



Flexural Behaviors of Nanoparticle Reinforced Epoxy Nanocomposites

Kazım Tolga Çınar and Mürsel Ekrem

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 26, 2021

	1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences
https://www.icaens.com/	November 1-3, 2021, Konya, Turkey

Nanoparçacık Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Eğilme Davranışları

Kazım Tolga ÇINAR¹, Doç. Dr. Mürsel EKREM^{2*}

¹ Makine Mühendisliği/Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

² Makine Mühendisliği/Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

ORCID ID 0000-0001-5324-7929

*(mekrem@erbakan.edu.tr)

Özet – Kompozit malzemeler iki veya daha fazla farklı malzeme grubunun makro boyutlarda bir araya gelmesiyle oluşan yeni nesil mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu iki fazın birleşmesi sonucu malzeme özellikleri, matris ve takviye fazının güçlü özelliklerinin kombinasyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Matris fazına eklenen takviye fazı çoğu zaman matrisin özelliklerini geliştirirken, bazı durumlarda mekanik özelliklerde düşüşe sebep olabilmektedir. Böyle durumlarda takviye fazının boyutunun nano seviyeye düşürülmesi gerekmektedir. Bu şekilde matris fazına nano boyutta yapılan ilaveler ile yeni nesil nanokompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, nanoparçacık takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımı incelenmiştir. Ağırlıkça %0,25 Çok Cidarlı Karbon Nanotüplerle (ÇCKNT) ve ağırlıkça %0.25, 0.5, 0.75 SiO₂ nanoparçacıklarla güçlendirilmiş takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eğilme testleri, ASTM D790 standartlarına göre incelenmiştir. Epoksi reçinesi olarak Hexion MGS L160 kullanılmıştır. hibrid nanoparçacıklarla takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme dayanımları epoksi reçineyle elastiklik modülü, eğilme dayanımları, toklukları, birim şekil değişimleri karşılaştırılmıştır. Eğilme testi sonuçlarına göre en uygun ilave oranının %0,25 SiO₂ ve %0,5 ÇCKNT olduğu görülmüş ve saf epoksiye göre %80,38 artışla en yüksek eğilme dayanımı 138,42 MPa olarak elde edilmiştir. Daha yüksek ilave oranlarında ise eğilme dayanımı değerleri bakımından bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Takviyelendirme sayesinde epoksiye göre eğilme dayanımda artış görülürken birim şekil değiştirmelerde azalma görülmüştür. Maksimum yükleme miktarında %71,47 oranında artış meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano Silisyum oksit, Çok Cidarlı Karbon Nanotüp, Epoksi, Nanokompozit, Eğilme testi

Flexural Behaviors of Nanoparticle Reinforced Epoxy Nanocomposites

Abstract – Composite materials are defined as new generation engineering materials that are formed by the combination of two or more different material groups in macro dimensions. As a result of the combination of these two phases, the material properties emerge as a combination of the strong properties of the matrix and reinforcement phase. While the reinforcement phase added to the matrix phase often improves the properties of the matrix, it may cause a decrease in the mechanical properties in some cases. In such cases, the size of the reinforcement phase should be reduced to the nano level. In this way, new generation nanocomposite materials have been developed by adding nanoscale to the matrix phase. In this study, the flexural strength of nanoparticle reinforced epoxy nanocomposites was investigated. Bending tests of reinforced epoxy composite materials reinforced with 0.25% by weight Carbon Nanotubes (CNT) and 0.25%, 0.5, 0.75% by weight SiO₂ nanoparticles were investigated according to ASTM D790 standards. Hexion MGS L160 was used as epoxy resin. The flexural strength of epoxy nanocomposites reinforced with hybrid nanoparticles, the modulus of elasticity, flexural strength, toughness and unit shape changes of epoxy resin were compared. According to the flexural test results, it was seen that the most suitable addition ratio was 0.25% SiO₂ and 0.5% CNT, and the highest flexural strength was obtained as 138.42 MPa, with an increase of 80.88% compared to pure epoxy. It has been observed that there is a decrease in flexural strength values at higher addition rates. Thanks to the reinforcement, an increase in flexural strength was observed compared to epoxy, while a decrease in unit strains was observed. There was an increase of 71.47% in the maximum loading amount.

