

FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİNDE KULLANMAK ÜZERE MALZEME MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet KAYIRICI^a Hüseyin TURSUN^b Hüseyin ARIKAN^a Onur GÖK^a

^a Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Seydişehir ACMF, Konya, E-mail: mkayirici@erbakan.edu.tr, harikan@erbakan.edu.tr, ogok@erbakan.edu.tr

^b Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Seydişehir ACMF, Konya, E-mail: huseyintrsn@yandex.com

Abstract

Kompozit malzemeler genellikle ortotropik veya anizotropik davranış sergilemelerinden dolayı malzeme modellerinin oluşturulması oldukça zahmetlidir. Birden fazla farklı özellikte malzemenin bir araya gelerek yeni bir malzeme oluşturduğu durumlarda matris ve takviye malzemelerinin mekanik davranışları kadar, üretilen yeni malzemenin de çalışma koşulları dikkate alındığında uygulanan yükler altındaki davranışını mühendislik yaklaşımı ile tahmin edilmesi gerekmektedir. Yapısal mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan FEM ile kompozit malzemelerin statik, dinamik veya termal yüklemeler altında davranışını tespit edebilmek için gerekli parametreler göz önünde bulundurularak düşük bir hata payı ile yakınsanmış malzeme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

BU çalışmada, İki boyutlu ortogonal twill dokuma kumaştan oluşan laminantın elastik analizi için iki farklı kumaş modeli sunulmuştur. Bunlar Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ve Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi sistemleridir. Bu çalışmada Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi ve Darbe Testi yapılmıştır (ASTM D3039 / D3039M, 2019), (ASTM D 7264, 2019), (ASTM D 7136, 2019). Bu testlerle üretilen numunelerin farklı davranışları tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel değerler ANSYS 19.1 paket programında Sonlu Elemanlar Analizi ile elde edilen nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu Elemanlar Analizi ile malzeme özellikleri deney sonuçlarından malzemenin mekanik özelliğini tayin eden Elastikiyet Modülü, Possion Oranı ve Kayma Modülü Hook Kanununa göre hesaplanmış ve tek tek tespit edilmiştir. Burada sadece Üç Nokta Eğme deneyinde elde edilen deneysel sonuçlar ile ANSYS 19.1 programında modellenen Üç Nokta Eğme sistemi deneysel sonuçlara göre maksimum kuvvete karşılık gelen ilerleme miktarı olarak tanımlanarak eğme deneyi simüle edilmiştir.

Keywords: Ağırlık Düşürme Darbe Testi, Çekme Testi, Sonlu Elemanlar Analizi, Üç Nokta Eğme Testi, Malzeme Modelleme, Ortotropik Elastisite

