



Effect of nano clay particle inclusion on axial and lateral buckling characteristics of basalt fiber reinforced composites

Mehmet Bulut¹, Özkan Özbek^{2*}, Ömer Yavuz Bozkurt³, Ahmet Erklığ³

¹Hakkari University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 30000, Hakkari, Turkey

²Kilis 7 Aralık University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department, 79000, Kilis, Turkey

³Gaziantep University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 27310, Gaziantep, Turkey

Highlights:

- Buckling characteristics of basalt fiber reinforced epoxy composite laminates
- Basalt fiber reinforced epoxy composite fabrication with nano clay particle additive
- The effects of nano clay particles on the buckling properties of basalt composite laminates

Keywords:

- Nano clay particles
- Basalt fibers
- Axial buckling
- Lateral buckling

Article Info:

Research Article
Received: 11.06.2021
Accepted: 15.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951024

Correspondence:

Author: Özkan Özbek
e-mail:
ozkanozbek@kilis.edu.tr
phone: +90 541 619 4635

Graphical/Tabular Abstract

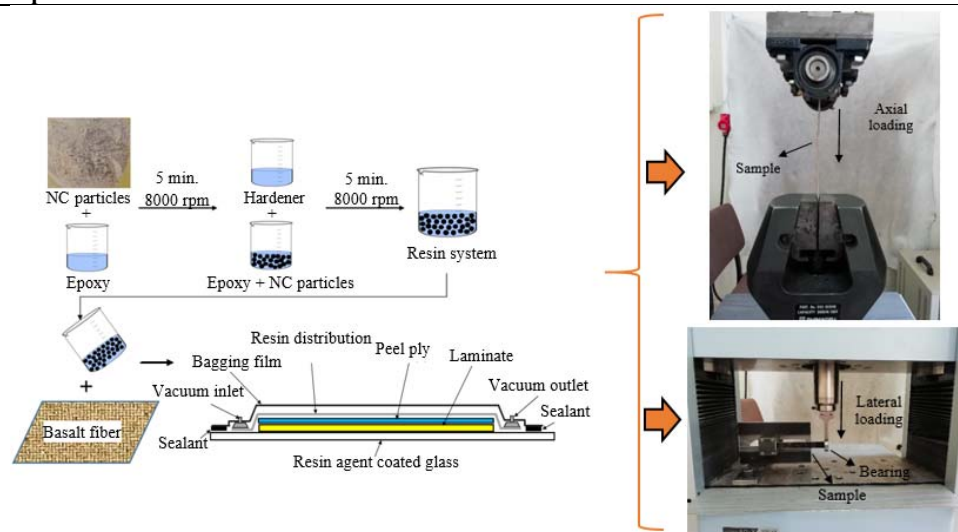


Figure A. The production flow and testing of basalt fiber reinforced composites with NC particles

Purpose: Even though many studies were performed on mechanical properties of the fiber reinforced composites incorporating nanoparticles, studies on buckling behavior of nano clay particle filled composites are still infancy. To the best of authors' knowledge, the buckling characteristics of basalt fiber reinforced composites containing NC particles has not been studied yet. Therefore, in this study, the effect of NC particle addition on axial and lateral buckling properties of basalt fiber reinforced composites was investigated at different NC weight contents.

Theory and Methods:

Basalt fiber reinforced composite samples fabricated by vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) were prepared at various NC particle weight concentrations (0, 0.5, 1, 1.5, 2 and 3 wt.%). Prepared samples were experimentally loaded in axial and lateral direction to determine effects of NC particles on buckling properties. The effects of the NC particles on the fracture characteristics were also analyzed by taking images on a scanning electron microscope (SEM).

Results:

The results revealed that the most improvements on the buckling behaviors of samples were achieved from 1wt.% NC addition. The improvements were 48.1% and 39.56% for the axial and lateral critical buckling loads, respectively. Slight decreases in buckling characteristics were observed in samples containing more than 1wt.% NC particles due to poor interfacial bonding caused by agglomerations and exfoliation of nano particles at the epoxy/basalt interfaces.

Conclusion:

It has been determined that the use of NC particles in epoxy based matrix system significantly increases the buckling properties of basalt fiber reinforced composites, and it has been proven that it is possible to evaluate the materials of the system members that may be exposed to high axial or lateral buckling loads.



Nano kil parçacık ilavesinin bazalt fiber takviyeli kompozit plakaların aksel ve yanal burkulma özelliklerine etkisi

Mehmet Bulut¹, Özkan Özbek^{2*}, Ömer Yavuz Bozkurt³, Ahmet Erklig³

¹Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 30000, Hakkari, Türkiye

²Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 79000, Kilis, Türkiye

³Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaların burkulma davranışı
- Nano kil parçacık katkılı bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka üretimi
- Nano kil parçacık katkısının bazalt kompozit plakaların burkulma özelliklerine etkileri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.06.2021

Kabul: 15.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951024

Anahtar Kelimeler:

Nano kil parçacıkları,
bazalt elyaf,
eksel burkulma,
yanal burkulma

ÖZ

Mevcut araştırma, epoksi matris sistemine nano kil (NK) parçacıklarının dahil edilerek bazalt elyaf takviyeli kompozit plakaların burkulma özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ağırlıkça farklı NK konsantrasyonları (%0,0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0) içeren bazalt elyaf takviyeli tabakalı kompozit plakalar, vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilmiş ve NK parçacıklarının burkulma özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için numuneler aksel ve yanal basma yüklemelerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, NK parçacıklarının malzeme yapısı üzerindeki etkileri, burkulmuş numunelerin SEM görüntüleri ile analiz edilerek incelenmiştir. Sonuçlar, NK parçacık eklentisinin bazalt elyaf takviyeli kompozit plakaların hem aksel hem de yanal burkulma davranışları üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. NK parçacığı içermeyen numuneler ile karşılaştırıldığında, numunelerin aksel ve yanal kritik burkulma yükleri için elde edilen en yüksek iyileşmeler sırasıyla %48,10 ve %39,56 olarak ağırlıkça %1 NK parçacık eklentisinden elde edilmiştir. NK parçacık ilavesi oranının artması kritik burkulma yüklerinde azalmalara neden olmuştur. Bu durum, bazalt elyaf/epoksi ara yüzlerinde nano parçacıkların belli bölgelerde toplanması ve pul pul dökülmeleri sonucunda olan zayıf ara yüzey bağlantısına atfedilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre NK ilavesi uygulamasının bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yapısı ile uyumlu olduğu görülmüş ve yüksek burkulma direnci gerektiren uygulamalarda birlikte kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Effect of nano clay particle inclusion on axial and lateral buckling characteristics of basalt fiber reinforced composites

H I G H L I G H T S

- Buckling characteristics of basalt fiber reinforced epoxy composite laminates
- Basalt fiber reinforced epoxy composite fabrication with nano clay particles additive
- The effects of nano clay particles on the buckling properties of basalt composite laminates

Article Info

Research Article

Received: 11.06.2021

Accepted: 15.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.951024

Keywords:

Nano clay particles,
basalt fiber, a
xial buckling,
lateral buckling

ABSTRACT

The current investigation aims at enhancing the buckling characteristics of basalt fiber-reinforced composites by incorporating nano clay (NC) particles into the epoxy matrix system. Basalt fiber-reinforced composite laminates containing different NC concentrations (0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% and 3.0%) by weight have been manufactured by vacuum-assisted resin transfer molding method and subjected to axial and lateral compression loadings to determine the effects of NC particles on buckling properties. Also, the influences of NC particles on material structure were examined by analysis with SEM micrographs of buckled samples. The results demonstrate that introduction of NC particles has significant effects on both axial and lateral buckling behaviors. Compared to pure samples, the highest improvements obtained for axial and lateral critical buckling loads were 48.1% and 39.56%, respectively, from the sample having 1% NC. Further increasing amount of NC particle content have exhibited reductions in critical buckling loads. This can be explained by poor interfacial bonding as a result of agglomerations and exfoliation of nanoparticles at epoxy/basalt interfaces in certain areas. According to obtained results, the application of NC inclusion has proved to be compatible with structure of basalt fiber-reinforced composites and they might be used together for applications requiring high buckling resistance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya genelinde artan rekabet beraberinde tüm sektörler için daha verimli, yenilikçi ve güvenilir ürünler geliştirmeyi zorunlu kılmaktadır. Bunun sonuçlarından biri olarak özellikle mühendislik uygulamaları için malzeme bilimi her zaman popüler ve ilgi çeken bir alan olmuş, malzemelerin özellikleri veya yeni malzemelerin türetilmesi üzerine sayısız çalışmalar yapılmıştır. Birçok endüstriyel uygulamada mevcut geleneksel malzemelerin, çeşitli özellik kombinasyonlarına sahip yüksek performanslı alternatif malzemelerle değiştirilmesi, mevcut ürünlerin daha ileri özelliklere sahip olması ve talebi karşılayarak teknolojinin ilerlemesi için zorunlu bir ihtiyaç olmaktadır. Kompozit malzemeler, geleneksel monolitik malzemelere kıyasla sundukları üstün fiziksel [1, 2], mekanik [3, 4] ve termal [5, 6] özellikleriyle bu ihtiyacı karşılamak adına özellikle son birkaç on yılda dikkat çekmiş ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [7, 8]. Ancak, artan talep doğrultusunda sürdürülebilir endüstriyel uygulamalar için hem teknik gereksinimleri hem de çevresel standartları karşılayabilen daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmaktadır [9]. Kompozit malzeme üretiminde yeni elyaf türlerinin kullanımı [10], farklı elyaf takviyelerinin aynı anda kullanımı (elyaf melezleme) [11, 12], elyaf yerleşim oryantasyonu [13, 14], istifleme sırası [15, 16] ve çeşitli mikro veya nano ölçekte katkı maddelerinin eklenmesi ile matrisi daha dayanıklı hale getirme gibi kompozit malzemenin iç yapısının değişimi [17-19], yüksek performanslı yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi veya mevcut kompozit malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi için öne çıkan tipik yaklaşımlardır.

Mevcut elyaf türlerine kıyasla sahip olduğu iyi mekanik mukavemet, yüksek sıcaklık direnci, iyi elektrik/ısı/ses yalıtımı, kimyasallara karşı yüksek direnç, düşük su emme ve biyolojik stabilite gibi çeşitli özellikleriyle nispeten yeni elyaf türlerinden biri olarak bazalt elyaf, farklı endüstrilerin gereksinimlerini karşılayacak kompozit malzeme üretimleri için umut verici bir alternatif malzeme olarak dikkat çekmektedir [20]. Son yıllarda, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, basma, eğilme, darbe, aşınma, kırılma ve tabakalar arası kayma mukavemeti gibi farklı mekanik özellikleri çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir [21-24]. Ayrıca, bazalt elyafının cam, karbon, naylon, aramid, kenevir, jüt, keten gibi farklı elyaflar ile birlikte kullanımını konu alan hibrit elyaf takviyeli kompozitlerin çeşitli mekanik özellikleri üzerine de birçok araştırma bulunmaktadır [25-27]. Tüm bu çalışmalar incelendiğinde bazalt elyaf ile ilgili en dikkat çekici nokta; kimyasal bileşimlerdeki benzerliğe rağmen, bazalt elyafın sahip olduğu özellikler bakımından cam elyaf ile kıyaslanabilir veya daha iyi olarak tanımlanabilir olmasıdır [28]. Bu çalışmalar, her ne kadar bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin pek çok mühendislik uygulaması için yeterli mekanik özelliklere sahip olduğunu düşündürse de nispeten düşük elastisite modülleri nedeniyle ince cidarlı yapısal uygulamalarda (kiriş, levha veya kabuk yapılar gibi) özellikle burkulma davranışları dikkate alınmalıdır. Açık

literatürde bazalt elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin burkulma özellikleri üzerine son derece sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Lamea vd. [29] tek yönlü bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaların aksel burkulma davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmıştır. Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaların burkulma tepkisine delik ve delik boyutunun etkisinin de karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmada, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin burkulma performansı, cam elyaf takviyeli epoksi tabakalı kompozitler ile karşılaştırılmış ve bazalt plakalar için daha yüksek burkulma direnci bildirilmiştir. Dhuban vd. [30], istifleme dizisinin ve elyaf oryantasyon açısının bazalt-karbon melez elyaf takviyeli kompozit plakaların aksel burkulma davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin burkulma performansının bazalt elyaf takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu belirlenerek, karbon elyaf takviyeli tabakaların dış yüzeylere yerleştirilmesinin, diğer istifleme dizilerine göre daha yüksek burkulma mukavemetine sahip olduğu gösterilmiştir. Chhorn ve Jung [31], çekme ve düzlem içi kesme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri kullanarak bazalt elyaf takviyeli polimer kompozitlerin burkulma direncini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Ayrıca, bazalt elyaf takviyeli kompozit plakaların burkulma direncinin cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Son yıllarda, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini arttırmak için kullanılan popüler yaklaşımlardan olan matris sistemi içine nano boyutlarda parçacık eklenmesinin, elyaf takviyeli kompozitlerin burkulma özelliklerini iyileştirmesi uygulaması üzerine literatürde umut verici sonuçlar sunan çeşitli çalışmalar [32-34] bulunmasına karşın bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin burkulma özelliklerini iyileştirmek için nano parçacık katkısı konu alan bir çalışma gözükmemektedir. Bu nedenle, bu çalışmada düşük maliyet, birçok elyaf türü ile uyumluluk, kolay uygulanabilirlik, gerilme mukavemeti ve kırılma tokluğu gibi farklı mekanik özelliklerde kayda değer artış sağlayan ve çeşitli çalışmalarda öne çıkan nano kil (NK) katkısının bazalt elyaf takviyeli kompozit plakaların aksel ve yanal burkulma özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Matris sistemine (epoksi) ağırlıkça beş farklı oranda NK (%0, %0,5, %1, %1,5, %2 ve %3) eklenmesi ile üretilen kompozit plakalar, aksel ve yanal burkulma deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca numunelerin burkulma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) görüntüleri alınarak epoksi ortamındaki NK parçacık dağılımları analiz edilmiş ve numunelerin hasar mekanizmaları üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzemelerin Özellikleri (Properties of Materials)

Tabakalı kompozit plakaların üretimlerinde takviye malzemesi olarak Zhejiang GBF Bazalt Elyaf Şirketi'nden (ZheJiang, Çin) tedarik edilen bazalt elyaf kullanılmıştır.