Keywords – Nano Silicon oxide, Multi-Wall Carbon Nanotube, Epoxy, Nanocomposite, Flexural test

I. GİRİŞ

Mükemmel fiziksel ve kimyasal bağlara sahip epoksi reçineler günümüzde uygulanan mühendislik uygulamaları için gerekli kabul edilirler. Günümüzde sanayide epoksi bazlı kompozitlerde matris malzemesi olarak çapraz bağlı polimer ağları mekanik özellikleri, düşük yoğunlukları, ısıl kararlılıkları, ısı direnci, yapışma mukavemeti, kimyasal ve elektriksel direnci yüzünden tercih edilirler [1], [2].

Bununla birlikte içerisinde yüksek çapraz bağ yoğunluğu bulunduran epoksi reçineler kırılganlığa ve sınırlamalara neden olurlar. Bu sebepten dolayı darbe dayanımları azalır. Bu durum epoksi reçinenin kullanımını sınırlar. Nanoparçacıkların epoksiye dahil edilmesine yönelik birçok sayıda araştırma, polimerlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilebilmesi için kolay ve ekonomik bir yöntem olduğunu göstermiştir [3], [4], [5].

Nanokompozitler, aralarında farklı arayüzler veya sınırlar bulunan en az bir boyutu nano düzeyde bir matrise gömülü bir takviyeden oluşan malzemeler olarak tanımlanabilir [6], [7]. Matrisin işlevselliği, takviyeyi istenen bir geometride tutmaktır ve takviyelerin ise, uygulama amacına göre nanokompozit malzemelerin özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olur [8], [9]. Polimerler genellikle matris olarak sürekli faz olarak hareket ederken nanoparçacıklar ise süreksiz faz olarak kompozit malzemenin hasar mekanizmalarını iyileştirerek hem mukavemetini hem de tokluğunu geliştirir [10], [11], [12]. Yüksek mukavemetli bir nanoparçacık/epoksi nanokompozit hazırlanması için hem polimer matrisinde nanoparçacıkların dağılımına hem de nanoparçacık ile matris arasındaki arayüzey etkileşimine bağlıdır. Çözelti karıştırma, eriyik harmanlama ve in situ polimerizasyon gibi nanoparçacıkları polimer matrislerdeki dağılımını iyileştirmek için geliştirilmiş çeşitli yöntemlerdir [13], [14].

Bu çalışmada, ağırlıkça farklı oranlarda nanoSiO₂ ile ağırlıkça % 0.25 Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eğilme testi altındaki mekanik özellikleri iyileştirilmesi incelenmiştir. Hibrid nanopaçacık takviyeli epoksi kompozitler, ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme testi altında eğilme gerilmeleri, toklukları, birim şekil değişimleri ve maksimum yükleri referans malzeme karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEMLER

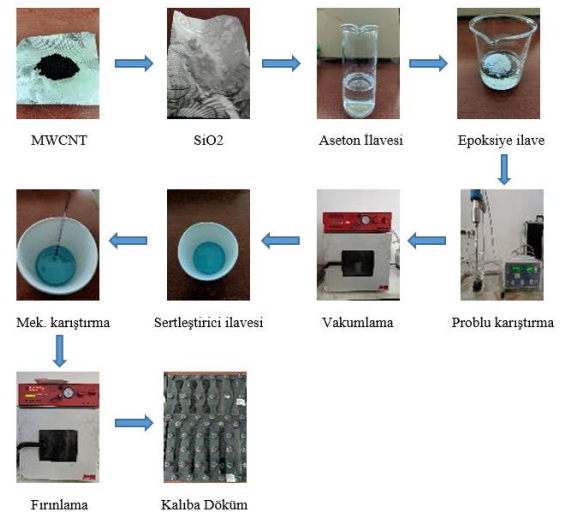
A. Materyal

Çalışmamızda matris malzemesi olarak Epoksi (MGS LR160 MomentiveHexion) reçinesi ve nano takviye olarak SiO₂ nanopartikülleri (15-50 nm Grafen Chemical Industries Co.) ve NANOCYL (5-50nm) firması tarafından üretilen MWCNT'ler kullanılmıştır. Kürleştirici ise yine Hexion markasının MGS H160 kodlu ürünüdür (ağırlıkça 100:40). Jelleşme zamanı oda sıcaklığında firmanın belirttiği oranlarda kullanıldığında yaklaşık 2 ile 3 saattir.

