



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/humder>

Al₂O₃ ve TiO₂ Nanopartikül Katkısının Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Burkulma Davranışına Etkisi

The Effect of Al₂O₃ and TiO₂ Nanoparticle Additives on Mechanical Properties and Buckling Behavior of Glass Fiber Reinforced Composites

Yazar(lar) (Author(s)): Cenap GÜVEN¹, Murat KISA², Mustafa ÖZEN³, Gökhan DEMİRCAN⁴

¹ ORCID ID: 0000-0001-9868-3249

² ORCID ID: 0000-0001-7015-2198

³ ORCID ID: 0000-0002-0282-9387

⁴ ORCID ID: 0000-0002-9579-6878

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Güven C., Kısa M., Özen M., Demircan G., “Al₂O₃ ve TiO₂ Nanopartikül Katkısının Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Burkulma Davranışına Etkisi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3): 161-172, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/humder/archive>



Al₂O₃ ve TiO₂ Nanopartikül Katkısının Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Burkulma Davranışına Etkisi

Cenap GÜVEN^{1,*}, Murat KISA², Mustafa ÖZEN³, Gökhan DEMİRCAN⁴

¹Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 63200, Eyyübiye/ŞANLIURFA

^{2,3,4}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 63190, Haliliye/ŞANLIURFA

Öz

Bu çalışmada Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartikül takviyesinin e-cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine ve burkulma davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda saf, %2 Al₂O₃ katkılı ve %2 TiO₂ katkılı e-cam elyaf takviyeli üç farklı kompozit plaka vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. E-cam elyaf olarak dokuma (woven) kumaş kullanılmış olup, üretilen plakalar CNC freze tezgâhında çekme, basma, eğilme, darbe ve burkulma deneylerini gerçekleştirmek için standartlara göre kesilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkılı kompozitlerin, saf haldeki kompozite göre mekanik özellikleri ve burkulmadaki kritik yükü iyileştirdiği tespit edilmiş ve %2 Al₂O₃ katkılı kompozitin %2 TiO₂ katkılı kompozite göre daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür.

The Effect of Al₂O₃ and TiO₂ Nanoparticle Additives on Mechanical Properties and Buckling Behavior of Glass Fiber Reinforced Composites

Abstract

In this study, the effects of Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticle reinforcement on the mechanical properties and buckling behavior of e-glass fiber reinforced polymer composites were experimentally investigated. In this context, three different composite plates with pure, 2% Al₂O₃ additive and 2% TiO₂ added e-glass fiber reinforced were produced by vacuum assisted resin infusion method. Woven fabric was used as e-glass fiber, and the produced plates were cut by the CNC milling machine according to the standards to perform tensile, compression, bending, impact and buckling tests. As a results, it was determined that the 2% Al₂O₃ and 2% TiO₂ nanoparticle added composites improved the mechanical properties and the critical load in buckling compared to the pure composite, and the 2% Al₂O₃ added composite provided more improvement than the 2% TiO₂ added composite.

Makale Bilgisi

Başvuru: 25/07/2022

Yayın: 30/12/2022

Anahtar Kelimeler

Nanopartikül
Mekanik özellik
Burkulma
Al₂O₃
TiO₂
Cam elyaf

Keywords

Nanoparticle
Mechanical property
Buckling
Al₂O₃
TiO₂
Glass fiber

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fiber takviyeli polimer kompozitler hafif aynı zamanda üstün özelliklere sahip olmalarından dolayı yenilenebilir enerji, havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir [1,2,3]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte fiber takviyeli polimer kompozitlerin özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde matris ve fiber arasındaki bağın güçlü olması kompozitin yapısı bakımından önemlidir [4].

Fiber takviyeli polimer esaslı kompozitlerde matris elemanı olarak kullanılan epoksi reçinesi, fiberlerle iyi bir ara yüz bağı oluşturmaktadır. Ayrıca mekanik özellik, sertlik ve kullanım alanı bakımından tercih edilmektedir [5].

*İletişim yazarı, e-mail: xxx@xxx.edu.tr

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda kompozitlerin ara yüzey bağını bozmadan nano düzeydeki katkı maddelerinin polimer matrisine eklenip, mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [6,7].

