www.dergipark.gov.tr
ISSN:2148-3736
El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi
Cilt: 6, No: 3, 2019 (585-593)

El-Cezerî Journal of Science and Engineering
Vol: 6, No: 3, 2019 (585-593)
DOI :10.31202/ecjse.559083

ECJSE

Makale / Research Paper

Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri

Mürsel EKREM

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Konya/TÜRKİYE
mekrem@erbakan.edu.tr

Received/Geliş: 29.04.2019 **Accepted/Kabul:** 25.06.2019

Öz: Bu çalışmada, ağırlıkça % 0.5 Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplateler (hBNNPs) ile ağırlıkça farklı oranlarda (% 0.5, 1 ve 1.5) nano gümüş (Ag) parçacıklı epoksi bazlı nanokompozitlerin üretimi, mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır. ASTM D638-10 standardına göre üretimi yapılan epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin çekme numuneleri sabit çekme hızında çekme testine tabi tutulmuştur. Modifiye edilmiş epoksi hibrid nanokompozitlerin maksimum yükleri, çekme dayanımları, elastiklik modülleri, toklukları ve uzama değerleri hesaplanmış olup, bu testin sonucunda bu özellikler referans numuneyle kıyaslanmıştır. Referans numune ile ağırlıkça % 0.5 oranındaki BNNPs ve ağırlıkça % 1 oranındaki nano Ag parçacık takviyeli nanokompozitin maksimum yükleri sırasıyla 1742.11 N ve 2262.80 N olup, 0.5BNNP+1NanoAg epoksi esaslı kompozit % 30 oranında artış gözlemlenmiştir. Hibrid nanokompozitlerin kırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenerek hasar mekanizmaları ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca epoksi reçine ile BNNPs ve nano Ag takviyeli epoksi nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı, ergime sıcaklığı, termal bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı, Termogravimetri ve Diferansiyel Termal Analizleriyle (TGA/DTA) incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Epoksi, Mekanik özellikler, Nanokompozitler, Nanoparçacıklar, Termal özellikler

Hexagonal Boron Nitride Nanoplates-Nano Ag / Epoxy Composites: Production, Mechanical and Thermal Properties

Abstract: In this study, the production, mechanical and thermal properties of hexagonal boron nitride nanoparticles (hBNNPs) and different ratios (0.5, 1, and 1.5% by weight) of nano silver (Ag) particles epoxy based nanocomposites were investigated. Tensile specimens of epoxy based hybrid nanocomposites produced according to ASTM D638-10 were subjected to tensile test under constant crosshead speed. The maximum loads, tensile strengths, modulus of elasticity, toughness and elongation values of the modified epoxy hybrid nanocomposites were calculated and these properties were compared with the reference sample. The reference sample and 0.5% by weight of BNNPs and 1% by weight of nano Ag particles reinforced nanocomposite the maximum loads were 1742.11 N and 2262.80 N respectively, 0.5BNNP+1NanoAg epoxy based nanocomposite was observed increase of 30%. The fracture surfaces of hybrid nanocomposites were examined by scanning electron microscopy (SEM) and the damage mechanisms were revealed. In addition, epoxy resin and BNNPs and nano Ag reinforced epoxy nanocomposites glass transition temperature, melting temperature, thermal decomposition temperature and mass loss, Thermogravimetric and Differential Thermal Analysis (TGA / DTA) were examined.

Keywords: Epoxy, Mechanical properties, Nanocomposites, Nanoparticles, Thermal properties

1. Giriş

Üretim maliyetinin düşük olması, hafiflik, üretim ve kullanım kolaylığı açısından bakıldığında yapıştırma teknolojisinin birçok avantaj sağladığı görülmektedir. Yapıştırma bağlantılarında

Bu makaleye atıf yapmak için
Ekrem, M. "Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 585-593.

How to cite this article
Ekrem, M. "*Hexagonal Boron Nitride Nanoplates-Nano Ag / Epoxy Composites: Production, Mechanical and Thermal Properties*" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 585-593.

ORCID NO (Ekrem, M.: 0000-0001-5324-7929)

kullanılan yapıştırıcılar kauçuk, plastik v.b. malzemelerden üretilmektedir. Epoksi reçine, termosetler grubunda bulunan çok yüksek yapıştırma gücü ile bilinen plastik malzemedir. Bu özelliği dolayısıyla çok geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Neme, ısıya, kimyasallara ve aşınmaya karşı mükemmel bir direnç gösterirler ve uzun ömürlüdürler[1, 2].

Son yıllarda yapılan araştırmalarda nanoparçacıklar, yüksek özgül/yüzey alanlarından dolayı dikkat çekmiş ve polimer malzemelerin modifikasyonu için kullanılmıştır[3, 4]. Yüksek özgül/yüzey alanlarından dolayı nanoparçacıklar ile epoksi arasında oluşturulan arayüzeylerin, yüksek enerji kaybına neden olduğu bildirilmektedir[5]. Ayrıca nanodolguların (küresel parçacık, düz plaka vs.) çatlak yayılma yönünü değiştirebildiği ve çatlak yayılmasının durmasına ve çatlak sıkışmasına neden olabileceği bildirilmektedir[6-8]. Nanoparçacıklar, matris deformasyonunu mikroparçacıklardan daha az kısıtlar ve daha iyi esneklik ve tokluk ile sonuçlanır[9]. Öte yandan, bir matristeki nanoölçekli takviyelerin bir sonucu olarak çatlak yönünün değişmesi, tokluk mekanizmasında önemli bir rolü olduğu bildirilmiştir[10]. Nanodolgular, nanoparçacıklar veya nanoplakalar, orijinal yön boyunca çatlak ilerlemesini durdurabilir ve aynı zamanda, kümelenme minimize edildiğinde tokluk ile sonuçlanan çatlak dallanmaları ile sonuçlanmıştır[11, 12].