Matris sistemi olarak Dost Kimya End. Hamm. San. ve Tic. Ltd. Şirketi'nden (İstanbul, Türkiye) temin edilen epoksi reçine (EPIKOTE Resin MGS L160), sertleştirici (EPIKURE Curing Agent MGS H160) ve Grafen Kimya Endüstrisi Firması'ndan (Ankara, Türkiye) satın alınan dimetil dialkil aminli Montmorillonite NK parçacıkları kullanılmıştır. NK parçacıkları, 0,5-2 µm yanal genişlik, 1-10 nm aralığında kalınlık ve 200-500 kg/m³'lük bir kütle (bulk) yoğunluğu özelliklerine sahiptir. Epoksi ve sertleştirici, 25°C sıcaklıkta sırasıyla 700-900 mPas ve 10-50 mPas viskozite sergilemektedir. Matris sistemi, NK parçacıklarının epoksi reçine içine karıştırılması ve karışıma sertleştirici katılması yoluyla iki aşamalı bir süreç ile hazırlanmıştır. NK parçacıklarının epoksi içinde homojen dağılımını sağlamak amacıyla içine belli miktarda NK eklenen epoksi reçine, dakikada 8000 devirle dönen bir mekanik karıştırıcı kullanılarak yarım saat arayla iki defa 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Ardından, karışıma 100:25 stokiyometrik ağırlık oranında sertleştirici eklenerek homojenlik sağlanana kadar (yaklaşık 10 dakika) mekanik olarak bir kez daha karıştırılmıştır. Bazalt elyaf ve epoksiye ait bazı mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Bazalt fiber ve epoksi reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri

(The physical and mechanical properties of basalt fiber and epoxy resin)

Özellik	Bazalt fiber	Epoksi
Yoğunluk	2,63 g/m ³	1,18-1,20
Kalınlık (mm)	0,22 mm	-
Çekme dayanımı (MPa)	3200-3850 MPa	70-80
Elastisite modülü (GPa)	93 GPa	3,2-3,5

2.2. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

Tabakalı kompozit plakaların üretimi, vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim platformu olarak elektrikli ısıtıcı düzeneğe sahip düz bir alüminyum platform kullanıldı. İlk olarak üretim sonrası üretilen kompozitlerin kalıp olarak kullanılan platformdan

sorunsuz olarak çıkarılabilmesi için alüminyum platform kalıp ayırıcı kimyasal ile ince bir tabaka oluşturacak şekilde kaplandı ve (0°/90°) fiber yönelim açısına sahip 12 adet 40 cm×40 cm ölçülerinde kesilmiş dokuma bazalt kumaş parçası platform üzerine istiflendi. Kumaş istifinin iki yanına infüzyon kanalı ve üzerine sırasıyla bir soyma kumaşı ve infüzyon filesi yerleştirildi. Tüm düzeneğin vakum sızdırmazlık bandı kullanılarak vakum naylonu ile kaplanması sonucu kalıp sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra kalıp sistemi içine vakum destekli reçine akışıyla kumaşların tamamının ıslatılması sağlanmıştır. Kumaşların emiliminden arta kalan fazla reçinenin infüzyon hortumları vasıtasıyla basınç göstergeli bir infüzyon reçine tankı içerisine akışının sağlanması ve epoksi ile ıslatılmış tabakalı kompozitlerin belirli bir basınç altında sabit kalması için sistem 6 saat boyunca 700 mm-Hg vakum basınç değerinde tutulmuştur. Sonrasında 24 saat oda sıcaklığında bekletilen epoksi emdirilmiş fiber kumaşlar son olarak 2 saatlik bir süre boyunca 40°C sıcaklığa maruz bırakılarak son kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin üretim süreci Şekil 1'de verilmektedir. Kürlenme işlemleri sonrası 3-eksenli bir CNC router tezgâhı kullanılarak hazırlanan tabakalı kompozit plakalardan boyu 200 mm ve eni 20 mm olacak şekilde test numuneleri kesilmiştir. Ayrıca, fiber takviye malzemesi oranlarını öğrenmek için plakaların farklı bölgelerinden küçük numuneler alınmış, hacim ve ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Sonrasında ASTM D2584 standardına göre 1.5 saat boyunca yüksek kapasiteli bir fırında 400°C sıcaklıkta bekletilerek kürlenmiş epoksinin uçurtulması sağlanmıştır. Geriye kalan fiber malzemesinin ağırlığı ölçülerek numunelerin ilk ağırlık değerlerine bölünmüş ve takviye malzemesine ait kütle oranı belirlenmiştir. Sonrasında, karışım kuralı (rule of mixture) uygulanarak fiber hacim oranı hesaplanmıştır. Numuneler için bazalt elyaf takviyesi hacim oranı %43 ± 1.0 olarak hesaplanmıştır. Numunelerin ortalama kalınlığı, NK miktarına bağlı olarak 2,27 ± 0.08 mm aralığında ölçülmüştür.

2.3. Burkulma Testleri (Buckling Tests)

Burkulma testleri 300 kN kapasiteli Shimadzu AG-X serisi universal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Test numunelerinin üretim süreci (Preparation of test samples)

Eksenel burkulma testleri, Şekil 2a'da görüldüğü gibi, numunelerin üst ve alt çeneler vasıtasıyla her iki uçtan tutularak, uzunlamasına eksen yönünde 0,25 mm/dk'lık bir yükleme hızı ile sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 45 mm'lik bölümü sabit-sabit sınır koşulu olarak test cihazının çenesinde kavranarak, serbest bölüm uzunlukları 155 mm olarak ölçülmüştür. Yanal burkulma testleri ise, numunelerin ankastre kiriş sınır koşulları (sabit-serbest) oluşturacak biçimde Şekil 2b'de gözükten test düzeneğine yerleştirilip ve serbest uçtan yanal yönde 1 mm/dk yer değiştirme uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneye yükü aktaran üst çene ile numunenin serbest ucu arasındaki oluşacak sürtünmenin, numunenin yanal burkulma davranışı üzerinde oluşacak olası etkilerini minimize etmek veya ortadan kaldırmak için numunenin serbest ucuna bir rulman yerleştirilmiştir. Numunelerin 50 mm'lik bölümü sabitlenerek, 150 mm serbest bölüm uzunluğunun uç tarafından yük uygulanmıştır. Her iki burkulma testinde deney güvenilirliğini sağlamak için en az beş numune test edilmiştir. Numunelerin yük-deplasman eğrileri–kullanılarak kritik burkulma yükleri, başarısızlık başlangıcından önceki (eğrinin doğrusallığını kaybetmeden önce) maksimum değerler olarak kaydedilmiştir [34]. Ayrıca, NK parçacık katkılı/katkısız bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit numunelerin morfolojisi, Gaziantep Üniversitesi Uluğ Bey Araştırma Merkezi'nde ZEISS taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