Nanopartiküller kompozit malzemelerde en çok kullanılan katkı maddelerindedir. Birçok araştırmacı farklı nanopartiküllerin kompozit malzeme özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu araştırmalarda kullanılan nanopartikülün çeşidi, oranı ve üretim yöntemleri gibi faktörlerin nano kompozitin özelliklerinin belirlenmesi hususunda etkili olduğu belirtilmiştir. Bağatır [8], grafen nanopartikül takviyesinin kompozit malzemelerin çekme mukavemetinde artış sağladığını tespit etmiştir. Shahbakhsh ve ark. [9], karbon fiber/epoksi kompozite farklı oranlarda CaCO_3 (kalsiyum karbonat) nanopartikülleri eklemiş ve çekme, eğilme ve basma gerilmelerinde sırasıyla, %14, %36 ve %30 oranlarında iyileşme meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Megahed ve ark. [10], farklı oranlardaki silika (SiO_2) ve karbon siyahı (C) nanopartikülleri kullanarak E-cam elyaf takviyeli kompozit üretmişler ve yaptıkları çalışmada nanopartiküllerin çekme özelliklerini, darbe mukavemeti ve yorulma performansını arttırdığını tespit etmişlerdir. Pol ve Liaghat [11], nanokil Closite 30B katkısının dokuma Cam/Epoksi laminat kompozitin çekme mukavemeti, tokluk, eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü arttırdığını tespit etmiştir. Chowdhury ve ark. [12], dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerde nanokil takviyesinin eğilme ve termal özelliklere etkisi üzerine yaptıkları çalışmada %2 oranında nanokilin eğilme ve termal özelliklerde en iyi artışı sağladığını tespit etmişlerdir. Peng ve Li. [13], Zirkonyum oksit (ZrO_2) nanoparçacıklarının hibrit takviyeli kompozitlerde çekme mukavemeti ve elastisite modülünü arttırdığı sonucuna varmışlardır. Liu ve ark. [14], karbon fiber/epoksi kompozitlere halloysit nanokil takviyesinin basma ve eğilme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Thakur ve ark. [15], silika, alümina, grafen ve tungsten karbür gibi farklı nanoparçacıkların kompozitin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini belli oranlarda iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Fiber takviyeli polimer kompozitlerde en çok kullanılan üretim yöntemlerinden birisi Vakum Destekli Reçine İnfüzyon yöntemidir. Bu yöntemde reçine önceden hazırlanmış olan kalıba vakumla hızlıca emdirilerek üretim yapılır. Yöntemin hızlı ve homojen, reçine içerisindeki boşluk oranının az olması ve büyük ebatlı parçaların üretilebilmesi kullanım alanını yaygınlaştırmıştır [16].

Bu çalışmada Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartikül katkısının cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine ve burkulma davranışına etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kompozit Plakaların Üretimi

Bu çalışmada saf, Al_2O_3 nanopartikül katkılı ve TiO_2 nanopartikül katkılı olmak üzere üç farklı kompozit plaka üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak metrekare ağırlığı 390 g/m^2 olan örgü E-cam elyaf kumaş kullanılmıştır. Polimer matris malzemesi olarak MGS L285 epoksi reçinesi ile H287 epoksi sertleştiricisi seçilmiştir. Her kompozit plaka için $500 \times 550 \text{ mm}$ ebatlarında 11 kat örgü cam elyaf kullanılmıştır. Matris malzemesi için 900 gr epoksi reçinesi hazırlanmıştır. Epoksi sertleştirici oranı ağırlıkça 100:40 olacak şekilde kullanılmıştır. Saf kompozit için herhangi bir ek işlem yapılmadan elyaf ile reçine bir araya getirilerek kompozit plaka hazırlanmıştır.

Al_2O_3 nanopartikül katkılı ve TiO_2 nanopartikül katkılı nanokompozit plakaların üretimi için Tablo 1’de belirtilen özelliklere sahip Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ve Titanyum Dioksit (TiO_2) nanopartikülleri nanografi’den temin edilmiştir. Al_2O_3 nanopartikül katkılı ve TiO_2 nanopartikül katkılı kompozit plakaların üretimi için 900 gr epoksi reçinesine göre %2 oranında (18 gr) partikül ilavesi yapılmıştır. Literatür taramasındaki veriler analiz edilerek en iyi sonuçların genellikle %2 oranında olduğu için bu oran seçilmiştir [1].

Tablo 1. *Titanyum Dioksit (TiO₂) ve Alüminyum Oksit (Al₂O₃) nano tozlarının teknik özellikleri*

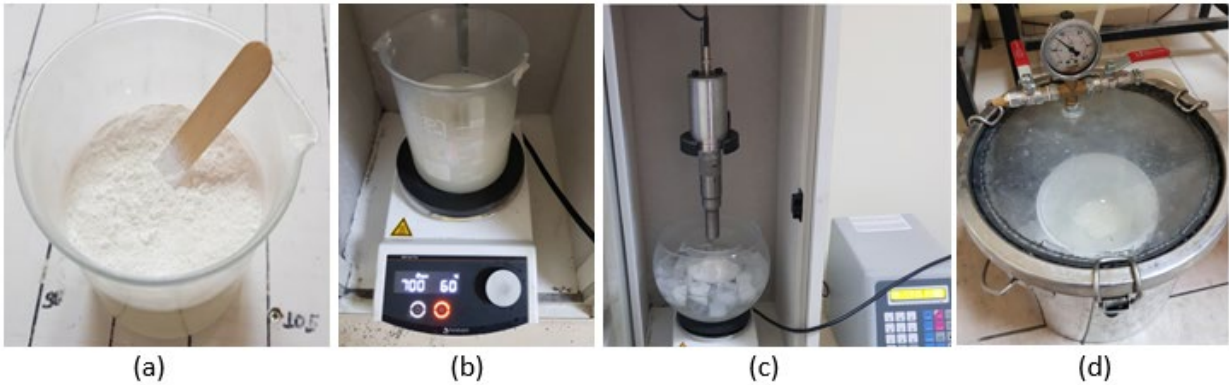
Teknik Özellikler	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Saflık	99.9	99.55
Renk	Beyaz	Beyaz
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	48	38
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	>30	35
Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	3,93	4,1

Nanopartikül katkı plakada kullanılacak reçineyi hazırlamak için öncelikle sertleştirici katılmadan saf halde epoksinin içerisine ağırlıkça %2 oranında nanopartikül eklenmiştir. Nanopartiküllerin içerisinde bulunan nemi uzaklaştırmak amacıyla 110 °C’de fırında 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra nanopartiküller reçine içerisine katılıp öncelikle el ile yaklaşık 10 dakika Şekil 1a’da görüldüğü gibi karıştırılmıştır.