Mansourian-Tabaei, Jafari [13] nano takviye dolgu malzemeleri üstün mekanik özelliklere sahip ve yaygın olarak yüksek performanslı uygulamalar için polimer matrisler ile ilişkili malzemelere takviye olarak kullanmışlardır. Bu çalışmada, çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT)[14], nano Al_2O_3[15], nano SiO_2[16] ve talk takviyeli epoksi reçineli yapıştırıcılar geliştirilmiştir. Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) yapıştırıcıların, farklı tipteki etkileri ve yapıştırıcı içindeki nano dolguların içeriği, kopmadaki uzaması, termal kararlılık (hava ve azot atmosfer altında) araştırılmıştır. Epoksi matris içerisinde nano dolguların düzgün ve uygun dispersiyonla yapıştırıcı hazırlamak için basit ve etkili bir yaklaşım, ultrasonikasyon ile birlikte mekanik karıştırma olduğu bulunmuştur. Transmisyon elektron mikroskobik ve taramalı elektron mikroskobik araştırmalar, nano dolguların yüklemelerde uygun değer nano dolgular epoksi matris içinde homojen olarak dağılmış olduğunu ortaya koymuştur. Kayma mukavemeti, yüklemelerde ÇCKNT ve nano AI_2O_3 bir fonksiyonu olarak tek taraflı bindirmeli bağlantı ile ölçülmüştür. Sonuçlarda kayma mukavemetinin önemli ölçüde ÇCKNT ve nano-Al_2O_3 sırasıyla belirli bir seviyesine kadar eklenmesi ile yaklaşık % 50 ve % 70 artış olduğunu göstermiştir.

Ulus ve arkadaşaları [17] hibrid nanokompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Hibrid nanokompozitler, epoksi reçine içerisine ağırlıkça faklı oranlarda çok cidarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve boron nitrür nanoplateler (BNNPs) içermektedir. Üretilen nanokompozitleri ASTM D638 standartlarına göre çekme testleri yapılarak çekme dayanımı ve elastiklik modülleri saf epoksi ile karşılaştırılmıştır. Referans numuneyle ağırlıkça %0.5 BNNP+%0.3 MWCNT takviyeli hibrid nanokompozit çekme dayanımları karşılaştırıldığı zaman 80 MPa ile %33'lük bir artış sağlamıştır. Çekme testinden sonra hibrid nanokompozitlerin kırık yüzeylerin görüntüleri SEM ile incelenmiştir. Ayrıca hibrid nanokompozitlerin termal analizleri de TGA ile analiz edilmiştir.

Genellikle epoksi matris malzemelere nanoparçacıklar takviye edilerek yeni ve farklı özelliklere sahip nano kompozitler oluşturulmaktadır. Ancak nanoparçacıklar belirli bir orana kadar takviye edilmektedir. Bu durum nanoparçacıkların kompozit malzeme içerisinde kullanımını kısıtlamaktadır [18].

Bu çalışmanın amacı, epoksi bazlı hibrid nanokompozitlerin üretimi, mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Hibrid nanokompozitler, ağırlıkça % 0.5 Bor Nitrür Nanoplateler (BNNPs) ile ağırlıkça % 0.5, 1 ve 1.5 nano gümüş (Ag) parçacıkların epoksi reçineye karıştırılarak üretilmiştir. ASTM D638-10 standardına uygun olarak üretilen hibrid nanokompozitler sabit yük altında çekme testine tabi tutulmuştur. Hibrid nanokompozitlerin maksimum yükleri, çekme dayanımları,

elastiklik modülleri, toklukları ve uzama değerleri hesaplanmış olup, referans numune ile kıyaslanmıştır. Çekme testlerinden sonra hibrid nanokompozitlerin kırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenerek hasar mekanizmaları açıklanmıştır. Ayrıca epoksi reçine ile BNNPs ve nano Ag takviyeli nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı, ergime sıcaklığı, termal bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı, Termogravimetri ve Diferansiyel Termal Analizleriyle (TGA/DTA) incelenmiştir.