B. Metot

Şekil 1'de ağırlıkça % 0.25 oranında MWCNT ve farklı ağırlıklarda SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozitlerin hazırlanması akış şeması olarak gösterilmiştir. Epoksi hassas terazide beherin darası önceden hesaplanmış şekilde beher içinde tartılmıştır. Sırasıyla epoksinin ağırlıkça %0.25 MWCNT ve %0,25 %0,5 %0,75 oranlarında SiO₂ önceden hazırlanmış alüminyum folyo üzerinde hassas terazide tartıldıktan sonra epoksi reçineye karıştırılmıştır. Epoksi reçinenin viskozitesini arttırmak için aseton ilave edilmiştir. Daha sonra nanopartikül ilaveli epoksi reçine problu homojenizatörle 5'er dk aralıklarla toplamda 15 dk karıştırılmıştır. Çok ısınan karışım beher içerisinde aralıklarla buz banyosu

yaptırılarak 3 saat boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Beklendikten sonra karışımın içerisine epoksinin ağırlıkça 100:40 oranında kürleştirici eklenmiştir. Kürleştirici ilavesinden sonra hava kabarcıklarını gidermek amacıyla elle mekanik olarak en az 10 dk karıştırılmıştır. Daha sonra yine hava kabarcıklarını gidermek amacıyla vakum cihazında yaklaşık olarak 20dk boyunca 0.25 bar altında vakumlanmıştır. Vakum işlemi gören karışım eğilme testleri için 4x13x128 boyutunda önceden hazırlanmış çelik kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülen karışımlar oda sıcaklığında 24 saat boyunca külemeye bırakılmıştır. Son küreme işlemi için 80 °C'de 15 saat fırında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Nanopartikül takviyeli epoksi nanokompozitlerin hazırlanması şematik gösterim

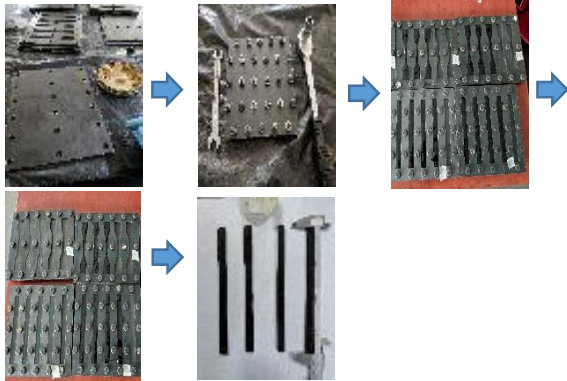
Tablo 1. Nanoparçacık takviyeli epoksi kompozit malzemelerin isimlendirilmesi

E	Saf epoksi
E+0.25 CNT	Ağırlıkça %0.25 CNT nanopartikül takviyeli epoksi nanokompozit
E+0.25 CNT+0.25SiO ₂	Ağırlıkça %0.25 CNT ve %0.25 SiO ₂ nanopartikül takviyeli epoksi nanokompozit

E+0.25 CNT+0.5SiO ₂	Ağırlıkça %0.25 CNT ve %0.5 SiO ₂ nanopartikül takviyeli epoksi nanokompozit
E+0.25 CNT+0.75SiO ₂	Ağırlıkça %0.25 CNT ve %0.75 SiO ₂ nanopartikül takviyeli epoksi nanokompozit

C. Eğilme Deneyleri için Kalıpların Hazırlanması

Eğilme testleri için ASTM D790 standardına uygun olarak önceden hazırlanan çelik kalıplara, epoksi reçinenin yapışmaması için vaks yardımıyla ince bir tabaka oluşturacak şekilde sürülmüştür. Montajı yapılan bu kalıplara hazırlanan nanokompozit malzemelerin dökülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için aynı özellikteki numuneden 4 adet üretilmiştir. Şekil 2’de eğilme kalıplarının süreci görülmektedir.