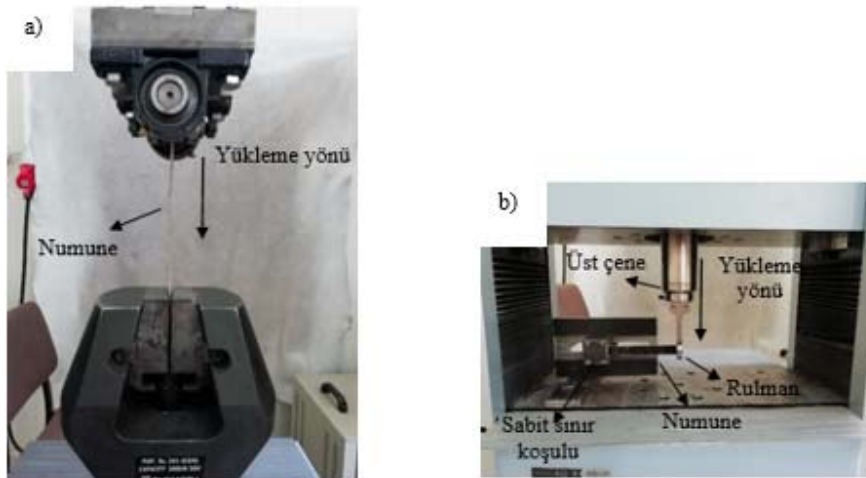
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Eksenel Burkulma (Axial Buckling)

Eksenel sıkıştırmaya maruz bırakılan NK parçacık katkılı/katkısız numunelerin yük-deplasman eğrileri ve kritik burkulma yükleri sırasıyla Şekil 3a ve Şekil 3b'de sunulmuştur. Tüm numunelerden elde edilen yük-deplasman eğrilerine göre belli bir yük miktarına (kritik burkulma yükü) kadar eğrinin doğrusal olarak arttığı, ardından basma yüklemesinin şiddeti ile numune kararsız duruma geçmeye

başlarken doğrusal olmayan eğri olarak devam ettiği açıktır. Yükün bu belirli noktasından sonra numuneler, kritik burkulma noktası anlamına gelen sıkıştırma yükünü taşıyamamıştır. Epoksi ortamına dahil edilen NK parçacık içeriğinin, özellikle ağırlıkça %0,5 ve %1 oranlarında, epoksi ve bazalt fiberler ile başarılı bir şekilde fonksiyonel olarak bağlanabildiğini göstermektedir. Bu içeriğe sahip numuneler diğerlerine kıyasla, kimyasal işlevselliğinin daha iyi bağ kurma ile ilişkili olduğunu söylemektedir. Bu nedenle, sıkıştırma yüklemesine maruz kalan numunelerde ağırlıkça %1 NK oranında parçacık içeriğine sahip numuneler matris üzerinden fiberlere yük transferinde önemli ölçüde artışlara sahip olarak en iyi performansı göstermişlerdir. Ağırlıkça %1 oranında NK içeriğine sahip numuneler, kimyasal uyumluluğun ve fonksiyonelliğin bir sonucu olarak daha yüksek elastisite ve basma dayanımı ile daha kırılğan bir yapı göstermiştir. Literatürde nano parçacıkların polimer tabanlı kompozitlerin sıkıştırmaya maruz kaldığı yüklemelerde epoksi sisteminden fiber takviyelerine yük transfer kabiliyetini artırarak daha yüksek sıkıştırma özellikleri gösterdiklerini açıklayan birçok çalışma bulunmaktadır [34, 35]. İlaveten, Bulut vd. [32] nano kil parçacık katkısının bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerini araştırmış, belli oranlara kadar NK eklentisinin numunelerin ara yüzey dayanımlarını iyileştirerek çekme dayanımı, elastisite modülü, eğme dayanımı ve eğme modülü gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Yüksek miktarlarda NK katkısının ise belirtilen mekanik özelliklerde toplanmadan kaynaklı yerel gerilme konsantrasyonları nedeniyle düşüşlere yol açtığını rapor etmişlerdir.

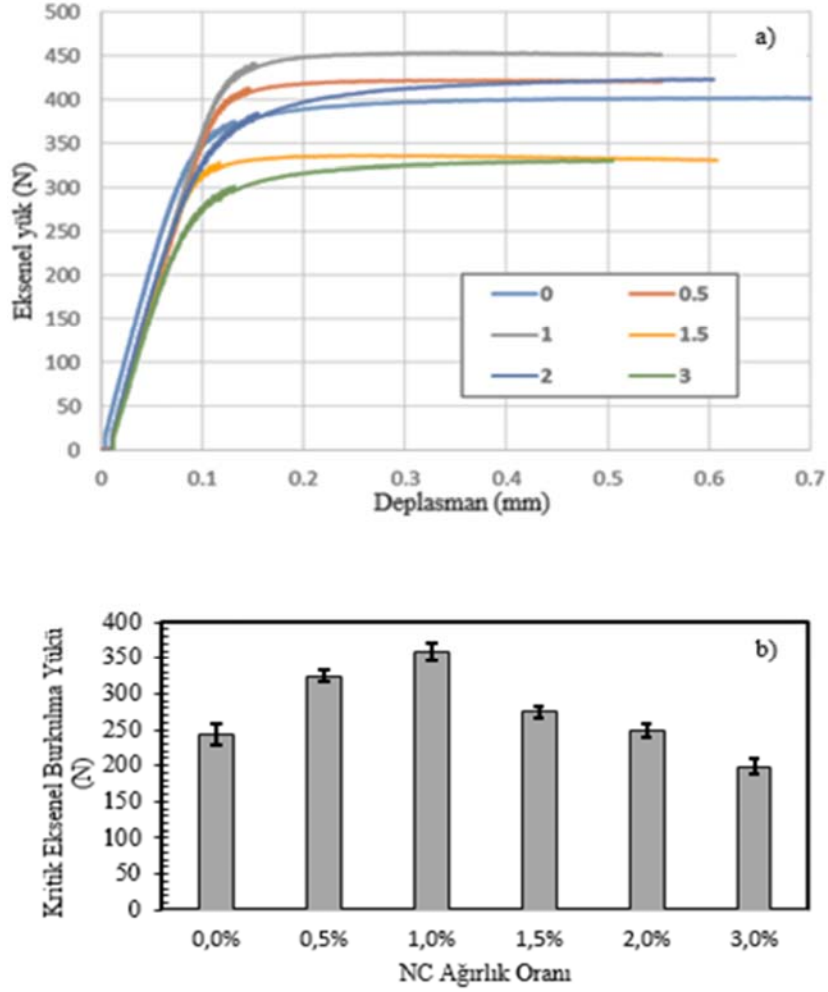
Öte yandan, NK parçacıkların epoksi reçine içerisine daha fazla miktarlarda ilave edilmesi, kritik burkulma yükünde azalmalara neden olmuş ve bu durumun NK parçacıkları ile fiber/matris arasında yük transferinde azalmaya yol açan toplanmadan dolayı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, NK parçacıkların pul pul dökülmesi (exfoliation), özellikle epoksi matris sisteminde görülen uyumluluğun negatif olarak değişmesine yol açmakta ve yük taşıma kapasitesini