Nanopartiküllerin reçine içerisine homojen bir şekilde karışımını sağlamak için manyetik ve ultrasonik karıştırıcılar kullanılmıştır. İlk olarak manyetik karıştırıcıda 1 saat boyunca 700 dev/dk hızla Şekil 1b’de görüldüğü gibi karıştırılmıştır.

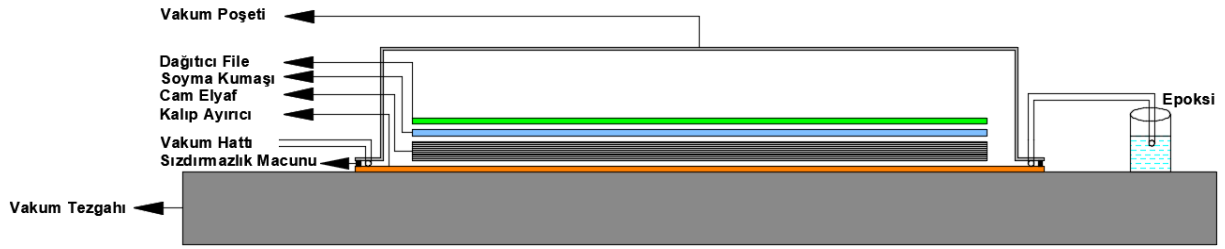
Manyetik karıştırıcıdan çıkarılan karışım hemen ultrasonik karıştırıcıya alınmıştır. Burada karışım, ultrasonik dalgalardan kaynaklı ısı artışından etkilenmemesi için Şekil 1c’de görüldüğü gibi buz banyosuna konulmuştur. Karışımın sıcaklığı 60 °C’yi aşmayacak şekilde buz banyosu miktarı ayarlanmıştır. Karışım ultrasonik karıştırıcıda %60 genlik değerinde, 2 saniye açık 3 saniye kapalı olacak şekilde 1 saat boyunca karıştırılmıştır [17].

Ultrasonik karıştırıcıdan çıkarılan karışımın içine sertleştirici eklenerek manuel olarak 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım içerisinde bulunan hava kabarcıklarından arındırmak için vakum gaz alma odasına konulmuştur. Bu odada yaklaşık 10 dakika Şekil 1d’de görüldüğü gibi bekletilmiştir.



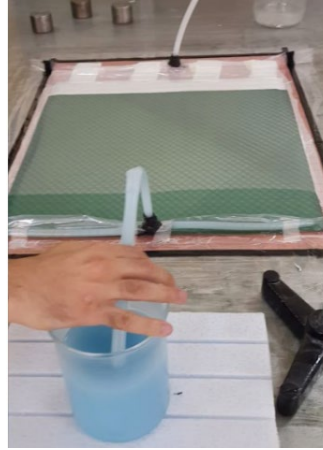
Şekil 1. a) Nanopartiküllerin reçineye manuel karıştırılması b) Nanopartikül katkı epoksinin manyetik karıştırıcıda karıştırılması c) Nanopartikül katkı epoksinin ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması d) Vakum gaz alma odasında epoksinin içerisindeki kabarcıkların giderilmesi

Kompozit plaka üretimi için Şekil 2’de gösterilen Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniğinin şematik gösterimi.

Şekil 3’de gösterildiği gibi hava kabarcıklarından arındırılan karışım vakum destekli reçine infüzyon yöntemi için hazırlanan tezgâha aktarılarak kompozit plaka üretim safhasına geçilmiştir.



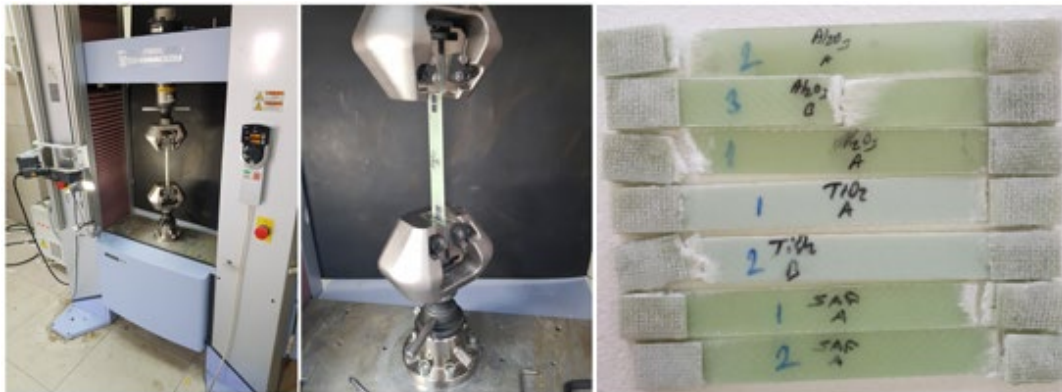
Şekil 3. Hazırlanan epoksinin VARTM yöntemiyle hazırlanan tezgâha aktarılması

Çalışma kapsamında 500x550 mm ebatlarında Saf, Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ve Titanyum Dioksit (TiO_2) nanopartikül katkılı üç farklı kompozit plaka 80 °C’de 15 saat kürlendikten sonra üretilmiştir. Her plakanın standartlara göre kesim işlemi CNC frezede gerçekleştirilmiştir.

