zhou, H. 2012. Degradation behavior of ultra-high molecular weight polyethylene fibers under artificial accelerated weathering, *Polymer Testing*, Cilt: 31(7), s. 938-943. 10.1016/j.polymertesting.2012.06.009.
- [5] Kurtz, S. M. 2009. *UHMWPE biomaterials handbook: ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices*, Academic Press,
- [6] Amoli, B. M., Ramazani, S. A. A., Izadi, H. 2012. Preparation of ultrahigh-molecular-weight polyethylene/carbon nanotube nanocomposites with a Ziegler-Natta catalytic system and investigation of their thermal and mechanical properties, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 125, s. E453-E461. 10.1002/app.36368.
- [7] Davim, J. P., Marques, N. 2001. Evaluation of tribological behaviour of polymeric materials for

- hip prostheses application, *Tribology Letters*, Cilt: 11(2), s. 91-94. Doi 10.1023/A:1016607400392.
- [8] Alderson, K. L., Webber, R. S., Evans, K. E. 2000. Novel variations in the microstructure of auxetic ultra-high molecular weight polyethylene. Part 2: Mechanical properties, *Polymer Engineering and Science*, Cilt: 40(8), s. 1906-1914. Doi 10.1002/Pen.11322.
- [9] Fengzhen Liu, Yunhua Wang, Keyi Li, Licheng Jiang, Xiumei Wang, Xin Shao, et al. 2015. Graphene Oxide/Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composites: Ball-Milling Preparation Mechanical Performance and Biocompatibility Effects, *American Journal of Biomedical Science and Engineering*, Cilt: 1(5), s. 51-57.
- [10] Samad, M. A., Sinha, S. K. 2011. Dry sliding and boundary lubrication performance of a UHMWPE/CNTs nanocomposite coating on steel substrates at elevated temperatures, *Wear*, Cilt: 270(5-6), s. 395-402. 10.1016/j.wear.2010.11.011.
- [11] Satyanarayana, N., Sinha, S. K., Ong, B. H. 2006. Tribology of a novel UHMWPE/PFPE dual-film coated onto Si surface, *Sensors and Actuators a-Physical*, Cilt: 128(1), s. 98-108. 10.1016/j.sna.2005.12.042.
- [12] Minn, M., Sinha, S. K. 2008. DLC and UHMWPE as hard/soft composite film on Si for improved tribological performance, *Surface & Coatings Technology*, Cilt: 202(15), s. 3698-3708. 10.1016/j.surfcoat.2008.01.012.
- [13] Tai, Z., Chen, Y., An, Y., Yan, X., Xue, Q. 2012. Tribological behavior of UHMWPE reinforced with graphene oxide nanosheets, *Tribology Letters*, Cilt: 46(1), s. 55-63.
- [14] Chen, Y. F., Qi, Y. Y., Tai, Z. X., Yan, X. B., Zhu, F. L., Xue, Q. J. 2012. Preparation, mechanical properties and biocompatibility of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene composites, *European Polymer Journal*, Cilt: 48(6), s. 1026-1033. 10.1016/j.eurpolymj.2012.03.011.
- [15] Xie, X. L., Tang, C. Y., Chan, K. Y. Y., Wu, X. C., Tsui, C. P., Cheung, C. Y. 2003. Wear performance of ultrahigh molecular weight polyethylene/quartz composites, *Biomaterials*, Cilt: 24(11), s. 1889-1896. 10.1016/S0142-9612(02)00610-5.
- [16] Gong, G. F., Yang, H. Y., Fu, X. 2004. Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding, *Wear*, Cilt: 256(1-2), s. 88-94. 10.1016/S0043-1648(03)00394-6.
- [17] Plumlee, K., Schwartz, C. J. 2009. Improved wear resistance of orthopaedic UHMWPE by reinforcement with zirconium particles, *Wear*, Cilt: 267(5-8), s. 710-717. 10.1016/j.wear.2008.11.028.
- [18] Mahfuz, H., Adnan, A., Rangari, V. K., Jeelani, S. 2005. Manufacturing and characterization of carbon nanotube/polyethylene composites, *International Journal of Nanoscience*, Cilt: 4(01), s. 55-72.
- [19] Ruan, S., Gao, P., Yu, T. 2006. Ultra-strong gel-spun UHMWPE fibers reinforced using multiwalled carbon nanotubes, *Polymer*, Cilt: 47(5), s. 1604-1611.
- [20] Aoki, N., Akasaka, T., Watari, F., Yokoyama, A. 2007. Carbon nanotubes as scaffolds for cell culture and effect on cellular functions, *Dental Materials Journal*, Cilt: 26(2), s. 178-185.
- [21] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., Seal, S. 2011. Graphene based materials: Past, present and future, *Progress in Materials Science*, Cilt: 56(8), s. 1178-1271. 10.1016/j.pmatsci.2011.03.003.
- [22] Xiong, D. S., Lin, J. M., Fan, D. L. 2006. Wear properties of nano-Al₂O₃/UHMWPE composites irradiated by gamma ray against a CoCrMo alloy, *Biomedical Materials*, Cilt: 1(3), s. 175-179. 10.1088/1748-6041/1/3/013.
- [23] Xiong, D. S., Lin, J. M., Fan, D. L., Jin, Z. M. 2007. Wear of nano-TiO₂/UHMWPE composites radiated by gamma ray under physiological saline water lubrication, *Journal of Materials Science-Materials in Medicine*, Cilt: 18(11), s. 2131-2135. 10.1007/s10856-007-3199-y.