Şekil 2. Burkulma deneyleri; (a) Eksenel burkulma, (b) Yanal burkulma
(Buckling experiments; (a) axial buckling, (b) lateral buckling)

olumsuz etkileyerek kritik burkulma yükleri üzerinde düşüşlere neden olmaktadır. Bazı araştırmacılar, NK parçacıkların pul pul dökülmesinin kompozit malzemenin mekanik özelliklerini azalttığını tespit etmişlerdir [36, 37]. NK parçacık eklentisi ile numunelerin kritik burkulma yükü ağırlıkça %1 NK içeren numunelerde (359,2 N) nano katkı içermeyen numunelere (242,6 N) kıyasla %48,1 daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Bu miktardan fazla NK ilavesinde görülen yüzdesel olarak en keskin düşüş %23,3 ile ağırlıkça %1,5 NK içeren numunelerden elde edilmiştir. Bu düşüşün sebebi olarak, parçacık ve reçine arasında meydana gelen

zayıf ara yüzey gerilmeleri olduğu çok açıktır. Benzer olarak, Bozkurt vd. [34] nano kil parçacığı içeren cam elyaf takviyeli kompozitlerin burkulma analizlerinde, NK parçacıklarının epoksi özelliklerini zenginleştirerek takviye malzemesi ile epoksi arasında arayüzey bağlanma kabiliyetini artırıp numunelerin burkulma dirençlerine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. %1 NK parçacık katkısının kritik eksenel burkulma değerlerinde maksimum değerler verdiğini belirtmişlerdir. Eksenel sıkıştırılmaya tabi tutulan bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit numunelerin yük altında sergiledikleri davranış Şekil 4'te verilmektedir. Bütün



Şekil 3. Eksenel burkulma; (a) Yük-deplasman grafikleri, (b) Kritik burkulma yükleri
(Axial buckling; (a) load-displacement graphs, (b) critical buckling loads)



Şekil 4. Eksenel burkulma deneyinde numune davranışı (The sample behavior in axial buckling experiment)

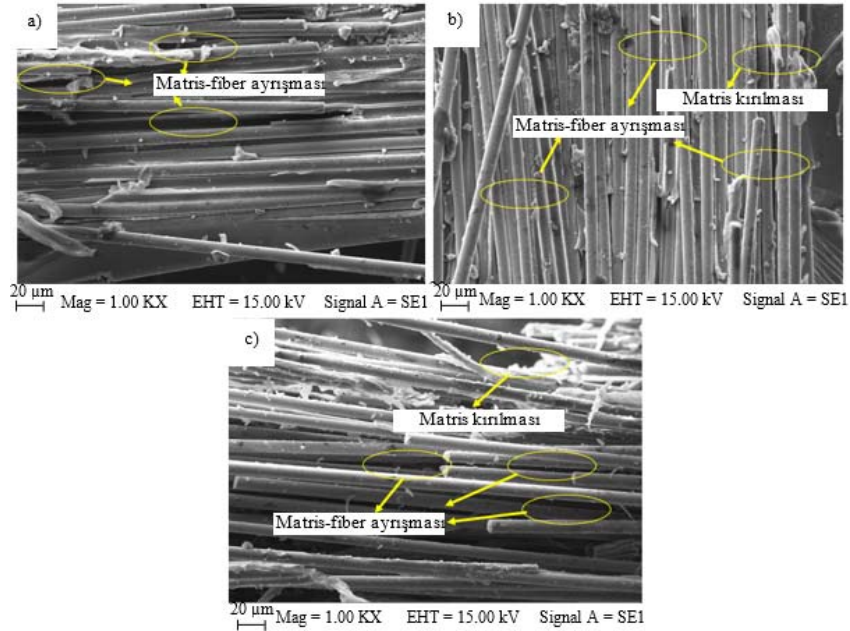
burkulmuş numuneler tipik olarak benzer karakteristik göstererek orta merkezi kısmında maksimum yanıl deplasman göstermişlerdir. Eksenel yüklemenin bir sonucu olarak eğilme oluşumu kompozit numunelerin sertliğinin azalmasına neden olarak numune başarısızlığının temel nedeni olarak görülmektedir [32]. Numunelerin burkulması için uygulanan yük-deplasman miktarlarına göre makro boyutta herhangi bir elyaf kırılması, matris çatlaması veya delaminasyon gözlenmemiştir. Başarısızlık modları numunelerin orta bölümünden (maksimum yanıl deplasman kesiti) alınan örnekler üzerinden SEM görüntüleri ile incelenerek belirlenmiştir. Numunelerin içerisinde yer alan NK parçacıklarının dağılımları ağırlıkça %0, %1 ve %3 için Şekil 5'de SEM görüntüleri aracılığıyla gösterilmektedir. NK parçacıkları ile modifiye edilmemiş numunelerde (Şekil 5a), bazalt liflerine düzgün bir şekilde yapışarak bağlanmış epoksi dağılımı ve epoksi reçinenin kırılğan yapısına atfedilen fiber-matris bağlanması şekillerde açıkça görülmektedir. NK parçacıklarının ağırlıkça %1 oranında eklenmesi, matris ile fiberler arasında köprüleme etkisi (bridging effect) yaratmış ve NK parçacıklarının homojen dağılımlarının bir sonucu olarak eksenel burkulma yükünde artış sağlayan matristen fiber takviyelerine yük transferlerini arttırmıştır. Ayrıca, epoksi ve bazalt fiberler ile etkileşime girebilen NK parçacıklarının %1 oranında eklendiğinde maksimum yüzey alanının elde edildiği ve epoksi ile nano kil arasında diğer oranlara oranla daha iyi bir ara yüzey etkileşimi elde edildiği bulunmuştur. Eksenel yüklemde başarısızlık modları olarak matris kırılması ve eğilmeden (bending) kaynaklı matris-fiber ayrışmaları tespit edilmiştir.