Şekil 2. Eğilme ve Çekme Deneyleri için numunelerin hazırlanması

D. Karakterizasyon

ASTM D790’a göre 4x13x128 mm ölçülerinde dikdörtgen kesitli bir parça halinde olan numuneler üretilmiştir. Testler 2 mm/dk hızında uzama kontrollü yapılmıştır. Shimadzu AGS-X Üiversal Çekme Test Cihazı kullanılarak 1kN yük hücresinde deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.). Bütün testler oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3. 3 nokta eğilme deneyi

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. 3 Nokta Eğilme Deneyi

Tüm deneylerde ASTM D790 standardına göre ölçme uzunluğu/derinlik oranı sabit olarak 32:1 alınmıştır. Yük iş numunesi ortasına uygulanmış olup parça kırılıncaya kadar devam etmiştir. Ölçülen verilerin ortalaması alınmıştır. Her bir numuneye uygulanan yük P ve sehimi δ değerleri anlık olarak kayıt edilmiş ve numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır;

$$\sigma_{max} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (3.1)$$

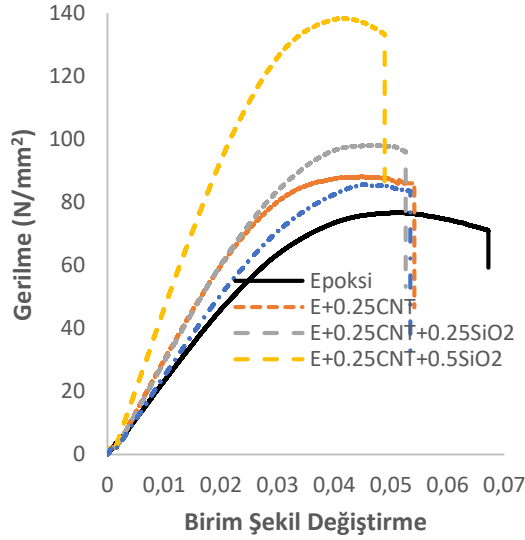
Denklem 3.1.'de σ numunenin orta noktasında dış yüzeyde oluşan gerilmeyi (MPa), P uygulanan yükü (N), L mesnetler arası açıklığı (mm), b numunenin genişliğini (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) göstermektedir.

Numunenin orta noktasında dış yüzeyinin şekil değişimi ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır;

$$\epsilon = \frac{6 \times \delta d}{L^2} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2.'de dış yüzeyde oluşan en büyük şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ orta noktadaki sehimi (mm), L mesnetler arası açıklığı (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir

Şekil 4’te %0.25 MWCNT ve sırasıyla %0.25 %0.5 %0.75 SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozitlerin 3 nokta eğilme deneyinden sonraki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 4. Hibrid nanoparçacık takviyeli epoksi kompozit malzemelerin gerilme-birim değiştirme eğrileri

Takviyelendirme sayesinde epoksiye göre eğilme dayanımda artış görülürken birim şekil değiştirmelerde azalma görülmüştür. Malzeme epoksiye göre daha elastik şekil değişime dönüşmüştür. Saf epoksida max eğilme dayanımı 76,73 Mpa iken 0.25CNT ve 0.5 SiO₂ takviyeli epoksi matris max eğilme dayanımı 138,41 Mpa değerini görmüştür. Aradaki artış miktarı %80,38'dir.

Tablo 2. MWCNT ve SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozit malzemelerin mekanik özellikleri

	Maks s yük (N)	Maks uzan ma (mm)	Maks gerilm e (N/mm ²)	B.Ş.D (mm/m m)
Epoksi	103,9	29,40	76,73	0,067
0.25 CNT	118,2	23,65	88,11	0,054
0.25 CNT +0.25Si O2	113,7	29,20	98,11	0,053
0.25 CNT + 0.5SiO2	178,2	21,91	138,41	0,049
0.25CNT +0.75Si O2	111,0	23,94	85,60	0,053

Saf epoksinin max yükleme, max uzama, max B.Ş.D değerleri sırasıyla 103.91N, 29.4mm ve 0.0672 mm/mm bulunmuştur. Ağırlıkça %0.25CNT ve %0.5 SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozit malzemenin max yükleme, max uzama, max B.Ş.D değerleri sırasıyla 178.18N, 21.91mm, 0.0489 mm/mm olarak ölçülmüştür. Max yükleme miktarında %71,47 oranında artış meydana gelmiştir. Değerlere bakıldığı zaman 0.25CNT ve 0.5 SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozit malzemenin elastik kırılma gösterdiği sonucuna varılabilir.