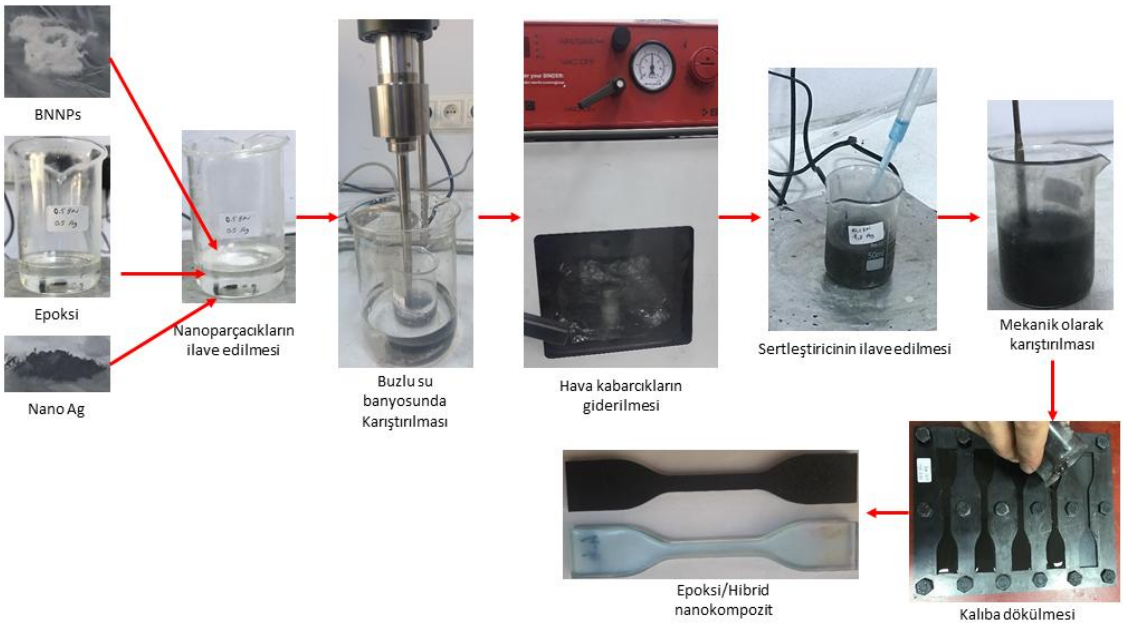
2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Malzemeler

600-900 mPas viskoziteli MGS-L285® diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) reçine ve 50-100mPas viskoziteli MGS-H285® setleştirici Momentive (Hexion)'dan satın alındı. % 99 üzerindeki saflıkta ve ortalama 100 nm kalınlığındaki hekzagonal yapıdaki Bor Nitrür Nanoplateler (BNNPs) Bortek firmasından ve 40±10 nm ortalama çapında sahip nano Ag parçacıklar % 99.9 saflıkta ve küresel form da olup Nanografi'den temin edildi.

2.2. Epoksi Esaslı Hibrid Nanokompozitlerin Üretimi

Şekil 1'de görüldüğü gibi epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin hazırlanması şematik olarak verilmiştir. Öncelikle epoksi reçine belirlenen oranda tartıldı. Bu oranın ağırlıkça % 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında nano Ag ayrı ayrı beherlere konularak ağırlıkça % 0.5 oranındaki BNNPs ile birleştirildi. Problu homojenizatörle 10'ar dakika süreyle 3 defa olmak üzere toplam 30 dk soğuk su banyosu içinde yaklaşık oda sıcaklığı muhafaza edilecek şekilde karıştırıldı. Burada soğuk su banyosu ve aralıklarla karıştırmamız sebebi nanoparçacıkların zarar görmemesi içindir. Sonra hazırlanan bu nanokompozit karışımı vakum fırını içerisinde oda sıcaklığında 10 dk 0,25 bar vakumda bekletilerek karışım içindeki hava kabarcıkların giderilmesi sağlandı. Epoksi/kürleştirici oranı 100/25 oranında ilave edilerek mekanik olarak hava kabarcığı olmayacak şekilde 10 dk karıştırılarak hibrid nanokompozitler hazırlanmış oldu.



Şekil 1. Epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin üretimi

ASTM D638-10 standardına uygun olarak önceden hazırlanan çelik kalıplara epoksi reçinenin yapışmaması için vaks ince bir film oluşturacak şekilde sürüldü. Montajı yapılan bu kalıplara hazırlanan hibrid nanokompozitler yavaş olarak dökümü gerçekleştirildi. Döküm işleminden sonra

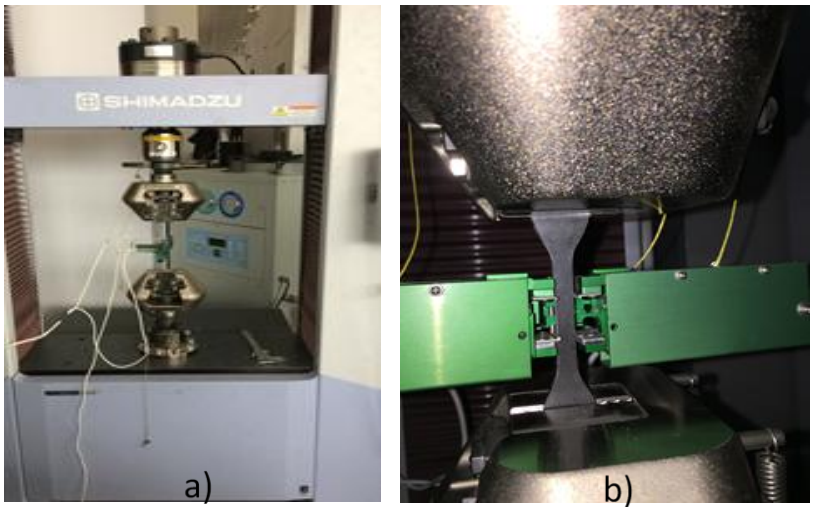
çekme numunesi kalıbı kürleme işlemi için vakum fırınında 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiş olup ardından son kürleme işlemi için sıcaklık 80 °C'de 15 saat bekletilerek numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

2.3. Karakterizasyon

Hibrid nanokompozitlerin kırılmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan ZEİSS Evo LS 10 cihazı ile 20kV gerilimde elde edilmiştir.