3.2. Yanıl Burkulma (Lateral Buckling)

Eksenel yüklemenin aksine kompozit bir kiriş yanıl olarak yüklendiğinde hem eğilme (bending) hem de burkulmaya

(twisting) maruz kalmakta ve alt fiberlerde çökme olarak bir başarısızlık sergilemektedir [38]. Bu nedenle, kiriş tipi numunelerin yanıl yüklemelere maruz kaldığı uygulamalar için bu yönde burkulma karakteristiklerinin belirlenmesi, yapıların yanıl olarak erken çökmesini önlemek için yapısal uygulamalarda önemli bir tasarım kriteridir.

Şekil 6'da, NK parçacıkları ile modifiye edilmiş kompozit numunelerin yük-deplasman eğrileri ve kritik yanıl burkulma yükleri gösterilmektedir. Şekil 6a'da verilen yük-deplasman eğrileri incelendiğinde, yükün belirli bir noktaya kadar doğrusal olarak arttığı, ardından azalan bir eğilim ile doğrusal olmayan bir şekilde yol izlediği görülmektedir. Numunelerin yük geçmişindeki doğrusallığın bittiği nokta kritik yanıl burkulma yükü olarak belirlenmiş ve Şekil 6b'de elde edilen sonuçların ortalaması gösterilmektedir. Burada, eksenel yüklemde olduğu gibi epoksi reçine ile NK parçacık fonksiyonelliğinin, ağırlıkça %1 NK parçacık oranında yanıl burkulma yüklerinde de önemli bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Yanıl burkulmada en yüksek iyileşme NK parçacıklarının ağırlıkça %1 oranını içeren numunelerde %39,56 (61,35 N) olarak kaydedilmiştir. Bu durum NK parçacıklarının epoksi reçine ile bazalt fiberlerin mükemmel şekilde uyum sağladığını ve yük transferini verimli bir şekilde arttırdığını göstermektedir. Maksimum iyileşme, epoksi reçine içerisindeki NK parçacıkların homojen dağılımına atfedilmiş ve daha iyi bir fiber-matris ara bağ oluşturduğunu göstermiştir. Yüzey işlevselliğini arttırmak amacıyla NK parçacık oranının artırılması yanıl burkulma yükünde bir azalmaya sebep olmuştur. Bu azalma, NK parçacık topaklanmasının (agglomeration) [39] bir sonucu olarak zayıf ara yüzey gerilimlerine ve epoksi reçinesi içindeki NK parçacığının pul pul dökülmesine (exfoliation) neden olarak yük transferinin bozulmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir [40]. Benzer şekilde,

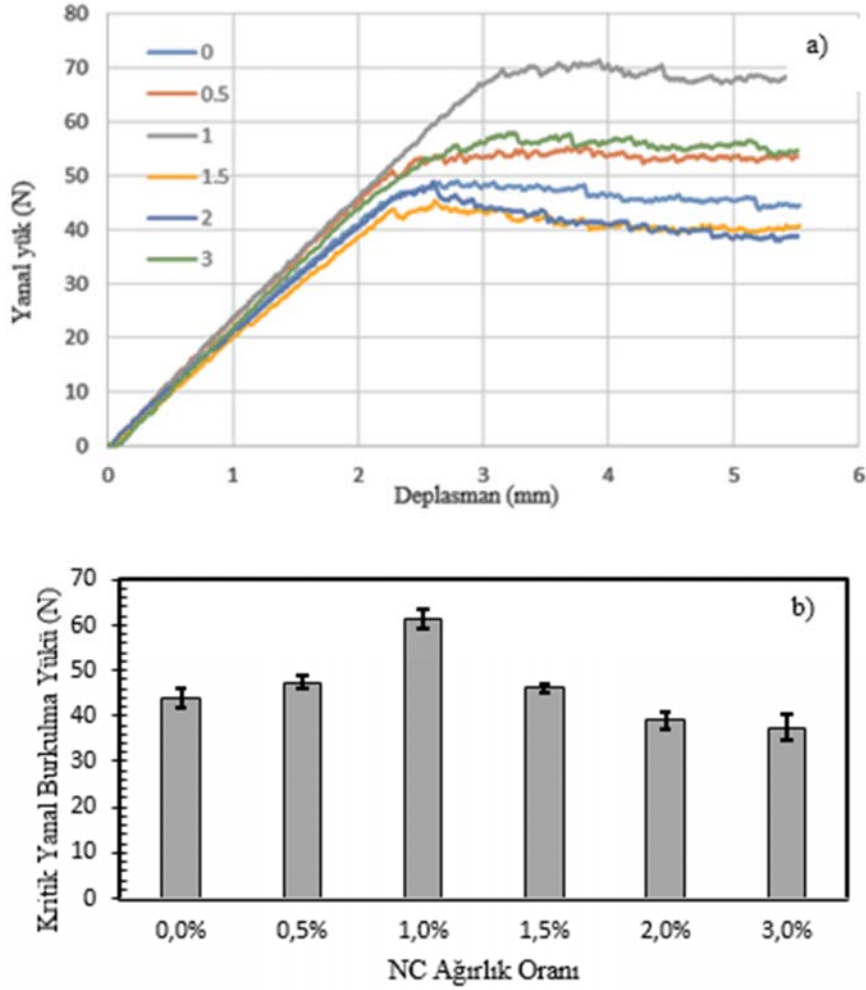


Şekil 5. Eksenel burkulmuş numunelerin SEM görüntüleri. (a) %0 NK, (b) %1 NK, (c) %3 NK
(SEM images of axially buckled samples; (a) 0% NC, (b) 1% NC, (c) 3% NC)

literatürde nano katkı ilavelerinin belli bir orandan sonra malzemede meydana gelen iyileşmelerin daha az veya nano katkısız numunelere göre daha düşük sonuçlar verdiğine dair birçok çalışma bulunmaktadır [32, 41]. Örneğin; Alsaadi vd. [42], nano silika parçacığı eklenmesinin Kevlar/karbon fiber takviyeli kompozit plakaların eğilme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve ağırlıkça belli bir orandan (%1,5 nano silica) sonra eğilme mukavemeti için topaklanma olgularından dolayı eğilme özelliklerinin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Nano katkı içermeyen numunelere

kıyasla numunelerden elde edilen iyileşmeler ağırlıkça %0,5, %1, %1,5, %2 ve %3 NK katkıları için sırasıyla %8,9, %39,56, %4.84, %-11.35, %-14.6 olarak hesaplanmıştır.