1. Introduction

Literatürde teorik ve deneysel çalışmalar incelendiğinde kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonunda çekme, basma, eğme ve darbe testlerine, malzeme modellerinin oluşturulması ve sonlu elemanlar analizi ile simülasyon gibi konulara sıklıkla yer verildiği gözlemlenmiştir. Wonderly ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon elyaf/vinilester kompozit ve cam elyaf vinilester kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullandıkları malzemeleri vakum infüzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Enine – boyuna çekme ve basma testleri ile çentik ve balistik testler uygulayarak cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli vinilester numuneleri deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucu karbon elyaf kullanılan numunelerin çekme ve çentik test sonuçlarına göre üstün mekanik performans sergilediği ancak eşit kalınlıktaki cam fiberin de basma, balistik testler ve yorulma davranışlarında karbona göre daha üstün mekanik özellik gösterdiği gözlemlenmiştir (Cepus, Wonderly, Grenestedt, & Fernlund, 2005). İsveç'te bir grup araştırmacının 3 boyutlu (3D) yeni bir kumaş dokuma teknolojisiyle üretilen karbon elyaf kumaş ile sıklıkla kullanılan 2 boyutlu (2D) laminalar mekanik özellikleri açısından kıyaslanmıştır. Yapılan bu çalışmada, hazırlanan test numuneleri çekme, basma, düzlem dışı kayma ve eğilme testlerine maruz bırakıldıktan sonra sonuçlar incelendiğinde 3D dokuma ile hazırlanmış test numunelerinin geleneksel 2D laminalara göre düzlem içi özellikleri daha düşük fakat düzlem dışı özellikleri daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Stig & Hallström, 2009). Delik açılmış dokuma cam elyaf takviyeli kompozit bir plakanın numune genişliği/delik çapı oranı ve kenar mesafesi/delik çapı oranının dokuma lamine kompozitlerin dayanma gücü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak dokuma cam elyaf ile güçlendirilmiş epoksi laminaların pim bağlantılarına sahip nihai yük kapasitelerinin, genişlik ve kenar mesafesi arttıkça arttığını gözlemişlerdir (Okutan & Karakuzu, 2001). Bireysel zırh malzemesi olarak tasarlanan 4 farklı hibrit kompozit malzemenin balistik performanslarının incelendiği diğer bir çalışmada da farklı dokuma ve yön oryantasyonları ile Cam Elyaf-Aramid Elyaf-Karbon Elyaf takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Balistik testler uygulanan numunelerin performansları

değerlendirildiğinde kalınlığı fazla olan Karbon Elyaf(45°)-Aramid Elyaf (Düz Kumaş)- Cam Elyaf(45°) yerine Karbon Elyaf (Twill Kumaş)-Aramid Elyaf (Düz Kumaş)-Cam Elyaf (Twill Kumaş) konfigürasyonlu numunenin daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Twill dokuma yapısına sahip kumaşların balistik direncinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır (Yanen & Solmaz, 2016)

2. Kompozit Malzemelerin mekaniği

İzotropik malzeme her yönde aynı özelliklere sahiptir. Bir noktada sonsuz sayıda simetrik malzeme özelliği içerirler. Öte yandan, anizotropik malzeme, her yönde farklı özelliklere sahiptir. Dolayısıyla, simetrik malzeme özellik düzlemi yoktur (Mallick, 2007).

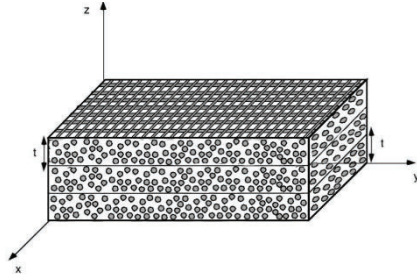
Elyaf takviyeli kompozitler genellikle üç yönde malzeme özellik simetrisi düzlemine sahiptir ve ortotropik malzemeler olarak sınıflandırılır.

2.1. Kompozit Laminatlarda Ortotropik Elastik Özelliklerin Hesaplanması

İzotropik malzemelerin elastik gerilme-şekil değiştirme özellikleri üç elastik sabit ile tanımlanmaktadır: Young elastikiyet modülü E ,

Poisson oranı ν ve kayma modülü, G .

İzotropik malzemeleri karakterize etmek için gereken bağımsız elastik sabitler iki tanedir. Bunlar; E ve ν . Ortotropik malzemeler için bu sabitler dokuz tanedir. Bunlar; E_x , E_y , E_z , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} , ν_{xy} , ν_{xz} ve ν_{yz} .



Şekil 2.1. Kumaş takviyeli laminantın temsili görünümü

Kumaş elyafli kompozitler ortotropik malzeme sınıfına girerler. Lif yönleri x ve y ve kalınlık yönünü ise z olarak düşünelim. Elastik özelliklerin x ve y yönünde eşit olduğu varsayılabilir. Elastisite modüllerinin hesaplanması;

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}, E_y = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y}, E_z = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z}$$

Burada kumaş takviye malzemesi kullanıldığından dolayı $E_x=E_y$ ve $E_z=E_m$ olur. Burada E_m matrisin elastikiyet modülüdür.

