



RTM ile üretilen iki-yönlü cam-dokuma takviyeli kompozit levhalarda cam-keçe kullanımının mekanik anizotropi üzerine etkisi

Effects of glass-mat on mechanical anisotropy in bidirectional e-glass woven roving reinforced composite sheets produced by RTM method

Raif SAKİN^{1*}

¹Makine ve Metal Teknolojileri, Edremit Meslek Yüksekokulu, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.
rsakin@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 02.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 01.02.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.55631
Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Bu çalışmada, Reçine Transfer Kalıplama (RTM) ile imal edilen iki-yönlü cam-dokuma takviyeli kompozit levhalarda cam-keçe kullanımının mekanik anizotropi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, bilgisayar kontrollü laboratuvar ölçekli Reçine Transfer Kalıplama (RTM) prosesi kurulmuştur. Ayrıca, tam kapalı, vakum destekli ve ısı kontrollü olarak tasarlanan RTM kalıbının alt ve üst yüzeylerinde parlatılmış paslanmaz çelik saclar kullanılarak iki yüzü düzgün kompozit levhalar üretilmiştir. Çalışmada RTM'ye uygun Polipol-336 polyester reçinesini kullanılmıştır. Kompozit levha imalatı için 800-500-300-200 g/m² 'lik iki-yönlü cam-dokumalar arasında 450-225 g/m² 'lik cam-keçeler yerleştirilmiştir. RTM prosesi sonunda kalıptan %38,1 - %48,0 fiber hacimli, 6-15 tabakalık farklı kombinasyonlarda ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kompozit levhalar elde edilmiştir. Bu kompozit levhaların çekme ve eğilme mukavemeti gibi temel mekanik özellikleri test edilmiştir. Deneyler sonucunda, özellikle depolama tankları, deniz araçları ve yapı endüstrisi gibi sektörlerde kullanılan büyük ölçekli tabakalı kompozit levhalarda cam-dokumalar arasında cam-keçe takviyesinin mekanik anizotropi üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca maliyet açısından da değerlendirme yapılmış ve optimum kompozit levha maliyeti için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: İki-yönlü, Cam-dokuma, Rasgele Cam-keçe, Mekanik anizotropi, Kompozit levha, RTM metodu

1 Giriş

Cam dokuma tipi fiber takviyeler, E-camı elyafından tek uçlu fiberlerin dokunması ile elde edilen iki-yönlü düz kumaşlardır. Cam dokumalar, kalıba çok kolay yatma, çabuk ıslanma, düşük reçine tüketimi ve özellikle 0°/90° fiber yönlerinde yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahip, silan esaslı bağlayıcı ile kaplanmış olup doymamış polyester, vinilester ve epoksi reçine ile uyumludur. Cam dokumalar, depolama tankları, yatlar, gemiler, otomobil parçaları, mobilya ve spor aletleri gibi ürünlerin el-yatırması, kalıplama ve mekanize yöntemlerinde çok sık kullanılır.

Mat keçe, cam fiberlerin kırılarak rastgele yönlerde serilmesi ve uygun bir bağlayıcı veya dikiş yardımıyla bir araya getirilmesi ile oluşur. Kırılmış mat keçelerin uygulamada önemli avantajları vardır [1],[2]:

- Dokuma kumaşa göre birim kalınlık ve ağırlığa göre daha düşük maliyetlidir,
- Bütün yönlerde eşit fiziksel özellikli homojen malzemedir,

Abstract

In this study, it was investigated that the effects of glass-mat on mechanical anisotropy in bidirectional e-glass woven roving reinforced composite sheets produced by RTM method. Resin Transfer Molding (RTM) process with a computer-controlled laboratory-scale was established for this purpose. In addition, the RTM mold was designed as fully closed, a temperature-controlled and the vacuum-assisted. Two sides smooth plates were manufactured utilizing polished stainless steel plates on the top and bottom surfaces of the RTM mold. The resin suitable to RTM is unsaturated polyester called Polipol-336. To obtain composite sheets, the glass-mats with areal weights of 450 and 225 g/m² were placed between the glass-woven rovings with areal weights of 800-500-300-200 g/m². At the end of the RTM process, it was obtained composite sheets which have different combinations of fabrics with 6-15 plies and approximately 3mm sheet thickness at a fiber volume fraction of 38,1% - 48,0%. Then, basic mechanical properties such as tensile and flexural strength of the composite sheets was tested. As a result of tests, the glass-mats placed between the glass-woven rovings provided a very positive effect on the mechanical anisotropy. Particularly, this positive effect is very important in the industries such as storage tanks, marines and the building constructions used large-scale laminated composite sheets. Also an assessment made on the cost and it was made recommendations for optimal cost of composite laminates.