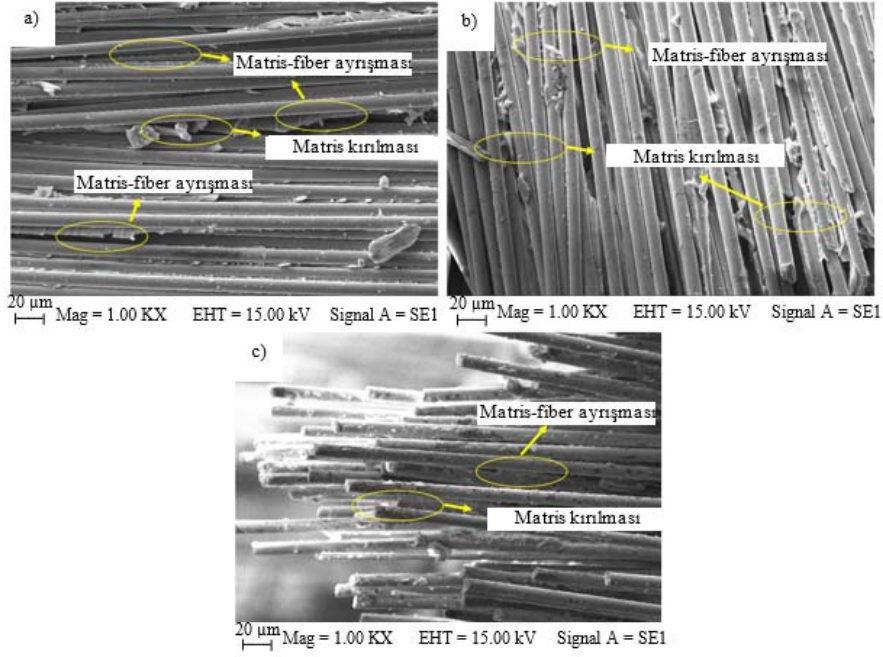
Bazat/epoksi elyaf takviyeli kompozit numunelerin yanal sıkıştırma yüklemesi altında sergiledikleri davranışlar Şekil 7'de gösterilmektedir. Yanal yüklemeye maruz kalan bütün test numuneleri tipik bir yanal burkulma davranışı göstermiştir. Ön görünüm (Şekil 7a) incelendiğinde numune başarısızlığın ana nedeni eğilme olarak gözükse de, yan ve



Şekil 6. Yanal burkulma; (a) Yük-deplasman grafikleri, (b) Kritik burkulma yükleri
 (Lateral buckling; (a) load-displacement graphs, (b) critical buckling loads)



Şekil 7. Yanal burkulma deneyinde numune davranışı; (a) Ön görünüm, (b) Yan görünüm, (c) Üst görünüm
 (The sample behavior in lateral buckling experiment; (a) Front view, (b) Side view, (c) Top view)



Şekil 8. Yanal burkulmuş numunelerin SEM görüntüleri. (a) %0 NK, (b) %1 NK, (c) %3 NK
(SEM images of laterally buckled samples; (a) 0% NC, (b) 1% NC, (c) 3% NC)

üst görünümde (Şekil 7b) ve Şekil 7c) eğilmeden farklı olarak burulmanın da meydana geldiği açıkça görülmektedir. Eksenel olarak burkulmuş numunelerin aksine, sadece eğilme değil aynı zamanda burulma hareketinin de neden olduğu burkulma başarısızlığı olduğu söylenebilir. Literatürde birçok çalışma; yanal yüklemeye doğan eğilme ve burulma hareketlerinin bir sonucu olarak burkulma başarısızlığının kompozit malzemeler üzerinde meydana geldiğini açıklamaktadır [32, 34].

Şekil 8, epoksi ortamı içinde NK parçacıklarının ağırlıkça %0, %1 ve %3 oranındaki dağılımlarını SEM görüntüleri ile göstermektedir. NK parçacıklarının %1 oranında homojen dağılım gösterdiğinde, nano parçacık ile epoksi/bazalt fiberler arasında diğer parçacık içerik oranlarına göre daha iyi uyum sağladığı gözlenmektedir. Bu nedenle, epoksi reçine içerisine NK parçacıklarının homojen dağılımı, parçacık ve epoksi ara yüzeyleri etrafında daha verimli bir işlevselleşmeye yol açmış ve parçacıklar ile matris/bazalt fiberlere daha iyi yük aktarımı ile sonuçlanmıştır. NK parçacıkları olmayan numunelerdeki epoksi dağılımı elyaflara yapışarak bağlanmıştır. Bununla birlikte, epoksi reçine içerisindeki NK parçacıklarının yüksek yüzdeleri, NK parçacık topaklanması sonucunda epoksi ve fiberler arasındaki yapışmada azalmayı ortaya koymuştur. Bu nedenle, NK parçacıklarının ağırlıkça %1'den fazlası bu etkiden dolayı yanal burkulma yüklerinin azalması ile sonuçlanmıştır [34].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, NK parçacıklarının bazalt elyaf takviyeli epoksi tabakalı kompozitlerin eksenel ve yanal burkulma özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ağırlıkça

farklı oranlarda NK parçacıkları (%0,0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0) içeren bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit numuneleri, vakum destekli el yatırması yöntemi ile üretilmiş ve NK parçacıklarının burkulma özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için eksenel ve yanal basma yüklemelerine tabi tutulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- BFRP numunelerine NK parçacıklarının dahil edilmesi, epoksi tabanlı matris sisteminden fiber takviyelerine olan yük aktarımını iyileştirerek kompozit numunelerin eksenel ve yanal burkulma özelliklerinin artmasına katkıda bulunmuştur.
- Kritik eksenel ve yanal burkulma yüklerinde maksimum artış %1 NK parçacığı içeren numunelerde sırasıyla %48,1 ve %39,56 olarak belirlenmiştir.
- Ağırlıkça %1'den fazla NK parçacık ilavesi, parçacık topaklanması ve buna bağlı olarak NK parçacıkları ile epoksi reçine arasındaki oluşan zayıf ara yüzey bağının bir sonucu olarak eksenel ve yanal burkulma değerlerinde azalmaya neden olmuştur.
- SEM görüntüleri incelendiğinde başarısızlık matris kırılması ile başlamış ve matris/fiber ayrışması olarak devam etmiştir.