Poisson oranlarının hesaplanması;

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}, \nu_{yz} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_y}, \nu_{zy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}, \nu_{yz} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_y}, \nu_{zx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}, \nu_{xz} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

Kayma modüllerinin hesaplanması;

$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}}, G_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{xz}}, G_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{\gamma_{yz}}$$

Bu denklemlerden yola çıkarak üretilen malzemelerin ortotropik elastik özellikleri hesaplanmış ve Çizelge 2.1. de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Malzemelerin ortotropik elastik özellikleri

Malzeme	[g/m ²]	V_f [%]	$E_x=E_y$ [GPa]	E_z [GPa]	$\nu_{xz}=\nu_{yz}$	ν_{xy}	G_{xy} [GPa]	$G_{xz}=G_{yz}$ [GPa]
Cam Kumaş / Epoksi	300	25	17,9	3,5	0,35	0,2	3,7	1,3
Karbon Kumaş / Epoksi	245	29,2	35,6	3,5	0,35	0,1	4,7	1,3

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada cam ve karbon elyaf twill kumaş takviyeli epoksi üretimi yapılmıştır. Bu çalışmada en çok kabul gören ve üretim hacmi – ürün performansı değerlendirmelerinde geniş bir yere sahip olan vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemeler çekme, eğme ve darbe testlerine tabi tutulmaları için ASTM standartlarına uygun ölçülerde numuneler oluşturulmuştur. Numune kesme işlemi su jeti yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için cam ve karbon olmak üzere 10 deney numunesi, eğme testi için cam ve karbon olmak üzere 10 deney numunesi ve darbe testi için cam ve karbon olmak üzere 4 deney numunesi hazırlanmıştır.

Çizelge 2.2. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzeme	Özellikler	Değer	Açıklama
Propox Reçine	Yoğunluk	1,05 - 1,15 g/cm ³	
	Eğilme Gerilmesi	100 MPa	
	Elastikiyet Modülü	3,2 - 3,5 GPa	
	Çekme Gerilmesi	70 MPa	
	Basma Gerilmesi	100 MPa	
Karbon Elyaf	Parlama Noktası	180° C	
	Çözücü	7,0 iplik/cm	Dokuma Kumaş
	Atkı	7,0 iplik/cm	Karbon Elyaf 245
	Atkı-Çözücü Oranı	% 50 / % 50	gr/m ² TWILL 2/2
Cam Elyaf	Oryantasyon	0° - 90°	
	Çözücü	7,0 iplik/cm	Dokuma Kumaş
	Atkı	7,0 iplik/cm	Cam Elyaf 300
	Atkı-Çözücü Oranı	% 50 / % 50	gr/m ² TWILL 2/2
	Oryantasyon	0° - 90°	

3.1. Kompozit Malzeme Üretim Süreci

Kompozit malzemelerin üretiminde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. 0°/90° yönlü- iki eksenli cam ve karbon twill dokuma kumaşlar kullanılmıştır. 350 x 350 x 3 mm boyutlarında ve 250 x 250 x 3 mm boyutlarında 12 katmanlı olarak ikişer adet plaka üretilmiştir. Üretim sürecinde cam elyaf dokuma kumaş twill 0°/90° yönelimli ile karbon elyaf dokuma kumaş twill 0°/90° takviye elemanı olarak, Propox epoxy reçine