TGADTA analizleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (BİTAM) Setaram-Labsys Evo marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Test numuneleri azot atmosferinde 10 °C/dk ısıtma oranında ve 25°C ile 650 °C arasında ısıtılmıştır. Termal kararlılık, bozunma sıcaklıkları, camsı geçiş sıcaklığı, ergime sıcaklığı ve artık kütle TGA/DTA ile analiz edilmiştir.

Şekil 2.a.'da görüldüğü gibi hibrid nanokompozit numunelerinin çekme testleri Shimadzu AGS-X test cihazında ASTM D638-10 standardına uygun olarak 5 mm/dk çekme çene hızında gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları ve poisson oranları Eplison 3560 model iki eksenli dinamik ekstansometre ile ölçülmüştür (Şekil 2.b). Her bir numuneye uygulanan kuvvet P ve yer değiştirme δ değerleri anlık olarak kayıt edilmiş ve numunelerin çekme gerilmesi, birim şekil değişimi ve elastiklik modülü hesaplanmıştır.



Şekil 2. Çekme test cihazı: a) nanokompozitin cihaza bağlanması ve b) iki eksenli ekstansometrenin numuneye bağlanması

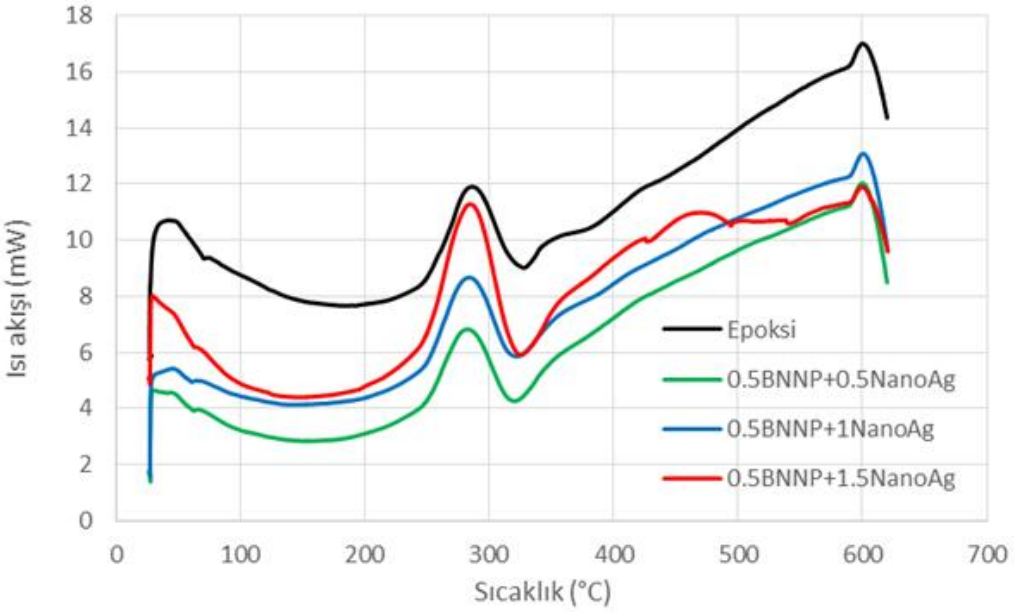
Deney için hazırlanmış olan numunelere, oda sıcaklığında (25 °C) çekme testleri uygulanmış olup deneyler 5'er adet tekrar edilerek test edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar

3.1. Hibrid Nanokompozitlerin Termal Analizleri

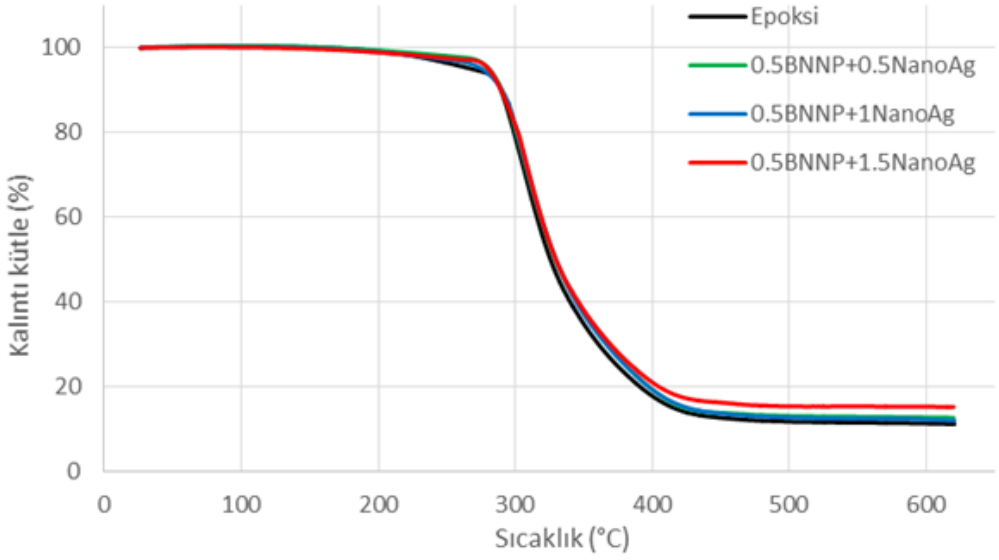
Bu çalışma kapsamında üretilen ağırlıkça % 0.5 oranında BNNPs ve ağırlıkça % 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında nano Ag katkılı epoksi kompozitler ile saf epoksinin TGA ve DTA sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.'de hibrid nanokompozit epoksi ile saf epoksinin DTA analiz sonuçları verilmiştir. Hibrid nanokompozit epoksi ile saf epoksi endotermik bir reaksiyon göstermiştir. Saf epoksinin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri 73.5 °C'iken nanoparçacık takviyeli epoksi kompozitlerin T_g değerleri yaklaşık 62 °C'dir. Bu değerlerden anlaşıldığı üzere ilk önce rijitliğini