Sonuç olarak, NK parçacık katkısının bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eksenel ve yanal burkulma özelliklerinde kayda değer iyileşmeler sağladığı belirlenmiş, yüksek burkulma direnci gerektiren ve bazalt elyaf takviyeli malzeme kullanılan uygulamalarda NK parçacıklarının kullanımının daha üstün bir performans sergileyebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Uslu, E., Gavgali, M., Erdal, M.O., Yazman, Ş., Gemi, L., Determination of mechanical properties of polymer matrix composites reinforced with electrospinning N66, PAN, PVA and PVC nanofibers: A comparative study, *Mater. Today Commun.*, 26, 101939, 2021.
2. Maziz, A., Tarfaoui, M., Gemi, L., Rechak, S., Nachtane, M., A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact. *Compos. Struct.*, 114520, 2021.
3. Sebaey, T.A., Rajak, D.K., Mehboob, H., Internally stiffened foam-filled carbon fiber reinforced composite tubes under impact loading for energy absorption applications. *Compos. Struct.*, 255, 112910, 2021.
4. Gemi, D.S., Şahin, Ö.S., Gemi, L. Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes. *Compos. Struct.*, 275, 114428, 2021.
5. Kaw A.K., *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2005.
6. Oğuz, Z.A., Erklığ, A., Bozkurt, Ö.Y., Effects of Hydrothermal Seawater Aging on the Mechanical Properties and Water Absorption of Glass/Aramid/Epoxy Hybrid Composites, *Int. Polym. Proc.*, 36 (1), 79-93, 2021.
7. İç Y.T., Elaldi F., Keçeci B., Uzun G.Ö., Limoncuoğlu N., Aksoy İ., An optimization for milling operation of Kevlar fiber-epoxy composite material using factorial design and goal programming methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1549-1560, 2019.
8. Ermurat M., Gebel M.E., Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 57-68, 2021.
9. Jamshaid H., Basalt fiber and its applications, *J. Textile Eng. Fashion Technol.*, 1 (6), 254-255, 2017.
10. Sullins, T., Pillay, S., Komus, A., Ning, H., Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments, *Composites, Part B*, 114, 15-22, 2017.
11. Özbek, Ö., Doğan, N.F., Bozkurt, Ö.Y., An experimental investigation on lateral crushing response of glass/carbon intraply hybrid filament wound composite pipes, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 42 (7), 1-13, 2020.
12. Oguz, Z.A., Erklığ, A., Bozkurt, Ö.Y., Degradation of hybrid aramid/glass/epoxy composites hydrothermally aged in distilled water, *J. Compos. Mater.*, 0021998320984237, 2020.
13. Özbek, Ö., Bozkurt, Ö. Y., & Erklığ, A., Low velocity impact behaviors of basalt/epoxy reinforced composite laminates with different fiber orientations. *Tur. J. Eng.*, 4 (4), 197-202, 2020.
14. Hachemi, M., Guenanou, A., Effect of the fiber orientation angle on the vibrational behavior of symmetric and antisymmetric VSLC elliptical plates, *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 1-21, 2020.
15. Gemi, L., Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study, *Composites, Part B*, 153, 217-232, 2018.
16. Caminero, M.A., García-Moreno, I., Rodríguez, G.P., Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates, *Polym. Test.*, 66, 360-370, 2018.
17. Topcu İ., Güllüoğlu A.N., Bilici M.K., Gülsoy H.Ö., Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1441-1450, 2019.
18. Doğan, N.F., Bulut, M., Erklığ, A., Bozkurt, Ö.Y., Mechanical and low velocity impact characterization of carbon/glass hybrid composites with graphene nanoplatelets, *Mater. Res. Express*, 6 (8), 085304, 2019.
19. Kim, B. C., Park, S.W., Fracture toughness of the nanoparticle reinforced epoxy composite, *Compos. Struct.*, 86 (1-3), 69-77, 2008.
20. Bozkurt Ö.Y., Hybridization effects on tensile and bending behavior of aramid/basalt fiber reinforced epoxy composites, *Polym. Compos.*, 38 (6), 1144-1150, 2017.
21. Bulut, M., Bozkurt, Ö.Y., Erklığ, A., Yaykaşlı, H., Özbek, Ö., Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber-Reinforced Composites with Nanoclay Particles, *Arab. J. Sci. Eng.*, 45 (2), 1017-1033, 2020.
22. Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.J., Hui, D., A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites, Part B*, 73, 166-180, 2015.
23. Demirci, M.T., Low velocity impact and fracture characterization of SiO₂ nanoparticles filled basalt fiber reinforced composite tubes, *J. Compos. Mater.*, 54 (23), 3415-3433, 2020.
24. Liu Q., Shaw M.T., Parnas R.S., McDonnell A.M., Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation, *Polym. Compos.*, 27 (1), 41-48, 2006.
25. Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Valente, T., Cioffi, S., Iannace, S., Sorrentino, L., Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven fabric/epoxy resin composites. *Composites Part A*, 47, 109-123, 2013.
26. Bozkurt Ö.Y., Erklığ A., Bozkurt, Y.T., Influence of basalt fiber hybridization on the vibration-damping properties of glass fiber reinforced epoxy laminates, *Mater. Res. Express*, 6 (1), 015301, 2018.
27. Özbek, Ö., Bozkurt, Ö.Y., Erklığ, A., An experimental study on intraply fiber hybridization of filament wound composite pipes subjected to quasi-static compression loading, *Polym. Test.*, 79, 106082, 2019.

28. Demirci M.T., Tarakçıoğlu N., Avcı A., Erkendirici Ö.F., Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method, *Composites, Part B*, 66, 7-14, 2014.
29. Lamea, M., Daghigh, V., Soroush, M., Nikbin, K., The buckling behavior of vacuum-infused open-hole unidirectional basalt-fiber composites experimental and numerical investigations, *Mech. Compos. Mater.*, 55 (6), 761-774, 2020.
30. Dhuban, S.B., Karuppanan, S., Mengal, A.N., Patil, S.S., Effect of fiber orientation and ply stacking sequence on buckling behaviour of basalt-carbon hybrid composite laminates, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24 (3), 187-193, 2017.
31. Chhorn, B., Jung, W., Evaluation of Buckling Resistance of Basalt Fiber Reinforced Polymer Plate, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-12, 2020.
32. Özbek, Ö. Axial and lateral buckling analysis of kevlar/epoxy fiber-reinforced composite laminates incorporating silica nanoparticles, *Polym. Compos.*, 42 (3), 1109– 1122, 2021.
33. Rostamiyan Y., Emrahi R., Investigation of Buckling Analysis of Epoxy/ Nanoclay/ Carbon Fiber Hybrid Laminated Nanocomposite: Using VARTM Technique for Preparation, *Mech. Adv. Comp. Struct.*, 3, 63-71, 2016.
34. Bozkurt Ö.Y., Bulut M., Erkliğ A., Faydh W.A., Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clay particles, *Composites, Part B*, 158, 82-91, 2019.
35. Zhang W., Suhr J., Koratkar N.A., Observation of high buckling stability in carbon nanotube polymer composites, *Adv. Mater.*, 18 (4), 452-456, 2006.
36. Rafiq A., Merah N., Boukhili R., Al-Qadhi M., Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite, *Polym. Test.*, 57, 1-11, 2017.
37. Alamri H., Low I.M., Effect of water absorption on the mechanical properties of nanoclay filled recycled cellulose fibre reinforced epoxy hybrid nanocomposites, *Composites, Part A*, 44, 23-31, 2013.
38. E. Yeter, A. Erkliğ, M. Bulut, Hybridization effects on lateral buckling behavior of laminated composite beams, *Polym. Compos.*, 37 (8), 2511-2521, 2016.
39. Bulut M., Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites, Part B*, 122, 71-78, 2017.
40. Ferreira J.A.M., Santos D.S.C., Capela C., Costa J.D.M., Impact response of nano reinforced mat glass/epoxy laminates, *Fibers Polym.*, 16, 173 –180, 2015.
41. Azadi, R., Rostamiyan, Y., Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization, *Constr. Build. Mater.*, 88, 212-224, 2015.
42. Alsaadi M., Bulut M., Erkliğ A., Jabbar A., Nano-silica inclusion effects on mechanical and dynamic behavior of fiber reinforced carbon/Kevlar with epoxy resin hybrid composites, *Composites, Part B*, 152, 169-179, 2018.