kullanılmıştır. Dokuma kumaş takviye elemanları (Cam/Karbon) 12 katlı olacak şekilde üst üste dizilir. Vakum torbasına konmadan önce vakum torbasından çıkarılmasını kolaylaştıracak ve reçinenin takviye elemanı elyafı nüfuzunu kolaylaştıracak alt ve üst yüzeye fileli kumaş yerleştirilir. Oluşturulan yarı mamul vakum torbasına yerleştirilir. Vakum İnfüzyon yönteminde kullanılan vakum pompası ile reçine takviye elemanlarına nüfuz ettirilir. Kırılma işlemi için numune oda sıcaklığında 24 saat post kırılma ve 7 gün nihai stabilizasyon işlemi ile yapılmıştır. Sonrasında kompozit malzemelerden fileli kumaşlar temizlenir. Üretilen cam elyaf/epoksi ve karbon/epoksi kompozit plakaların mekanik özellikleri bulunmuştur. İlk olarak kompozit plakaların imalatından önce elyaf malzemesi olarak kullanılan cam ve karbon elyaflar tartılmıştır. Matris malzemesinin ağırlığı, imalatı yapılan kompozit plakaların toplam ağırlığından elyaf malzemesinin ağırlığı çıkartılarak hesaplanmıştır.

Numune Boyutları

Test Tipi	Test Standart	Numune Eni [w, mm]	Numune Boyu [L, mm]	Numune Kalınlığı [h, mm]
Çekme Testi	ASTM D3039	25	250	3
Üç Nokta Eğme Testi	ASTM D7264	12,7	125	3
Darbe Testi	ASTM D7136	150	150	3

3.2. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyleri, ASTM 7264 standardına göre, Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG- IS (100 kN) deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.. Testler 2 mm/dk deney hızında gerçekleştirilmiştir. Standartta belirtildiği üzere kalınlık / span genişliği oranı 1:32 olarak seçilmiştir. 3 mm numune kalınlığı için span genişliği 96 mm olarak hesaplanır. Yük radiusu (R0) 5 mm, destek radiusu (R1, R2) 15 mm alınmıştır. Bu deney cam elyaf twill kumaş / epoksi ve karbon elyaf twill kumaş / epoksiden oluşan 5'er adet test numunesi toplamda 10 test numunesi için gerçekleştirilmiştir.

3.3. ANSYS Yazılımı ile Sonlu Elemanlar Analizi

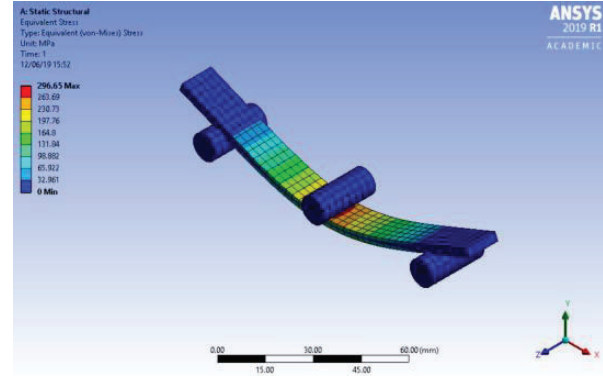
Sonlu elemanlar metodunu temel alan birçok ticari paket program mevcuttur. Bu çalışmada deneysel verilerle malzeme modelleri ANSYS 19.1 sonlu elemanlar paket programında tanımlanacak karşılaştırma yapmak için bir eğme deneyi modellenip analiz koşuturulacaktır. En temel haliyle ANSYS 19.1'de problem tanımlamanın adımlarını sıralayacak olursak,

- Malzeme Tanımlama
- 3D Model Oluşturma
- Mesh Oluşturma
- Sınır Şartlarının Tanımlanması
- Problem Çözümü
- Sonuçlar

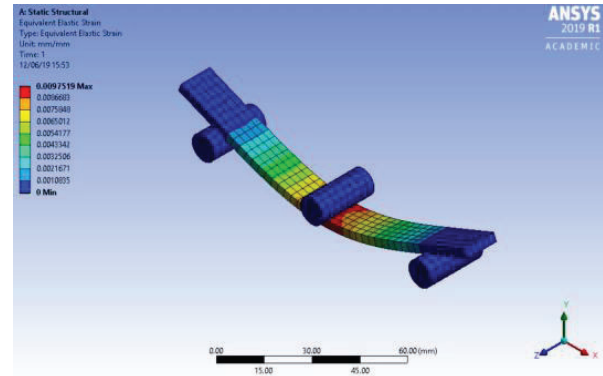
3.4. Karbon Elyaf-Epoksi için Gerileme ve Birim Şekil Değiştirme Sonuçları