kaybeden hibrid nanokompozit malzemeleridir. Ayrıca hibrid nanoparçacıkların takviyesiyle T_g değerlerinin düşük olması nanoparçacıkların çapraz bağ yoğunluğundaki azaltma etkisini göstermektedir [19].



Şekil 3. Hibrid nanoparçacık takviyeli epoksi kompozitlerin DTA eğrileri

Şekil 4.'te Hibrid nanoparçacıklarla takviyeli epoksi kompozitler ile saf epoksi yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Sırasıyla %5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf epoksi için 287, 330 ve 550°C'dir. Hibrid nanoparçacık takviyeli epoksi kompozitleri % 5 ile % 50 kütle kaybı saçıkları hemen hemen aynıdır. Fakat maksimum bozunma sıcaklıkları 0.5BNNP+0.5NanoAg, 0.5BNNP+1NanoAg ve 0.5BNNP+1.5NanoAg kompozitlerin sırasıyla 540°C, 520°C ve 500 °C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca nanoparçacık miktarının artışıyla birlikte kalıntı kütle miktarları artış göstermiştir.



Şekil 4. Hibrid nanoparçacık takviyeli epoksi kompozitlerin TGA eğrileri

Nano parçacık sayısı sızma eşiği değerine ulaştıktan sonra nanoparçacıklar topaklanmaya başlayarak matris-nano parçacık arasındaki bu etkileşim azalmaktadır. Topaklanmanın sistemde

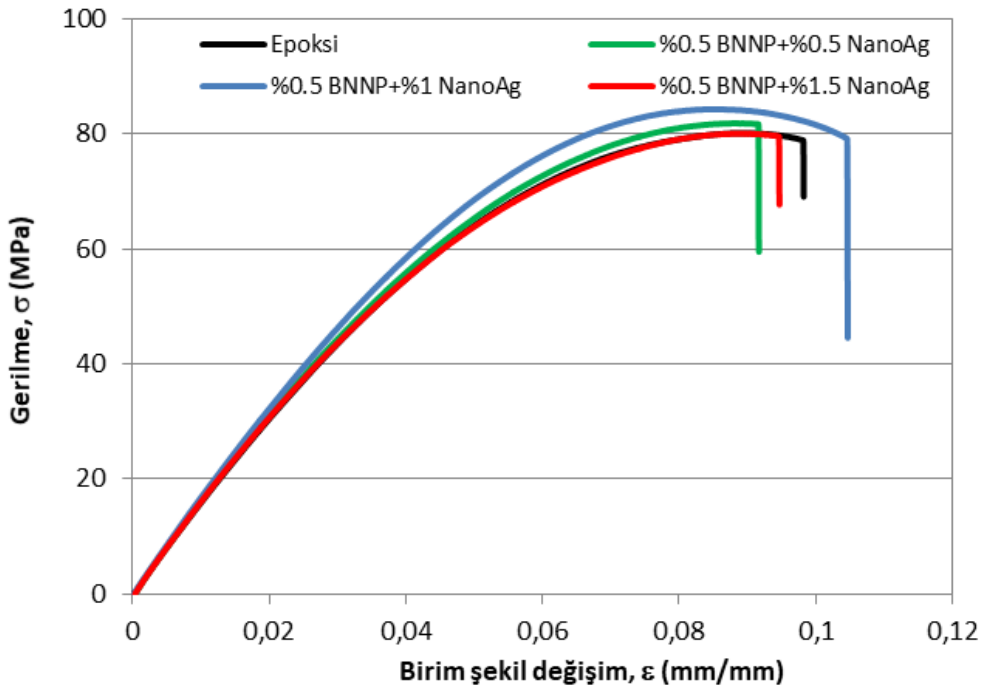
kirlilik olarak işlev gördüğü nanoparçacık oranında termal kararlılık sıcaklığını azaltmaktadır [20]. Topaklanan nanoparçacıklar termal analiz sırasında verilen ısıyı yutarak bozunma esnasında ek ısı kaynağı olarak davranmaktadır. Bu etki sebebi ile nanoparçacık oranı artırıldıkça tamamen bozunma sıcaklarında düşüşler gerçekleşmiştir (Çizelge 1.).