Keywords: Bidirectional glass-woven roving, Glass-mat, Mechanical anisotropy, Composite sheet, RTM method

- Fiberlerin birbiri içine geçen aksiyonları sebebiyle tabakalar arası iyi bir bağ vardır,
- Dokuma kumaşa göre daha kompleks yüzeyler içine de kalıplanabilir,
- Cam fiberler ile reçine arasında hızlı geçirgenlik ve kolay ıslanma özelliği vardır.

Bu önemli özelliklerinden dolayı cam-keçe takviyeli kompozit levhalar, büyük ölçekli parçaların üretiminde hızlı bir şekilde metalik levhaların yerini almaktadır. Bu levhalar otomotiv, mobilya ve yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3]. Son yıllarda, bazı özel ürünler için cam-dokuma ve cam-keçe kombinasyonları geliştirilmiştir. Birçok el-yatırması (lay-up) prosesinde fiberglas levha, keçe ve dokumanın kullanıldığı birçok alternatif katmandan oluşabilir. Bu nedenle fiberglas üreticileri bu proseslerle daha verimli ürünler elde etmeye başlamışlardır [4]. Cam-dokuma ve cam-keçe kombinasyonları, tekneler, yüzme havuzları, borular, eğlence araçları, paneller, profiller, depolama tankları, vb. gibi geniş, çok amaçlı ve uygun bir uygulama yelpazesine sahiptir. Cam-dokuma ve cam-keçe kombinasyonları özellikle marina uygulamaları için çok uygundur. Karbon ve özellikle cam

dokuma kumaş-mat (keçe) kombinasyonları genellikle 4.76-12.7 mm kalınlığında, tekne gövde yapılarında sıkça kullanılmaktadır [5]. Cam-dokuma ve cam-keçe kullanımı ile elde edilen kompozit levhaların yukarıda bahsedilen önemli avantajlarına rağmen konstrüksiyonda dikkate alınması gereken bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi, GFRP kompozit levhaların doğası gereği heterojen ve anizotropik olmasıdır. Cam fiber takviyeli (GFRP) levhalar kullanılarak yapılan yapısal tasarımlar, GFRP levhanın laminasyon tasarımı ile de doğrudan ilgilidir. Özellikle tabakalı olarak sıkıştırılmış, sandviç veya farklı fiber kombinasyonları ile elde edilen hibrit kompozit levha konstrüksiyonlardaki ana problemlerden biri olan mekanik anizotropinin dengelenmesi yapısal tasarımlarda hayati önemlidir. Bu çalışmada cam-keçe ve cam-dokuma kullanılarak elde edilen tabakalı GFRP kompozit levhaların maksimum "mekanik anizotropi" değerlerinin dengelenmesi ve düşürülmesi ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlar kıyaslamalı olarak verilmiştir. Literatürde, cam fiber kompozitlerde fiber oryantasyonunun mekanik davranışlara etkisi [6], fiber oryantasyon fonksiyonu veya faktörü [7]-[9] ve fiber oryantasyonunun veya mekanik anizotropinin çekme dayanımı ve elastisite modülüne etkisi [10] ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların bazılarında, fiberlerin $\pm 45^\circ$ yönde bulunduğu dayanım değerinin minimum hatta matrisin kendi dayanımı olarak bile kabul edilebileceği ifade edilmektedir [4]. Bu durumda, özellikle cam-dokuma kullanılan levhalardaki maksimum mekanik anizotropi oranı; $0^\circ/90^\circ$ yöndeki dayanım değerlerinin $\pm 45^\circ$ yöndeki dayanım değerlerine oranı ile ifade edilebilir.

Aşağıdaki literatürde, farklı tabaka kombinasyonları ile imal edilen kompozit levhaların bazı mekanik özellikleri ve mekanik anizotropi ile ilgili çalışmalar vardır;

Tek yönlü E-camı dokuma fitil / cam-mat kombinasyonları ve epoksi reçine [11].

Tek yönlü karbon kumaş (200 g/m^2), iki eksenli karbon kumaş (400 g/m^2) ve polyester reçine [12].

İki yönlü E-cam dokuma fitil (360 g/m^2) ve epoksi reçine [13].

Çift yönlü E-cam elyaf, doğranmış E-cam lifi ve epoksi reçine [14].

Çift yönlü cam dokuma kumaş (238 g/m^2) ve epoksi reçine [15].