2.2 Kompozit Plakaların Mekanik Deneyleri

2.2.1 Çekme Deneyi

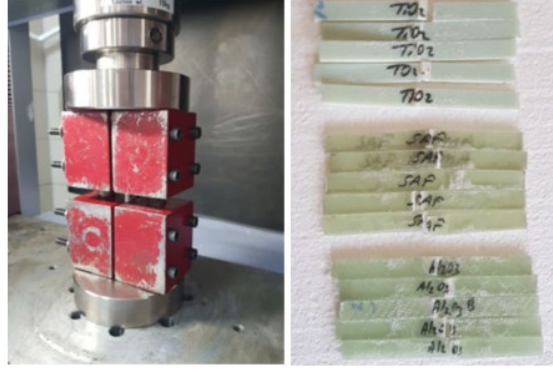
Çekme deneyi ASTM D3039 standardına göre hazırlanmış olup 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AGX Plus cihazında test hızı 2 mm/dk olarak Şekil 4’deki gibi gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlığı yaklaşık 3,2 mm olup, numuneler 250x20 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Testler oda sıcaklığında her bir parametre için beşer adet olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Çekme deneyi ve numunelerin deney sonrası görünümü

2.2.2 Basma Deneyi

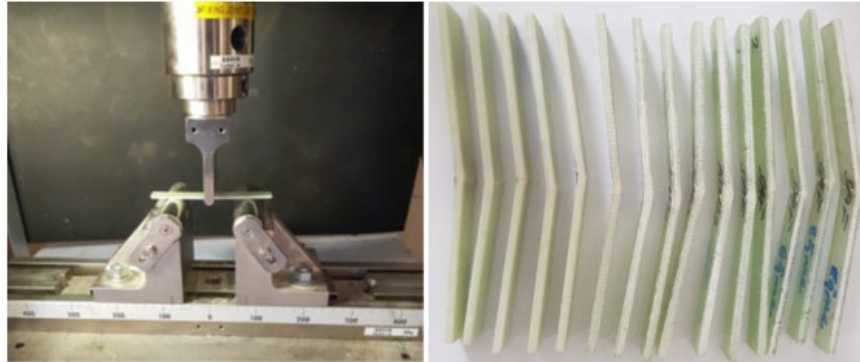
Basma deneyi ASTM D6641 standardına göre hazırlanmış olup 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AGX Plus cihazında test hızı 1.3 mm/dk olarak Şekil 5'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlığı yaklaşık 3,2 mm olup, numuneler 140x13 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Testler oda sıcaklığında her bir parametre için beşer adet olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Basma deneyi ve numunelerin deney sonrası görünümü

2.2.3 Eğilme Deneyi

Bu çalışmada üç nokta eğilme deneyi ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiş ve 100 kN yük kapasiteli Shimadzu AGX Plus cihazında test hızı 1 mm/dk olarak Şekil 6'daki gibi gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlığı yaklaşık 3,2 mm olup, numuneler 127x12,7 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Testler oda sıcaklığında her bir parametre için beşer adet olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Eğilme deneyi ve numunelerin deney sonrası görünümü

2.2.4 Darbe Deneyi

Darbe deneyi ISO 179-1 standardına göre Şekil 7'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlığı yaklaşık 3,2 mm olup, numuneler 80x10 mm ebatlarında çentiksiz olarak hazırlanmıştır. Test makinesindeki çekiç ağırlığı 2100 gramdır. Deneylerde her bir plakadan 5 adet test yapılmıştır.



Şekil 7. Darbe deneyi ve numunelerin deney sonrası görünümü

2.2.5 Burkulma Deneyi

Burkulma deneyi eksenel yük altında iki ucu ankastre olacak şekilde Shimadzu AGX Plus test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlığı yaklaşık 3,2 mm ve genişliği 20 mm ebatlarındadır. Burkulma boyu 140 mm ve test hızı 1 mm/dk'dır. Burkulma deneyi cihazdaki çenelere yerleştirildikten sonra alttaki çene sabit yukarıdaki çene eksenel olarak aşağı yönde kuvvet uygulayacak şekilde Şekil 8'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Burkulma testleri her bir kompozit türü için beşer adet yapılmış kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

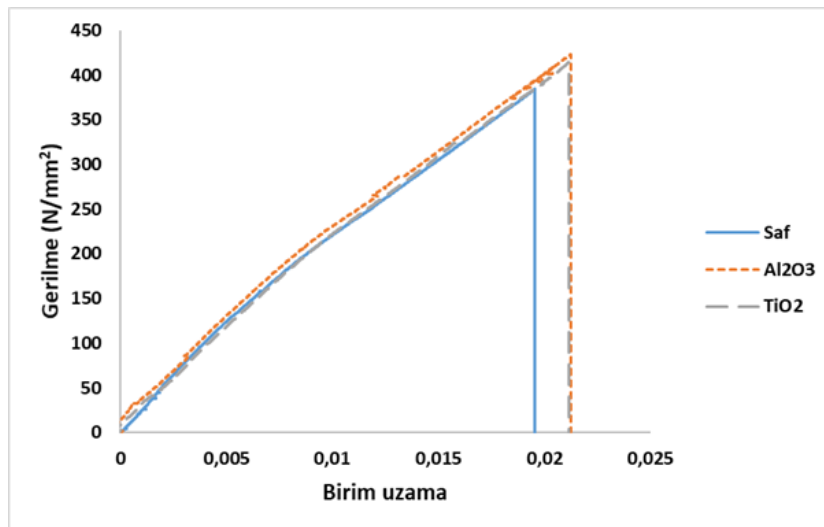


Şekil 8. Burkulma deneyi ve numunelerin deney sonrası görünümü

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi testinden elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Ayrıca gerilme sonuçlarının ortalamasını ve %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının çekme gerilmesine yüzdesel etkisini gösteren sonuçlar Tablo 2'de belirtilmiştir.