Tablo 1. Hibrid nanoparçacıklarla takviyeli epoksi kompozitlerin termal analiz değerleri

Numuneler	Bozunma sıcaklıkları (°C)			Kalan kütle miktarı (%)	T_g	T_m
	%5	%50	Max bozunma			
Epoksi	287	330	550	11.8	73.5	287.5
0.5BNNP+0.5NanoAg	286	330	540	12.2	62.2	287.2
0.5BNNP+1NanoAg	286	331	520	13.1	61.7	287.5
0.5BNNP+1.5NanoAg	285	332	500	15.5	62.7	287.5

3.2. Hibrid Nanokompozitlerin Çekme Testleri

Şekil 5'da epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin sabit yük altında çekme deneyleri sonucunda elde edilen tipik gerilme-birim şekil değişim grafiği verilmiştir. Epoksi reçinenin çekme dayanımı 80.13 MPa'dır. 0.5BNNP+1NanoAg takviyeli nanokompozitin çekme dayanımı % 6'lık bir artış ile 84.29 MPa'da gerçekleşmiştir. Birim şekil değişimleri ise epoksi numunesiyle 0.5BNNP+1NanoAg takviyeli hibrid nanokompoziti karşılaştırdığımız zaman 0.098 mm/mm'den aynı şekilde % 6'lık bir artış ile 0.104 mm/mm'dir.



Şekil 5. Epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin gerilme-birim şekil değişim grafiği

Modifiyeli epoksi nanokompozitlerinde çekme dayanımları ve birim şekil değiştirme miktarındaki değişimler, malzemenin kopana kadar yuttuğu toplam enerjiyi yani nanoparçacıklarla takviyeli epoksi kompozitlerin tokluğunu nasıl etkilediği sorusunu akla getirmektedir. Çekme testlerinde tokluk, gerilme/birim şekil değiştirmenin altında kalan alan olarak hesaplanır. Epoksi ile BNNPs ve nano Ag ile takviyeli hibrid nanokompozitlerin tokluk değerleri ile elastiklik modülü ve poisson oranları Çizelge 2.'de verilmiştir. En iyi tokluk artışı epoksi yapıştırıcıyla karşılaştırıldığı zaman % 16 artış ile 0.5BNNP+1NanoAg takviyeli hibrid nanokompozite 6397.9 kJ/m^3 olarak hesaplanmıştır. Nanoparçacıkların epoksi matriks içerisine ilave edildiği zaman hem çekme dayanımının hem de birim şekil değiştirme miktarının artmasını sağlayarak epoksi yapıştırıcının rijitliğini arttırırken sünekliğini de iyileştirmiştir.

Tablo 2. Nanokompozit numunelerin mekanik özellikleri

Numuneler	Maks. Yükleme (N)	Çekme dayanımı, (MPa)	Gerinme, (mm/mm)	Tokluk, (kJ/m^3)	Elastiklik modülü, (GPa)	Poisson oranı
Epoksi	1946,656	80,134	0,098	5559.8	1.29	0.157
0.5BNNP+0.5NanoAg	1972,103	81,846	0,091	5087.1	1.32	0.146
0.5BNNP+1NanoAg	2247,254	84,293	0,104	6397.9	1.35	0.167
0.5BNNP+1.5NanoAg	1985,423	80,057	0,091	5195.4	1.30	0.134