Çift yönlü cam dokuma kumaş (850 g/m^2) ve epoksi reçine [16].

E-cam kıyılmış elyaf keçe (450 g/m^2) / düz örgü keçe (631 g/m^2) kombinasyonları ve epoksi [17].

İki yönlü E-cam dokuma fitil / cam-mat kombinasyonları [18], [19].

İki yönlü karbon-dokuma (200 g/m^2) / bazalt (210 g/m^2) kumaş ile hibrit kombinasyonlar ve epoksi [20].

İki yönlü cam-dokuma (300 g/m^2) / cam-keçe (450 g/m^2) / köpük ile sandviç kombinasyonlar ve epoksi [21].

Ancak, cam-keçenin mekanik anizotropiye etkisi ile ilgili literatürdeki çalışmalar oldukça azdır. Bu nedenle, bu çalışmada, RTM yöntemi ile farklı yapısal kombinasyonlarda üretilen cam-dokuma ağırlıklı kompozit levhalarda özellikle cam-keçe takviyesinin mekanik anizotropiye etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

2 Malzeme ve metot

2.1 Numune hazırlama

Bu çalışmada kullanılan cam-dokuma ve cam-keçe tipleri Şekil 1'de, elde edilen kompozit levhaların özellikleri ve diğer bileşenler ise Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen dört farklı cam-dokuma ve iki farklı ağırlıktaki cam-keçe fiberler kalıp boşluğuna Tablo-2'de görülen iki farklı kombinasyon grubu ve dokuz farklı istifleme dizisiyle yerleştirilmiştir. Böylece, vakum destekli RTM yöntemi kullanılarak $500 \times 500 \times 3$ mm boyutlarında Tablo-3'te detayları verilen 6-15 tabakalı ve %38.1-%48 arası fiber hacim oranına sahip kompozit levhalar elde edilmiştir. RTM prosesinde kullanılan sabit ve değişken parametreler ise Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 2(a) ve (b)'de cam-dokuma ve cam-keçe fiberlerin farklı kombinasyonlardaki istifleme şekli, Şekil 2(c)'de ise kompozit levhalardan $0^\circ/90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ yönlerde kesilerek elde edilen deney numunelerinin fiber oryantasyonu görülmektedir.

Tablo 1: GFRP kompozit levha bileşenleri ve özellikleri.

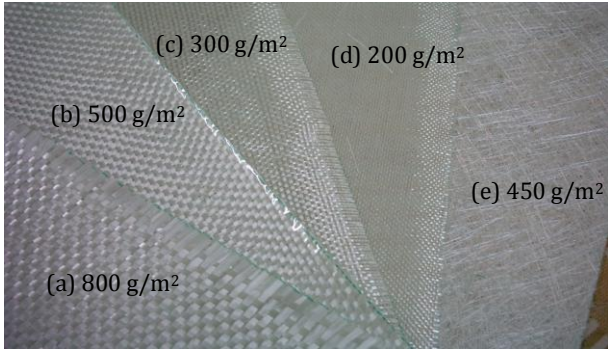
| Matris | Fiber |
|--|--|
| Orthophthalic polyester reçine ^a | E-Camı Dokuma ^{b,c} |
| Polipol™ 336, $\rho=1.094 \text{ g/cm}^3$ | $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ |
| Sertlik=44 (Barcol 934-1) | Ağırlıklar=800-500-300-200 g/m^2 |
| Eğilme Dayanımı=113 MPa | E-Camı Keçe ^{b,c} |
| Eğilme E-Modülü=3110 MPa | $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ |
| Çekme Dayanımı=64 MPa | Ağırlıklar=225-450 g/m^2 |
| Elastisite Modülü=2801 MPa | Tipik Çap=12-17 μm |
| Kopma Uzaması=%4.3 (Eğilme) | Çekme Dayanımı=2306 MPa |
| Kopma Uzaması=%2.8 (Çekme) | Elastisite Modülü=72.4-81.5 GPa |
| Poisson Oranı=0,36 | Poisson Oranı=0.22 |
| Viskozite=300 Cp | Nihai Uzama=%2,97 |
| Sertleştirici | Hızlandırıcı |
| Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP ^a) (matris hacminin %0.5) | Cobalt Naphthenate ^a (matris hacminin %0.1) |

^a Poliya A.Ş., ^b Cam Elyaf A.Ş., ^c Fibroteks A.Ş. (Türkiye'de)

Tablo 2: Cam-dokuma, cam-keçe kombinasyonları ve istifleme dizileri.