Şekil 9. Çekme deneyi gerilme – birim uzama grafiği

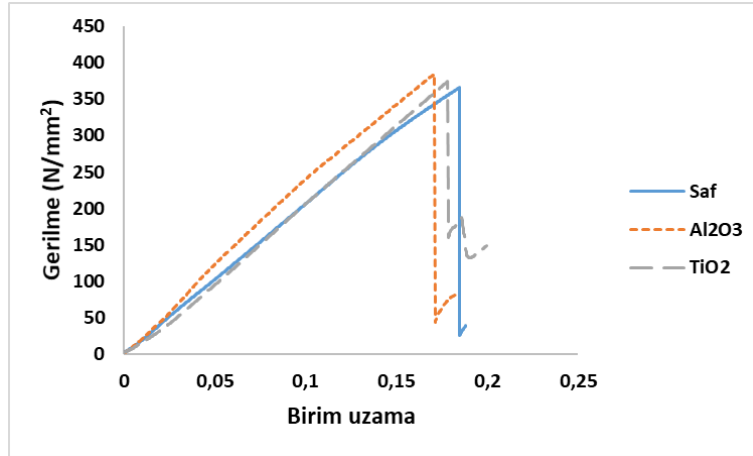
Tablo 2. Maksimum Çekme Gerilmesi Sonuçları ve Nanopartikülün Yüzdesel Etkisi

Örnekler	Gerilme (Mpa)	Artış (%)
Saf	403,21	-
%2 Al ₂ O ₃	421,29	4,48
%2 TiO ₂	415,09	2,95

Kompozitlerin çekme deneyi test sonuçları incelendiğinde, matris içerisine katılan nanopartikül ilavesinin cam elyaf epoksi kompozitlerin çekme gerilmesini olumlu olarak etkilediği görülmüştür. %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkıli kompozitlerde çekme mukavemeti sırasıyla %4,48 ve %2,95 oranında iyileşme sağlamıştır. Bunun nedeni, nanopartiküllerin matris ve fiber arasındaki ara yüzey bağlanma gücünü iyileştirmesidir. Nanopartikül katkısı, matristen takviye malzemeye daha iyi tutunma yüzeyi sağladığı için yüksek kuvvetlerin iletilmesini mümkün kılmaktadır. Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartikül takviyesinin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalarda bu partiküllerin mekanik özelliklerde iyileşme sağladığı tespit edilmiştir [18,19].

3.2. Basma Deneyi

Basma deneyi testinden elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrıca basma gerilmesi sonuçlarının ortalamasını ve %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının basma gerilmesine yüzdesel etkisini gösteren sonuçlar Tablo 3'de belirtilmiştir.

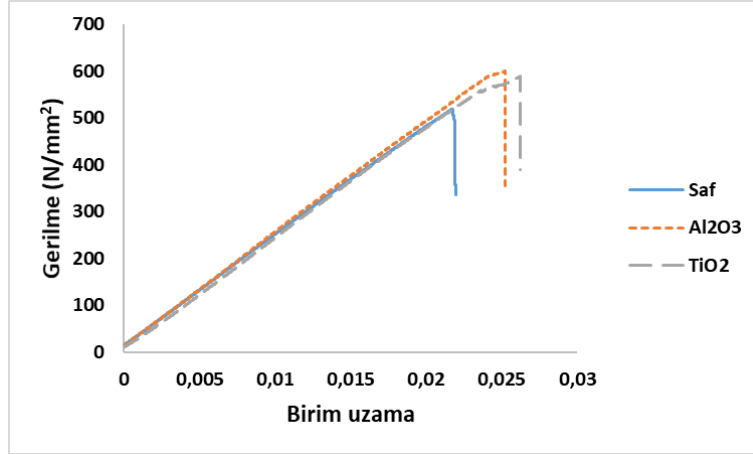
**Şekil 10.** Basma deneyi gerilme – birim uzama grafiği**Tablo 3.** Maksimum Basma Gerilmesi Sonuçları ve Nanopartikül Katkısının Yüzdesel Etkisi

Örnekler	Gerilme (Mpa)	Artış (%)
Saf	365,23	-
%2 Al ₂ O ₃	384,32	5,23
%2 TiO ₂	374,02	2,41

Basma deneyi test sonuçlarına göre, %2 oranında katılan nanopartikül katkısı kompozitlerin basma gerilme değerinin artmasını sağlamıştır. %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkıli kompozitlerde basma mukavemeti sırasıyla %5,23 ve %2,41 oranında iyileşme sağlamıştır. Kompozitlerin basma mukavemetini Al₂O₃ nano katkısının, TiO₂ nano katkısına göre daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür. Nanopartiküllerin mekanik özellikler ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalarda da iyileşme sağladığı tespit edilmiştir [17,20].

3.3. Eğilme Deneyi

Eğilme deneyi testinden elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Ayrıca eğilme gerilmesi sonuçlarının ortalamasını ve %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının eğilme gerilmesine yüzdesel etkisini gösteren sonuçlar Tablo 4'de belirtilmiştir.