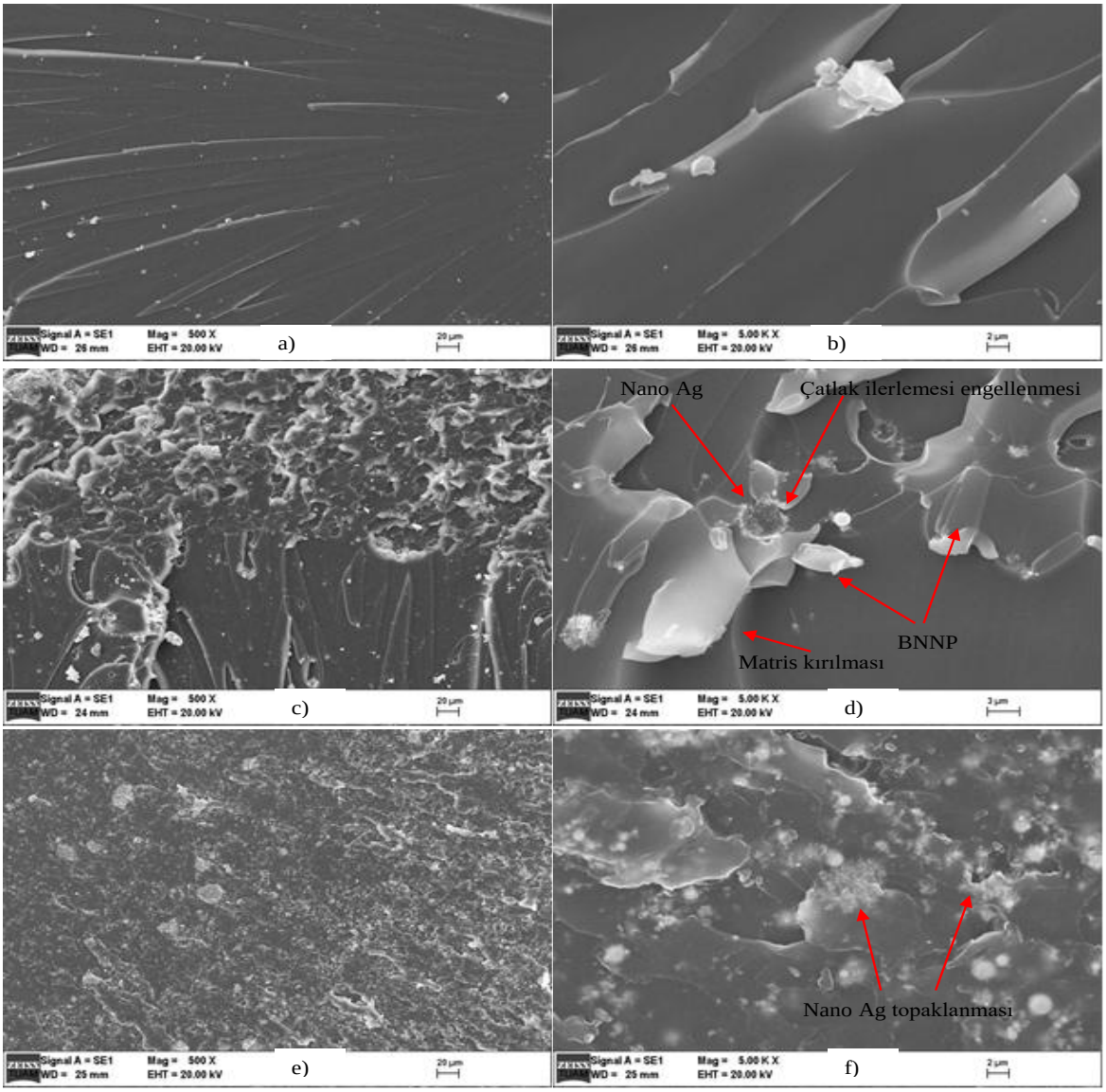
Literatür özetinde belirtildiği gibi nanokompozit malzemelerin mekanik özellikleri polimer içindeki nanoparçacıkların dağılım durumu ile doğrudan alakalıdır [21, 22]. Nanoparçacıklar ile takviye edilmiş polimerlerde mekanik özellikler (dayanım, süneklilik, kırılma tokluğu, ara yüzey dayanımı) genellikle artan nanoparçacıklar miktarı ile artar ve sızma eşik değerinde (percolation threshold) maksimum değere ulaşır. Bu oranların aşılması ile birlikte mekanik özelliklerde keskin düşüşler gözlemlenebilir. Bu düşüşler nanoparçacıkların homojen dağılmayarak epoksi reçine içerisinde nanoparçacıkların topaklanmasından ve yüksek takviye maddesinin içeriğinden dolayı epoksi yapıştırıcı içerisinde bir bölgede toplanarak çatlak oluşumunun hızlı olarak ilerlemesine yol açmaktadır.

3.3. Hibrid Nanokompozitlerin Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

SEM analizi için numuneler 6x4 mm boyutlarında ince uçlu testere ile kesildi. Aseton ile yıkanarak temiz hava ile kurutuldu. Daha sonra bu parçalar metal stubların üzerine karbon bant ile yapıştırılarak altın kaplamadan sonra SEM görüntüleri alındı.

Şekil 7'de epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerine ait çekme deneyinden sonraki kırılma yüzeylerin 500 X ve 5 000 X büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiş olup kırılma yüzeylerin hasar mekanizmaları incelenmiştir. Epoksi reçinenin kırılma yüzeyleri incelendiğinde tipik gevrek kırılma sürecinde olduğu gibi özelliksiz ve çatlağın başlaması ve ilerlemesi için zayıf direncini doğasını ortaya çıkaran yüzey daha düz ve pürüzsüzdür (Şekil 6 a, b.). Fakat Şekil 7. c, d, e ve f'de gösterildiği gibi BNNP ve Nano Ag takviyeli hibrid nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri ise nehir akıntıları gibi yapılar pürüzlü ve parçacıklıdır.

Şekil 7. d'de 5KX büyütmede görüldüğü gibi nanoparçacıklar kırılma sırasında çatlak ilerlemesini engelleyerek malzemenin daha fazla enerji yutmasına sebep olmaktadır. BNNP ve Nano Ag nanoparçacık katkılı epoksi kompozitlerin kırık yüzeylerinde saf epoksiye göre daha pürüzlü ve katmanlı görünümde bölgeler görülmektedir. Bu yapının BNNP katmanlı yapısından ve Nano Ag parçacıkların küre şeklinden kaynaklanmış olup, ağırlıkça % 0.5 BNNP ve ağırlıkça %1 Nano Ag epoksi kompozitlerin tokluğunu arttırmıştır. Fakat BNNP miktarının sabit kalıp nano Ag miktarının artmasıyla Şekil 7. f'de görüldüğü gibi topaklanmış yapılar oluşmuştur. Bu topaklanmış yapılar epoksi reçine içerisinde hem iyi ıslanmadığı hem de Nano Ag'lerin iyi dağılmadığından dolayı nano çatlakların oluşmasına sebep olmuştur. Nano çatlaklar 0.5BNNP+1.5NanoAg nanokompozitlerin çekme dayanımlarını ve tokluklarının düşmesine sebep olmuştur.