| Kombinasyon Grubu | İstifleme Dizisi ve Sırası | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | WR1 | | WR2 | | WR3 | | WR4 | | WR5 | |
| WR/WR | 1 | #800 | 1 | #500 | 1 | #500 | 1 | #200 | 1 | #500 |
| | 2 | #200 | 2 | #300 | 2 | #500 | 2 | #300 | 2 | #300 |
| | 3 | #800 | 3 | #300 | 3 | #300 | 3 | #500 | 3 | #200 |
| | 4 | #200 | 4 | #800 | 4 | #200 | 4 | #300 | 4 | #300 |
| | 5 | #800 | 5 | #300 | 5 | #200 | 5 | #500 | 5 | #200 |
| | 6 | #200 | 6 | #300 | 6 | #300 | 6 | #200 | 6 | #300 |
| WR/MAT | 7 | #800 | 7 | #300 | 7 | #500 | 7 | #500 | 7 | #200 |
| | 8 | #200 | 8 | #500 | 8 | #500 | 8 | #300 | 8 | #300 |
| | 9 | #800 | 9 | #225 | 9 | *450 | 9 | *225 | 9 | *225 |
| | 10 | #225 | 10 | *450 | 10 | #300 | 10 | #200 | 10 | #200 |
| | 11 | #800 | 11 | *225 | 11 | *225 | 11 | *225 | 11 | *225 |
| | 12 | #225 | 12 | #500 | 12 | *225 | 12 | #200 | 12 | #200 |
| | 13 | #800 | 13 | *225 | 13 | #300 | 13 | *225 | 13 | *225 |
| | 14 | #225 | 14 | #500 | 14 | *225 | 14 | #200 | 14 | #200 |
| | 15 | #800 | 15 | *225 | 15 | *450 | 15 | *225 | 15 | *225 |

* sembolü cam-keçeyi, # sembolü ise cam-dokumayı gösterir



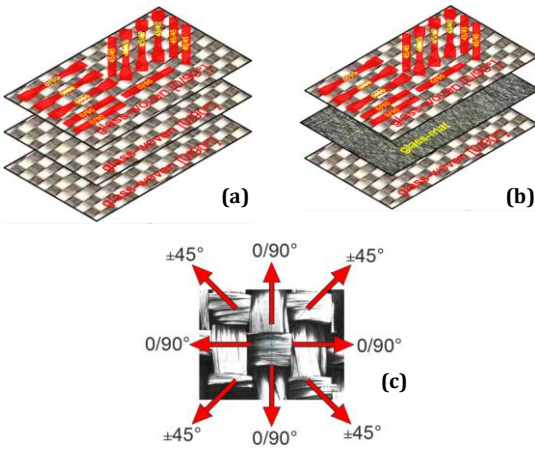
Şekil 1: Kullanılan cam elyaf tipleri; (a), (b), (c) ve (d): Cam-dokuma, (e): Cam-keçe.

Tablo 3: Numune kombinasyonu, tabaka sayısı ve fiber hacimleri.

| Kombinasyon Grubu | Numune Gösterim | Cam-Keçe | Cam-Dokuma | Tabaka Sayısı | Fiber Hacmi (%V _f) |
|-------------------|-----------------|----------|------------|---------------|--------------------------------|
| WR/WR | WR1 | Hayır | Evet | 6 | 48.0 |
| | WR2 | Hayır | Evet | 7 | 42.4 |
| | WR3 | Hayır | Evet | 8 | 40.7 |
| | WR4 | Hayır | Evet | 9 | 42.5 |
| | WR5 | Hayır | Evet | 10 | 41.0 |
| WR/MAT | MAT1 | Evet | Evet | 7 | 41.4 |
| | MAT2 | Evet | Evet | 9 | 42.0 |
| | MAT3 | Evet | Evet | 11 | 40.1 |
| | MAT4 | Evet | Evet | 15 | 38.1 |

Tablo 4: RTM parametreleri.