Şekil 11. Eğilme deneyi gerilme – birim uzama grafiği

Tablo 4. Maksimum Eğilme Gerilmesi Sonuçları ve Nanopartikül Katkısının Yüzdesele Etkisi

Örnekler	Gerilme (Mpa)	Artış (%)
Saf	526,99	-
%2 Al ₂ O ₃	600,69	13,99
%2 TiO ₂	589,86	11,93

Eğilme deneyi testinden elde edilen bulgular, %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkısının eğilme gerilme değerinde iyileşme sağladığı ve bu iyileşme oranının çekme ve basma gerilmesinden daha fazla olduğu görülmüştür. %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkılı kompozitlerde eğilme mukavemeti sırasıyla %13,99 ve %11,93 oranında iyileşmiştir. Reçineye eklenen yüksek mukavemetli nano parçacıkların ara yüzey bağını daha iyi hale getirerek eğilmeye karşı direnci arttırdığı görülmüştür. Seshanandan ve ark. [21], ağırlıkça farklı oranlarda Al₂O₃ nanopartikülünün polimer kompozitlere etkisi üzerine yaptığı çalışmada çekme, eğilme ve kayma gerilmesini arttırdığını, Nallusamy [22], farklı oranlarda TiO₂ nanopartikül katkısının hibrit e-cam takviyeli kompozitlerde eğilme özelliklerini arttırdığını yaptıkları çalışmalarda tespit etmişlerdir.

3.4. Darbe Deneyi

Darbe deneyi testinden elde edilen darbe enerjisi sonuçları joule cinsinden olup tüm sonuçlar kJ/m² ye dönüştürülerek verilmiştir. %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının darbe mukavemetine yüzdesele etkisini gösteren sonuçlar Tablo 5’de belirtilmiştir.

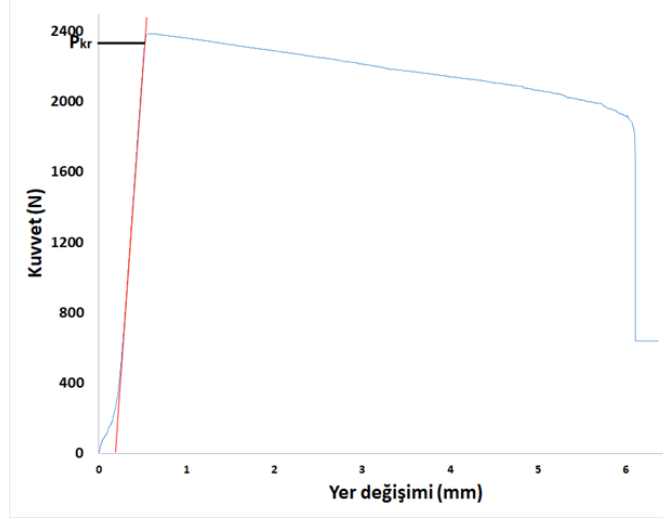
Tablo 5. Charpy Darbe Enerji Sonuçları ve Nanopartikül Katkısının Yüzdesele Etkisi

Örnekler	Darbe Enerjisi (kJ/m ²)	Artış (%)
Saf	144,16	-
%2 Al ₂ O ₃	169,34	17,47
%2 TiO ₂	164,13	13,85

Kompozitlerin Charpy darbe deneyi test sonuçları incelendiğinde, matris içerisine katılan nanopartikül ilavesinin cam elyaf epoksi kompozitlerin darbe enerjisi değerlerini olumlu olarak etkilediği görülmüştür. %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkısının darbe enerjisi değerlerini %17,47 ve %13,85 oranında iyileştirdiği tespit edilmiştir. Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartikül katkısının malzemelerin dinamik yük altında maksimum kırılma enerjilerini ve darbe anında absorbe edebileceği enerji miktarını arttırdığı görülmüştür. Reçineye eklenen nano parçacıkların darbe mukavemetini arttırdığı bilinmektedir [23].

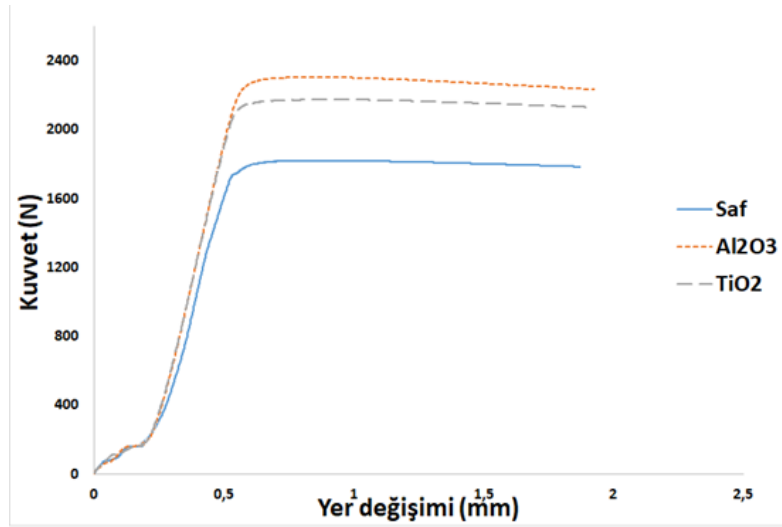
3.5. Burkulma Deneyi

Kritik burkulma yükü hesabında Southwell plot yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde kuvvet-yer değiştirme grafiğinin doğrusal kısmındaki eğriye teğet çizilmiş ve ayrılma noktası kritik yük olarak belirlenmiştir. Şekil 12’de kritik burkulma yükü hesaplama grafiği örneği gösterilmiştir.



Şekil 12. Kritik burkulma yükünün belirlenme yöntemi

Burkulma deneyi testinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri Şekil 13’de gösterilmiştir. Ayrıca kritik yük ortalamaları ve %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının kritik burkulma yüküne yüzdesel etkisini gösteren sonuçlar Tablo 6’da belirtilmiştir.