Şekil 6. Epoksi esaslı hibrid nanokompozitlerin kırık yüzeylerin sırasıyla 500X ve 5 000X büyütmeli SEM görüntüleri; a ve b) epoksi, c ve d) 0.5BNNP+1NanoAg ve e ve f) 0.5BNNP+1.5NanoAg

5. Sonuçlar

Bu çalışmamızda, farklı oranlarda nanoparçacıkların epoksi reçinenin içerisine ilave ederek mekanik özelliklerini geliştirmek için bir metodoloji önerdik. Nanokompozitlerin üretiminde, nano boyuttaki mükemmel özellikli BNNPs ve nano Ag dolgu maddelerinin kullanılması, daha iyi mekanik özelliklere sahip epoksi esaslı nanokompozit malzemeler elde etmemizi sağlamıştır.

0.5 BNNPs+ 1 nano Ag Hibrid nanoparçacıklı epoksi kompozitlerin çekme dayanımı, birim şekil değişimi, tokluk ve elastiklik modülü sırasıyla % 6, 6, 16 ve 5 oranlarında artmıştır. Böylece nanoparçacık modifikasyonunun, tokluk artışını sağlamak için kullanılabileceği sonucunu göstermiştir. Fakat bu sızma eşiğinden sonra nanoparçacıklar epoksi reçine içerisinde hem iyi ıslanmadığı hem de Nano Ag'lerin iyi dağılmadığından dolayı mekanik özellikler düşmüştür. Ayrıca bu yapılar SEM görüntüleriyle birlikte daha iyi açıklanmıştır.

TGA/TDA termal analizleri sonucunda ise nanoparçacıkların artmasıyla sistemde ikincil bir ısı kaynağı vazifesi görerek termal bozunma ve camsı geçiş sıcaklıklarını düşürmüştür.

Kaynaklar

[1]. Petrie EM. Handbook of adhesives and sealants: McGraw-Hill; 2000.
[2]. Kozma L, Olefjord I. Basic Processes of Surface Preparation and Bond Formation of Adhesively Joined Aluminum, Mater Sci Tech Ser, 1987, 3(10), 860-74.
[3]. Sun LY, Gibson RF, Gordaninejad F, Suhr J. Energy absorption capability of nanocomposites: A review, Compos Sci Technol, 2009, 69(14), 2392-409.
[4]. Suhr J, Koratkar NA. Energy dissipation in carbon nanotube composites: a review, Journal of Materials Science, 2008, 43(13), 4370-82.
[5]. Han JT, Cho K. Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range, J of Mat Science, 2006, 41(13), 4239-45.
[6]. Liang Y, Pearson R. Toughening mechanisms in epoxy–silica nanocomposites (ESNs), Polymer, 2009, 50(20), 4895-905.
[7]. Wang X, Jin J, Song M. An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy, Carbon, 2013, 65, 324-33.
[8]. Chandrasekaran S, Sato N, Tölle F, Mülhaupt R, Fiedler B, Schulte K. Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites, Compos Sci Tech, 2014, 97, 90-99.
[9]. Wetzel B, Rosso P, Haupert F, Friedrich K. Epoxy nanocomposites–fracture and toughening mechanisms, Engineering fracture mechanics, 2006, 73(16), 2375-98.
[10]. Carolan D, Ivankovic A, Kinloch A, Sprenger S, Taylor A. Toughening of epoxy-based hybrid nanocomposites, Polymer, 2016, 97, 179-90.
[11]. Ekrem M. Mechanical properties of MWCNT Reinforced polyvinyl alcohol nanofiber mats by electrospinnig method, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(2).
[12]. Marouf BT, Mai Y-W, Bagheri R, Pearson RA. Toughening of epoxy nanocomposites: nano and hybrid effects, Polymer Reviews, 2016, 56(1), 70-112.
[13]. Mansourian-Tabaei M, Jafari SH, Khonakdar HA. Lap Shear Strength and Thermal Stability of Diglycidyl Ether of Bisphenol A/ Epoxy Novolac Adhesives with Nanoreinforcing Fillers, Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(6).
[14]. Spitalsky Z, Tasis D, Papagelis K, Galiotis C. Carbon nanotube–polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties, Progress in polymer science, 2010, 35(3), 357-401.
[15]. Jin FL, Park SJ. Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites, Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(11), 2148-53.
[16]. Meng Q, Wang CH, Saber N, Kuan H-C, Dai J, Friedrich K, et al., Nanosilica-toughened polymer adhesives, Materials & Design, 2014, 61, 75-86.
[17]. Ulus H, Ustun T, Eskizeybek V, Sahin OS, Avci A, Ekrem M. Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, Applied Surface Science, 2014, 318, 37-42.
[18]. Domun N, Paton K, Hadavinia H, Sainsbury T, Zhang T, Mohamud H. Enhancement of fracture toughness of epoxy nanocomposites by combining nanotubes and nanosheets as fillers, Materials, 2017, 10(10), 1179.
[19]. Chisholm N, Mahfuz H, Rangari VK, Ashfaq A, Jeelani S. Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites, Compos Struct, 2005, 67(1), 115-24.
[20]. Ghosh P, Pathak A, Goyat M, Halder S. Influence of nanoparticle weight fraction on morphology and thermal properties of epoxy/TiO2 nanocomposite, J Reinf Plast Comp, 2012, 31(17), 1180-8.
[21]. Khan SU, Pothnis JR, Kim J-K. Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 49, 26-34.
[22]. Korayem AH, Barati MR, Simon GP, Zhao XL, Duan WH. Reinforcing brittle and ductile epoxy matrices using carbon nanotubes masterbatch, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 61, 126-33.