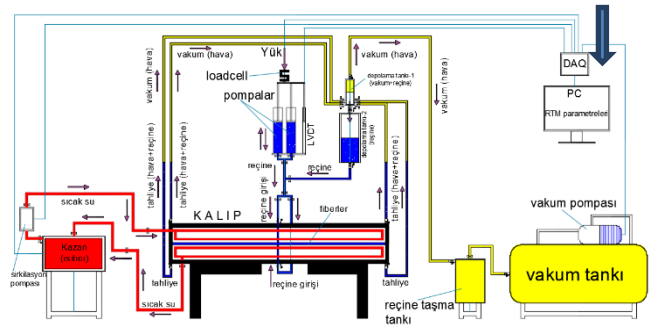
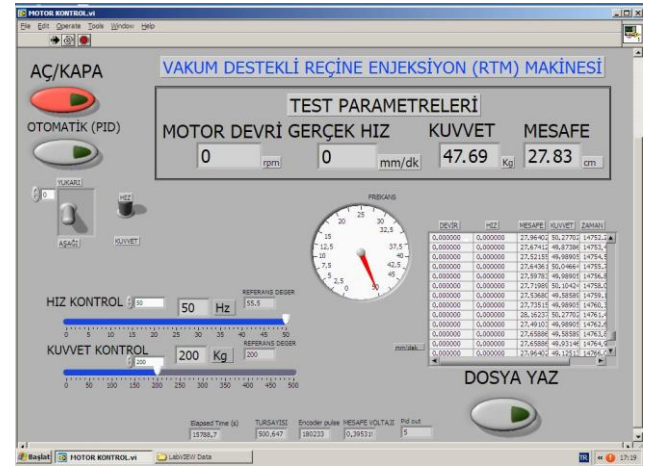
| Sabit Parametreler |
|-----------------------------------|
| Kalıp sıcaklığı = 45 °C |
| Ortam sıcaklığı ≈ 24 °C |
| Kalıpta kalma süresi = 24 h |
| Vakum basıncı = 700 mmHg |
| Kürlenme basıncı = 135 kPa |
| Değişken Parametreler |
| Hız kontrollü enjeksiyon yöntemi: |
| Sabit hız = 16.7 – 54.8 mm/min. |
| Değişken basınç = 1.95 – 4.29 bar |
| Reçine çevrim sayısı = 1 – 3 |
| Levha kalınlığı = 3 ± 0.27 mm |



Şekil 2: (a): Cam-dokuma/cam-dokuma (WR/WR), (b): Cam-dokuma/cam-keçe (WR/MAT) fiberlerin istifleme şekli ve (c): Cam-dokumalarda fiber oryantasyonu.

2.1.1 Vakum destekli RTM prosesi

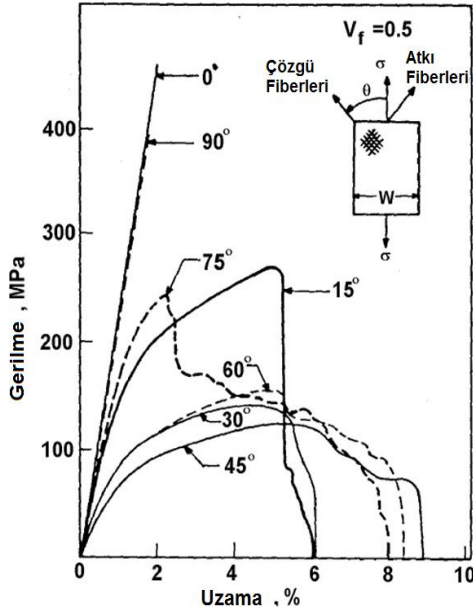
Literatürde, vakum destekli RTM çalışmaları [22], RTM'de vakum ve enjeksiyon debisi gibi proses parametrelerinin kompozit levhanın mekanik özelliklere etkisi [23], RTM prosesinde farklı parametreler kullanılarak iyi ıslanma ve ıslanma zamanını azaltma [24], RTM'de vakumun ve vakum noktalarının kompozit levhanın mekanik özelliklerine etkisi [25],[26] ve vakum destekli RTM ile üretilen kompozitlerde hava boşluğu içeriği [27] gibi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise, Şekil 3'te görülen laboratuvar ölçekli, bilgisayar kontrollü, ısıtmalı ve vakum destekli RTM prosesi kurulmuştur. Kalıbın üst ve alt merkezinden olmak üzere iki noktadan reçine enjeksiyonu, kalıp köşelerindeki dört noktadan ise vakum yapılabilmektedir. RTM makinesinde, motor-redüktör grubu frekans kontrol cihazı ile 0-50 Hz arasında kontrol edilmektedir. Reçine basma hızı ise 0-50 mm/min. arasında değiştirilebilmektedir. Lineer vidalı modül, iki adet piston-silindire reçine emme ve reçine basma olarak hareket vermektedir. Şekil 3'teki yazılımın arayüzünden görüldüğü gibi bilgisayar destekli olarak reçine enjeksiyonu sabit-hız veya sabit-yük (basınç) kontrollü olarak yapılabilmektedir. Ayrıca, RTM çevriminin başından sonuna kadar bütün parametreler PC'ye kaydedilmektedir. Kapalı kalıp içindeki hava -700 mm Hg'lik bir vakum basıncı ile boşaltılarak negatif bir basınç oluşturulmuştur. Bu basıncın, kapalı kalıp içindeki sıkı fiber yapısını içine basılan reçine enjeksiyon basıncının düşmesi, kalıp içindeki hava boşluklarının azaltılması ve kalıp doldurma zamanının düşmesi gibi pozitif etkileri olmuştur.