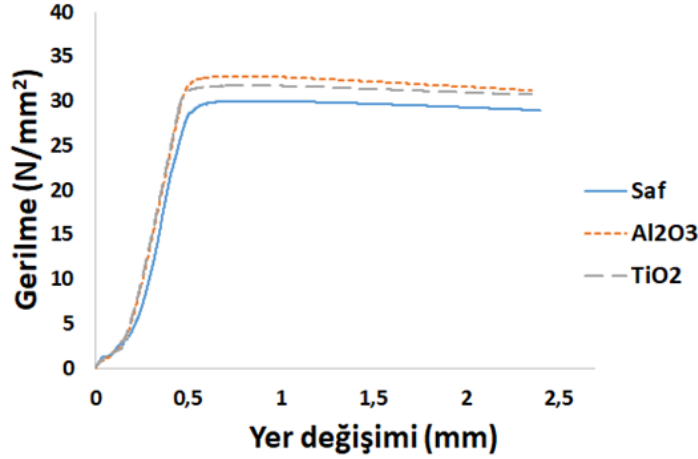


Şekil 13. Burkulma deneyi kuvvet - yer değiştirme grafiği

Tablo 6. Kritik Burkulma Yükü Sonuçları ve Nanopartikül Katkısının Yüzdesel Etkisi

Örnekler	Kritik Yük (N)	Artış (%)
Saf	1830	-
%2 Al ₂ O ₃	2313	26,39
%2 TiO ₂	2181	19,18

Burkulma deneyi testinden elde edilen kritik yük sonuçları kesit alanlarına bölünüp gerilme değerleri bulunmuş ve gerilme-yer değiştirme grafikleri Şekil 14’de gösterilmiştir. Ayrıca gerilme sonuçlarını ve %2 Al₂O₃ ile %2 TiO₂ nanopartikül katkısının burkulmadaki gerilmeye yüzdesel etkisini gösteren sonuçlar Tablo 7’de belirtilmiştir.



Şekil 14. Burkulma deneyi gerilme - yer değiştirme grafiği

Tablo 7. Kritik Burkulma Gerilmesi ve Nanopartikül Katkısının Yüzdesele Etkisi

Örnekler	Gerilme (Mpa)	Artış (%)
Saf	30,15	-
%2 Al ₂ O ₃	33,5	11,11
%2 TiO ₂	32,4	7,46

Kompozitlerin burkulma deneyi test sonuçları incelendiğinde, matris içerisine katılan nanopartikül ilavesinin cam elyaf epoksi kompozitlerin kritik burkulma yükü ve gerilme değerini arttırdığı görülmüştür. %2 Al₂O₃ ve %2 TiO₂ nanopartikül katkılı kompozitlerde kritik burkulma yükü sırasıyla %26,39 ve %19,18 oranlarında, gerilme değeri ise sırasıyla %11,11 ve %7,46 oranlarında iyileşme sağlamıştır. Kullanılan nanopartiküllerin ara yüzey bağını geliştirip daha iyi bir yük aktarımı sağladığı görülmüştür. Daha önceden yapılan çalışmalarda da farklı nano katkılarının belirli oranlarda kritik yükü arttırdığı bilinmektedir [24,25].