Karbon Elyaf Kumaş-Epoksi gerilme sonucu Şekil 7.24'de verilmiştir. Üç nokta eğme deney sistemi göz önüne alındığında numunenin alt ve üst katmanlarda

maksimum zorlanmaya maruz kalması üst katmanda basma, alt katmanda ise çekme gerilmelerinin maksimum oluşması deneysel çalışma sonrasında hasar bölgesinin buralarda oluşması yapılmış olan simülasyonu doğrular niteliktedir. Destek kısımlarında da yine deney sisteminde olduğu gibi herhangi bir kuvvete maruz kalmamış ve gerilme oluşmamıştır. Üç nokta eğme sistemi ile Karbon Elyaf Kumaş-Epoksi numune için Şekil 4.1 de verilen maksimum gerilme değeri 296,6 MPa olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1. Karbon elyaf/epoksi için von-Mises gerilme sonucu

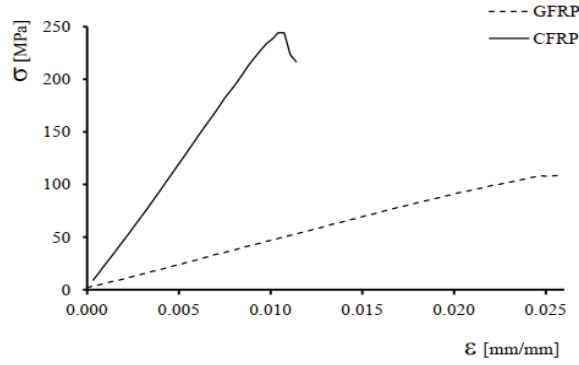


Şekil 3.2. Karbon elyaf/epoksi için şekil değiştirme sonucu

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

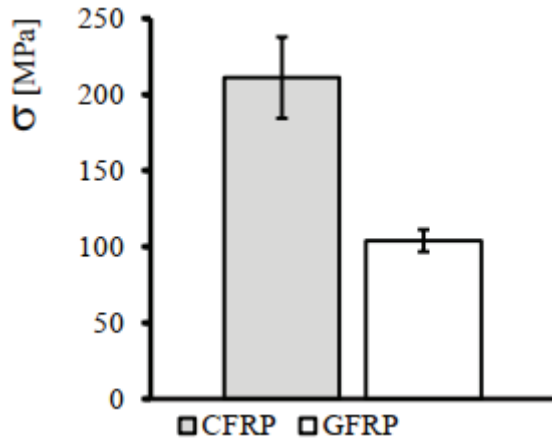
4.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen 5'er adet üç nokta eğme deney numunelerinin ortalamalarından elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değiştirme grafikleri Şekil 4.1.'de paylaşılmıştır.



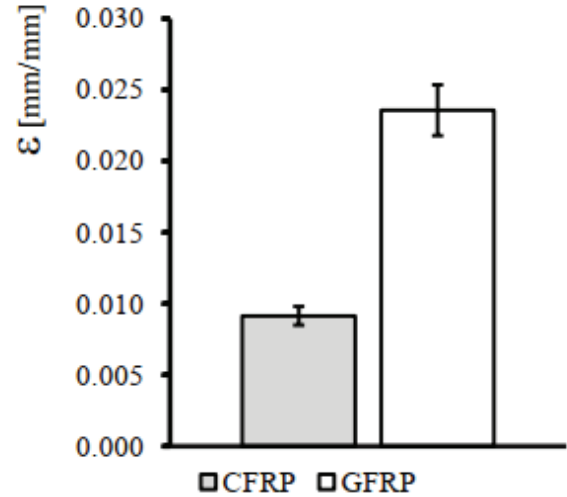
Şekil 4.1. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama eğme gerilmesi 108 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama gerilme 244 MPa oluşmuştur. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değiştirme değeri Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi 0,025 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değiştirme değeri Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 0,01 mm/mm 'dir.