Şekil 3: Vakum destekli RTM prosesi şematığı.

2.2 Kompozit levhalarda mekanik anizotropi faktörü

Tek yönlü fiberlerden oluşan kompozit levhaların rijitliği, bireysel fiberlerin anizotropi derecesi ile orantılı olarak düşer. Yani, fiber tipine ve hacmine göre değişmekle beraber eksen yönündeki fiberlerin modülü, enine yöndeki fiberlerin modülünden en az yirmi kez yüksektir. Örneğin, tek yönlü karbon-epoksi polimer kompozitlerde elastisite modülü açısından anizotropi faktörü $E_{boyuna}/E_{enine} \geq 20$ olacak şekilde yüksektir. Şekil 4, çeşitli yönlerde yüklenen bir düz-dokuma kompozit için gerilme-uzama eğrilerini gösterir [28].



Şekil 4: Düz-dokuma karbon/epoksi laminat için gerilme-uzama eğrileri [28].

Tek yönlü (UD) cam-dokumalarda elastisite modülü açısından mekanik anizotropi faktörü Denklem-1 ile hesaplanabilir. Bu dokumalarda mekanik özelliklerinin maksimum olduğu fiber yönü 0° yönüdür. İki yönlü (BD) dokumalarda ise 0° ile 90° arasındaki mekanik özelliklerde çok belirgin bir fark yoktur. Ancak, iki yönlü bu dokumalarda mekanik özelliklerin en zayıf olduğu fiber yönü ise $\pm 45^\circ$ yönüdür. Bu nedenle iki yönlü (BD) dokumalarda mekanik anizotropi faktörü Denklem-2 ile hesaplanmalıdır.

$$AF_{UD} = E_0/E_{90} \quad (1)$$

$$AF_{BD} = E_{0/90}/E_{\pm 45} \quad (2)$$

Burada;

AF_{UD} : tek yönlü anizotropi faktörü, AF_{BD} : çift yönlü anizotropi faktörü, E_0 : lif yönündeki modül.

E_{90} : liflerin tersi yönündeki modül, $E_{0/90}$: dokuma kumaşlarda en yüksek yönlerdeki (0° ve 90°) modül.

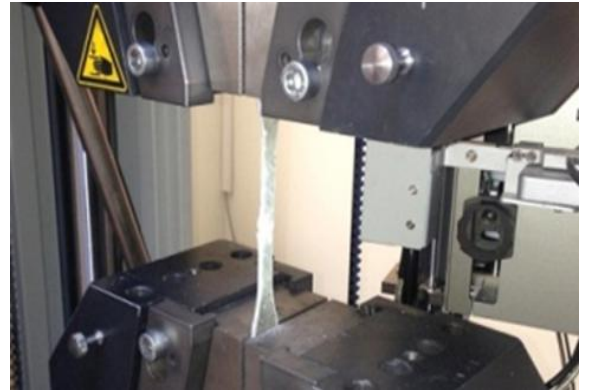
$E_{\pm 45}$: dokuma kumaşlarda en zayıf yönlerdeki ($\pm 45^\circ$) modüldür.

Yukarıda bahsedilen denklemlerdeki mekanik anizotropi faktörü (AF) elastisite modülü açısından verilmiştir. Bu hesaplama, eğilme modülü, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından da benzer şekilde yapılabilir. Bu çalışmada mekanik anizotropi faktörü (AF), çekme ve eğme deneylerinden elde edilen dört farklı mekanik deney verileri açısından değerlendirilmiştir. Tasarımcı, hangi anizotropi

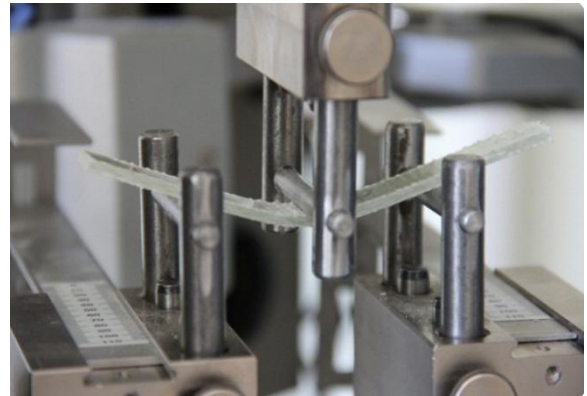
faktörünü esas alacağını kompozit levhanın kullanım amacına göre karar vermelidir.