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilen cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit plakalara matris içerisine katılan ağırlıkça %2 oranında Al₂O₃ ve %2 oranında TiO₂ nanopartikül katkılarının çekme, basma, eğilme, darbe ve burkulma özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Saf, Al₂O₃ nanopartikül katkılı ve TiO₂ nanopartikül katkılı olmak üzere üç farklı kompozit plaka üretilmiş ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmaya ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Matris içerisine katılan %2 oranındaki Al₂O₃ ve %2 oranındaki TiO₂ nanopartikül katkısının saf kompozite göre; matrisle takviye elemanı arasında daha iyi ara yüz bağı oluşturduğundan çekme, basma ve eğilme gerilmelerini iyileştirdiği ve en fazla iyileşmenin gerçekleştiği deneyin eğilme deneyi olduğu tespit edilmiştir. Al₂O₃ nanopartikül katkılı kompozitin eğilme gerilmesini %13,99, TiO₂ nanopartikül katkılı kompozitin ise %11,93 oranında eğilme gerilmesini arttırdığı görülmüştür.
- Matris içerisine katılan %2 oranındaki Al₂O₃ ve %2 oranındaki TiO₂ nanopartikül katkısının saf kompozite göre; darbe enerji emilimini artırarak dinamik yük altında gerçekleştirilen Charpy darbe deneyinde darbe enerjilerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Darbe emilim enerjisini, Al₂O₃ nanopartikül katkısının %17,47, TiO₂ nanopartikül katkısının ise %13,85 oranında arttırdığı görülmüştür.
- Matris içerisine katılan %2 oranındaki Al₂O₃ ve %2 oranındaki TiO₂ nanopartikül katkısının saf kompozite göre; matristen takviye elemanına olan yük aktarımını iyileştirdiği için aksel burkulma özelliklerinin artmasını sağlamıştır.
- %2 oranındaki Al₂O₃ nanopartikül katkısının, %2 oranındaki TiO₂ nanopartikülüne göre tüm deneylerde daha fazla iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, %2 oranındaki Al_2O_3 ve %2 oranındaki TiO_2 nanopartikül katkısının cam elyaf takviyeli kompozitlerde çekme, basma, eğilme, darbe ve burkulma özelliklerini geliştirdiği görülmüş, yüksek mekanik ve burkulma özellikleri gerektiren cam elyaf takviyeli kompozit uygulamalarda saf kompozite göre daha iyi performans sergileyeceği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 19354 numaralı Proje ile desteklenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Demircan, M. Kısa, M. Özen, B. Aktaş, Surface-modified alumina nanoparticles-filled aramid fiber-reinforced epoxy nanocomposites: preparation and mechanical properties. *Iranian Polymer Journal*, 29:3 (2020) 253-264.
- [2] R. K. Nayak, B. C. Ray, Retention of mechanical and thermal properties of hydrothermal aged glass fiber-reinforced polymer nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57:16 (2018) 1676-1686.
- [3] M. Özen, G. Demircan, M. Kısa, Z. İlik, Investigation of usability of waste textile fabrics in composites. *Emerging Materials Research*, 9:1 (2019) 18-23.
- [4] R. K. Nayak, Influence of seawater aging on mechanical properties of nano- Al_2O_3 embedded glass fiber reinforced polymer nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 221 (2019) 12-19.
- [5] M. Özen, G. Demircan, M. Kısa, A. Açıkgöz, G. Ceyhan, Y. Işıker, Thermal properties of surface-modified nano- Al_2O_3 /kevlar fiber/epoxy composites. *Materials Chemistry and Physics*, 278 (2022) 125689.
- [6] K. K. Mahato, K. Dutta B. C. Ray, Assessment of mechanical, thermal and morphological behavior of nano- Al_2O_3 embedded glass fiber/epoxy composites at in-situ elevated temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 166 (2019) 688-700.
- [7] M. Joshi, U. Chatterjee, Polymer nanocomposite: an advanced material for aerospace applications. *Advanced composite materials for aerospace engineering*. Woodhead Publishing, 2016. 241-264.
- [8] T. Bağatır, Grafen nanopartikül takviyesinin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması. MS Thesis, Batman Üniversitesi, 2018.
- [9] S. Shahbakhsh, E. Tohidlou, H. Khosravi, Influence of modified carbonate calcium nanoparticles on the mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites. *The Journal of The Textile Institute* 111:4 (2020) 550-554.
- [10] M. Megahed, A. A. Megahed, M. A. Agwa, The influence of incorporation of silica and carbon nanoparticles on the mechanical properties of hybrid glass fiber reinforced epoxy. *Journal of Industrial Textiles* 49:2 (2019) 181-199.
- [11] M. H. Pol, G. H. Liaghat, Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles. *Polymer Composites*, 38:1 (2017) 205-212.

- [12] F. H. Chowdhury, M. V. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates. *Materials Science and Engineering: A*, 421.1-2 (2006) 298-306.
- [13] C. Peng, X. Li, The mechanical properties of PEEK/CF composites reinforced with ZrO₂ nanoparticles. *Mechanics of Composite Materials*, 49:6 (2014) 679-684.
- [14] F. Liu, S. Deng, J. Zhang, Mechanical properties of epoxy and its carbon fiber composites modified by nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2017 (2017).
- [15] A. S. Thakur, N. Sharma, S. Kango, S. Sharma, Effect of nanoparticles on epoxy based composites: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 44 (2021) 4640-4642.
- [16] M. ÖZEN, E-Cam/Epoksi kompozitlerde lif doğrultularının gerilme gevşeme davranışı üzerindeki etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29:1 (2017) 219-224.
- [17] G. Demircan, M. Kisa, M. Ozen, A. Acikgoz, Quasi-static penetration behavior of glass-fiber-reinforced epoxy nanocomposites. *Mechanics of Composite Materials*, 57:4 (2021) 503-516.
- [18] A. Fathy, A. Shaker, M. A. Hamid, A. A. Megahed, The effects of nano-silica/nano-alumina on fatigue behavior of glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 51:12 (2017): 1667-1679.
- [19] A. Kumar, A. Saha, S. Kumar, Structural analysis of sol-gel derived TiO₂ nanoparticles: a critical impact of TiO₂ nanoparticles on thermo-mechanical mechanism of glass fiber polymer composites. *Journal of Polymer Research*, 28:11 (2021) 1-16.
- [20] S. Thipperudrappa, A. U. Kini, A. Hiremath, An experimental study to evaluate the effect of TiO₂ nanoparticles on the strength and stability of unidirectional glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials Research Express*, 6:11 (2019): 115347.
- [21] G. Seshanandan, D. Ravindran, T. Sornakumar. Effect of nano aluminum oxide fillers on the properties of frp polymer matrix composites. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 787. Trans Tech Publications Ltd, 2015.
- [22] S. Nallusamy, Characterization of epoxy composites with TiO₂ additives and E-glass fibers as reinforcement agent. *Journal of Nano Research*. Trans Tech Publications Ltd, (2016) 99-104.
- [23] S. Thipperudrappa, A. Hiremath, B. N. Kurki, Synergistic effect of ZnO and TiO₂ nanoparticles on the thermal stability and mechanical properties of glass fiber-reinforced LY556 epoxy composites. *Polymer Composites* 42:9 (2021): 4831-4844.
- [24] Ö. Özbek, Axial and lateral buckling analysis of kevlar/epoxy fiber-reinforced composite laminates incorporating silica nanoparticles. *Polymer Composites*, 42:3 (2021) 1109-1122.
- [25] H. B. Mutu, Z. Aslan. Experimental investigation of buckling behavior of E-glass/epoxy laminated composite materials with multi-walled carbon nanotube under uniaxial compression load. *Journal of Composite Materials*, (2022): 00219983221098795.