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Epoksi yapıştırıcı, ağırlıkça %0.25 MWCNT, %0.25 MWCNT + %0.25, 0.5 ve 0.75 nano SiO₂ parçacık takviyeli hibrit nanoparçacık takviyeli epoksi nanokompozitlerin, eğilme dayanımları incelenmiştir. Eğilme testinde 0.25CNT+0.5SiO₂ takviyeli epoksi nanokompozitlerde eğilme dayanımı saf epoksiye kıyaslandığında %80,38 artış göstermiştir.

Sonuçlardan da görüldüğü üzere MWCNT ve SiO₂ nanoparçacık takviyesi malzemenin dayanımı arttırmak için kullanıldığında etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Ekrem, M., "The effects of carbon nanotubes added polyvinyl alcohol nanofibers on mechanical properties of carbon reinforced composite laminates," *Sādhanā*, 44(8), p. 179, 2019.
- [2] Wong, D. W., Zhang, H., Bilotti, E., and Peijs, T., "Interlaminar toughening of woven fabric carbon/epoxy composite laminates using hybrid aramid/phenoxy interleaves," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, pp. 151-159, 2017.
- [3] Afrouzian, A., Movahhedi Aleni, H., Liaghat, G., and Ahmadi, H., "Effect of nano-particles on the tensile, flexural

- and perforation properties of the glass/epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(12), pp. 900-916, 2017.
- [4] Ahmadi, Z., "Nanostructured epoxy adhesives: A review," *Progress in Organic Coatings*, 135, pp. 449-453, 2019.
- [5] Ekrem, M., "Hexagonal Boron Nitride Nanoplates-Nano Ag / Epoxy Composites: Production, Mechanical and Thermal Properties," *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 6(3), pp. 585-593, 2019.
- [6] Yadav, S. K., and Cho, J. W., "Functionalized graphene nanoplatelets for enhanced mechanical and thermal properties of polyurethane nanocomposites," *Applied Surface Science*, 266, pp. 360-367, 2013.
- [7] Jiang, S., Chen, Y., Duan, G., Mei, C., Greiner, A., and Agarwal, S., "Electrospun nanofiber reinforced composites: A review," *Polymer Chemistry*, 9(20), pp. 2685-2720, 2018.
- [8] Vaithyalingam, R., Ansari, M. N. M., and Shanks, R. A., "Recent Advances in Polyurethane-Based Nanocomposites: A Review," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(14), pp. 1528-1541, 2017.
- [9] Erkendirici, Ö. F., and Avcı, A., "Quasi-static impact resistance and damage mechanisms of polymer hybrid nanocomposites," *Plastics, Rubber and Composites*, 49(1), pp. 25-34, 2020.
- [10] Atiqah, A., Mastura, M. T., Ali, B. A. A., Jawaid, M., and Sapuan, S. M., "A Review on Polyurethane and its Polymer Composites," *Curr Org Synth*, 14(2), pp. 233-248, 2017.
- [11] Farooq, M. U., Jan, R., Azeem, M., Umer, M. A., Akram, M. A., Khan, A. N., Ahmad, I., Khan, S. A., Umar, Z. A., and Liaquat, U., "Enhanced mechanical properties of functionalized BN nanosheets-polymer composites," *J Polym Res*, 27(10)2020.
- [12] Ekrem, M., "Shear strength of boron nitride nanoplatelets and nano Ag reinforced structural adhesives," *Journal of Bor*, 4(3), pp. 128-134, 2019.
- [13] Navidfar, A., Sancak, A., Yildirim, K. B., and Trabzon, L., "A Study on Polyurethane Hybrid Nanocomposite Foams Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Nanoparticles," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(14), pp. 1463-1473, 2018.
- [14] Hong, S. K., Kim, D., Lee, S., Kim, B. W., Theilmann, P., and Park, S. H., "Enhanced thermal and mechanical properties of carbon nanotube composites through the use of functionalized CNT-reactive polymer linkages and three-roll milling," *Compos Part a-Appl S*, 77, pp. 142-146, 2015.