2.3 Mekanik deneyler

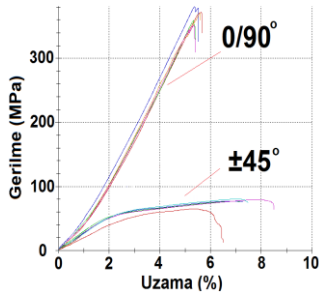
Bu çalışmada, kompozit levhalar Şekil 5 ve Şekil 6'da görülen ölçülerde CNC router'da kesilerek TS EN ISO 527-4 standardına göre çekme [29], ASTM-D7264/D7264M standardına göre ise üç-noktadan eğme [30] deneylerine tabii tutulmuşlardır. Şekil-7 (a) ve (b)'de cam-dokuma/cam-dokuma (WR/WR), Şekil 7 (c) ve (d)'de ise cam-dokuma/cam-keçe (WR/MAT) kombinasyonları için elde edilen deney eğrilerinin birer örneği gösterilmiştir.



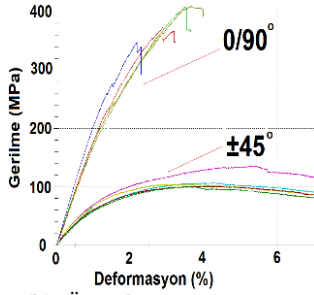
Şekil 5: Çekme deneyi numunesi.



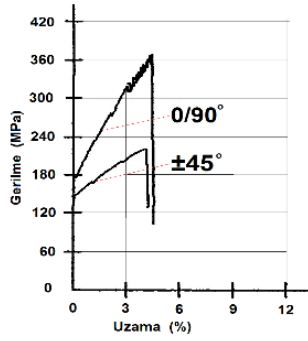
Şekil 6: Üç-nokta eğme deneyi numunesi.



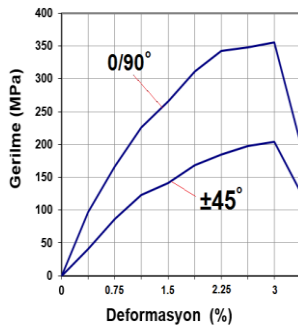
(a): Çekme eğrisi.



(b): Üç-nokta eğme eğrisi.



(c) Çekme eğrisi.



(d) Üç-nokta eğme eğrisi.

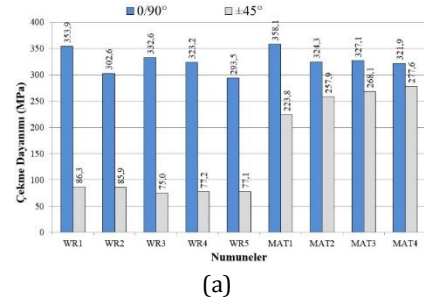
Şekil 7: (a); (b) WR/WR ve (c) (d) WR/MAT kombinasyonları için çekme ve eğme deney eğrileri.

3 Sonuçlar ve tartışma

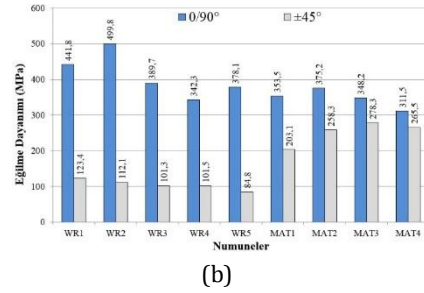
Bu çalışmada, statik çekme ve eğme yükü altında beş farklı WR/WR ve dört farklı WR/MAT kombinasyonunu içeren kompozit levhaların 0°/90° ve ±45° yönlerindeki "mekanik anizotropi" değerleri incelenmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar literatürle [16],[31] uyum içindedir.

Şekil 8(a) incelendiğinde; WR/WR ve WR/MAT kombinasyon gruplarının 0°/90°'lik yönlerdeki çekme dayanım değerleri arasında çok önemli bir fark olmamakla birlikte; WR/MAT grubu levhaların ±45°'lik yöndeki çekme dayanım değerlerinin

WR/WR grubu levhalara göre çok önemli oranda yükseldiği görülmektedir.