- [24] Ren, X., Wang, X. Q., Sui, G., Zhong, W. H., Fuqua, M. A., Ulven, C. A. 2008. Effects of carbon nanofibers on crystalline structures and properties of ultrahigh molecular weight polyethylene blend fabricated using twin-screw extrusion, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 107(5), s. 2837-2845. 10.1002/app.27354.
- [25] Xi, Y., Yamanaka, A., Bin, Y. Z., Matsuo, M. 2007. Electrical properties of segregated ultrahigh molecular weight polyethylene/multiwalled carbon nanotube composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 105(5), s. 2868-2876. 10.1002/app.26282.
- [26] Mao, H. Y., Laurent, S., Chen, W., Akhavan, O., Imani, M., Ashkarran, A. A., et al. 2013. Graphene: Promises, Facts, Opportunities, and Challenges in Nanomedicine, *Chemical Reviews*, Cilt: 113(5), s. 3407-3424. 10.1021/cr300335p.
- [27] Bo, X. J., Zhou, M., Guo, L. P. 2017. Electrochemical sensors and biosensors based on less aggregated graphene, *Biosensors & Bioelectronics*, Cilt: 89, s. 167-186. 10.1016/j.bios.2016.05.002.
- [28] Akhavan, O., Ghaderi, E., Rahighi, R. 2012. Toward Single-DNA Electrochemical Biosensing by Graphene Nanowalls, *Acs Nano*, Cilt: 6(4), s. 2904-2916. 10.1021/nn300261t.
- [29] Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H. H., Yu, Z. Z., Koratkar, N. 2009. Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *Acs Nano*, Cilt: 3(12), s. 3884-3890. 10.1021/nn901047z.
- [30] Kim, H., Abdala, A. A., Macosko, C. W. 2010. Graphene/Polymer Nanocomposites, *Macromolecules*, Cilt: 43(16), s. 6515-6530. 10.1021/ma100572e.
- [31] Vadukumpully, S., Paul, J., Mahanta, N., Valiyaveetil, S. 2011. Flexible conductive graphene/poly(vinyl chloride) composite thin films with high mechanical

- strength and thermal stability, *Carbon*, Cilt: 49(1), s. 198-205. 10.1016/j.carbon.2010.09.004.
- [32] Veca, L. M., Meziani, M. J., Wang, W., Wang, X., Lu, F. S., Zhang, P. Y., et al. 2009. Carbon Nanosheets for Polymeric Nanocomposites with High Thermal Conductivity, *Advanced Materials*, Cilt: 21(20), s. 2088-2092. 10.1002/adma.200802317.
- [33] Pang, W. C., Ni, Z. F., Chen, G. M., Huang, G. D., Huang, H. D., Zhao, Y. W. 2015. Mechanical and thermal properties of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites, *Rsc Advances*, Cilt: 5(77), s. 63063-63072. 10.1039/c5ra11826c.
- [34] Qiu, J. J., Wang, S. R. 2011. Enhancing Polymer Performance Through Graphene Sheets, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt: 119(6), s. 3670-3674. 10.1002/app.33068.
- [35] Yang, L., Yee, W. A., Phua, S. L., Kong, J., Ding, H., Cheah, J. W., et al. 2012. A high throughput method for preparation of highly conductive functionalized graphene and conductive polymer nanocomposites, *Rsc Advances*, Cilt: 2(6), s. 2208-2210. 10.1039/C2RA00798C.
- [36] Bhattacharyya, A., Chen, S., Zhu, M. 2014. Graphene reinforced ultra high molecular weight polyethylene with improved tensile strength and creep resistance properties, *Express Polymer Letters*, Cilt: 8(2), s. 74-84. 10.3144/expresspolymlett.2014.10.
- [37] Tai, Z. X., Chen, Y. F., An, Y. F., Yan, X. B., Xue, Q. J. 2012. Tribological Behavior of UHMWPE Reinforced with Graphene Oxide Nanosheets, *Tribology Letters*, Cilt: 46(1), s. 55-63. 10.1007/s11249-012-9919-6.
- [38] Chen, Y., Qi, Y., Tai, Z., Yan, X., Zhu, F., Xue, Q. 2012. Preparation, mechanical properties and biocompatibility of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene composites, *European Polymer Journal*, Cilt: 48(6), s. 1026-1033. 10.1016/j.eurpolymj.2012.03.011.
- [39] Suñer, S., Joffe, R., Tipper, J., Emami, N. 2015. Ultra high molecular weight polyethylene/graphene oxide nanocomposites: Thermal, mechanical and wettability characterisation, *Composites Part B: Engineering*, Cilt: 78, s. 185-191. 10.1016/j.compositesb.2015.03.075.
- [40] Lahiri, D., Hec, F., Thiesse, M., Durygin, A., Zhang, C., Agarwal, A. 2014. Nanotribological behavior of graphene nanoplatelet reinforced ultra high molecular weight polyethylene composites, *Tribology International*, Cilt: 70, s. 165-169. 10.1016/j.triboint.2013.10.012.
- [41] Berman, D., Erdemir, A., Sumant, A. V. 2014. Graphene: a new emerging lubricant, *Materials Today*, Cilt: 17(1), s. 31-42. 10.1016/j.mattod.2013.12.003
- [42] Chang, B. P., Akil, H. M., Nasir, R. M., and Nurdijati, S. 2013. Abrasive wear performance and antibacterial assessment of untreated and treated ZnO-reinforced polymer composite, *Polymer Composites*, 34(7), s. 1020-1032.