Şekil 4.2.. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme Grafiği

Şekil 4.2.'de de görüldüğü gibi Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama eğme gerilmesi 108 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama gerilme 244 MPa oluşmuştur.



Şekil 4.3. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Şekil 4.3.'de de görüldüğü gibi Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde birim şekil değiştirme değeri 0,024 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde birim şekil değiştirme değeri 0,009 mm/mm olarak bulunmuştur. Grafikler incelendiğinde CFRP numunelerin GFRP numunelere göre daha yüksek eğme dayanımına sahipken birim şekil değiştirme grafikleri göz önüne alındığında CFRP numunelerin daha az birim şekil değiştirme değerlerini aldığını görüyoruz.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tekstil tipi kompozit malzemeler olan cam ve karbon elyaf kumaştan epoksi reçine ile imal edilen 12 tabakalı kompozit laminatın mekanik özellikleri incelenmiştir ve malzeme sabitleri tespit edilerek sonlu elemanlar metodu ile sadece üç nokta eğme deney sistemine göre deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

ASTM standartlarına göre hazırlanan cam ve karbon elyaf/epoksi eğme numunelerinin su jeti ile kesilmiş kenar kesitleri incelendiğinde çözgü ve atkı ipliklerinin kırıldığı alanlarda maksimum 5-7° lik çözgü sıklığına bağlı olarak yönelme farkları gözlemlenmiştir. Bu farklardan oluşan kayma gerilmesi etkisiyle gerek çekme numunelerinin gerekse eğilme numunelerinde çekme gerilmesinin maksimum olduğu bölgede daha kolay hasar başlangıcı gözlemlenmiştir. Bu da eğme bölgesindeki mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmüştür.

- Her iki numunede de eğme deneyinin özelliği olarak hasar başlangıcı çekme gerilmesinin maksimum olduğu en dış tabakada gerçekleşmiş ve her iki numune tipinde de delaminasyon gözlemlenmiştir.
- Atkı ve çözgü yönünde Elastikiyet Modülü yaklaşık eşit olarak bulunmuştur. 3. yönünde ise matris

malzeme Elastikiyet Modülü bulunmuştur.
- Hacimsel elyaf konsatrasyonu Cam elyaf / Epoksi için %25, Karbon elyaf için %29,2 olarak hesaplanmıştır. Daha kesin sonuçlar için ASTM 3171'e göre yakma ve nitrik asit ile çözme yoluyla yapılabilir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmayı 181331003. nolu proje ile destekleyen Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederler.

References

ASTM D3039/D3039M, A. S. for T. and M. (2017). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Tarihinde adresinden erişildi www.astm.org

ASTM D7136/D7136M, A. S. for T. and M. (2015). Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. <https://doi.org/10.1520/D7136>

ASTM D7264/D7264M, A. S. for T. and M. (2015). Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

Cepus, E., Wonderly, C., Grenestedt, J., & Fernlund, G. (2005). Comparison of mechanical properties of glass fiber / vinyl ester and carbon fiber / vinyl ester composites. 36, 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.01.004>

Stig, F., & Hallström, S. (2009). Assessment of the mechanical properties of a new 3D woven fibre composite material. Composites Science and Technology, 69(11–12), 1686–1692. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2008.04.047>

Okutan, B., & Karakuzu, R. (2001). A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate. 61, 1491–1497.

Yanen, C., & Solmaz, M. Y. (2016). Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2016(2), 351–362. www.tubiad.org

Mallick, P. K. (2007). Fibre-reinforced composites: materials, manufacturing and design. Composites (C. 20). [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(89\)90651-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(89)90651-4)