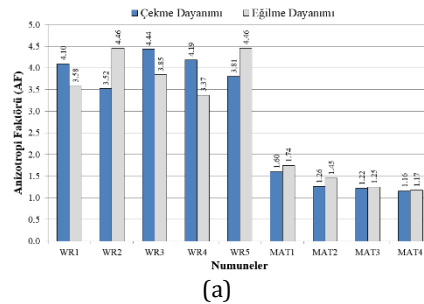
(a)



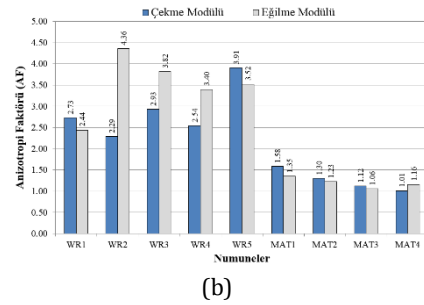
(b)

Şekil 8: Numunelerin 0°/90° ve ±45° yönlerindeki. (a): Çekme ve (b): Eğilme sonuçlarının karşılaştırmaları.

Benzer değerlendirme eğilme dayanımı açısından yapıldığında; WR/WR grubu 0°/90°'lik yöndeki eğilme dayanımının WR/MAT grubuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, Şekil 8(b) incelendiğinde ±45°'lik yöndeki eğilme dayanımının WR/MAT levhalarda çok önemli oranda yükseldiği görülmektedir. Şekil 9'da bütün numunelerin 0°/90° ve ±45° yönlerindeki çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme modülü değerlerinin "mekanik anizotropi" açısından karşılaştırması verilmiştir.



(a)

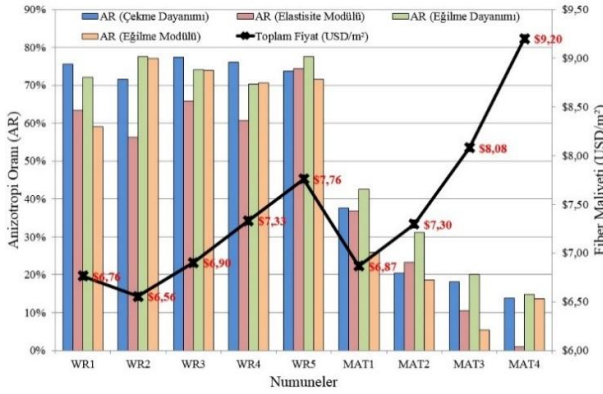


(b)

Şekil 9: Numunelerdeki, (a): Çekme ve eğilme dayanımı, (b): Elastisite ve eğilme modülü değerlerinin "mekanik anizotropi" açısından karşılaştırılması.

Burada, WR/MAT grubu levhaların anizotropi faktörünün WR/WR grubu levhalara göre bariz olarak düşük olduğu

görülmektedir. Dolayısıyla cam-keçe takviyesi kompozit levhalardaki heterojenliği önemli oranda azaltmıştır. Fiber maliyeti açısından değerlendirme yapıldığında; Şekil 10'da WR1 ve WR2 numunelerinin en düşük maliyette olduğu görülmektedir. Ancak WR1 ve WR2 numuneleri çekme ve eğilmeye karşı yüksek anizotropi faktörüne sahip olduğundan tasarım açısından risklidir. Buna karşın, MAT1 ve MAT2 numuneleri hem maliyet hem de anizotropi faktörü açısından daha uygundur. Ancak, Şekil-8 ve Şekil-9 incelendiğinde MAT2'nin MAT1'e göre çekme dayanımı hariç daha yüksek mukavemet değerlerine ve daha düşük anizotropi faktörlerine sahip olması dolayısıyla MAT2 numunesi daha güvenilir olarak değerlendirilebilir. Şekil 9'da mekanik anizotropi açısından en uygun levha MAT4 olarak görülmesine rağmen, Şekil 10'a bakıldığında MAT4 en yüksek fiber maliyetine sahiptir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda; tabaka sayısı arttıkça kompozit levhanın işçiliği, hava boşlukları, kalıp dolum zamanı ve toplam levha maliyetinin arttığı, buna karşın mekanik anizotropi faktörünün azalıp levhanın mekanik dayanımının ve rijitliğinin arttığı görülmüştür.



Şekil 10: Bütün numunelerin anizotropi faktörlerinin ve toplam fiber maliyetlerinin karşılaştırılması.

3.1 Genel sonuçlar

Gözlenen deneysel davranış ve yapılan analizlere dayanarak, aşağıdaki genel sonuçlara varılabilir:

1. Cam-dokuma fiberler arasında cam-keçe takviyesi ile anizotropi faktörü oldukça düşmüş ve çok önemli bir pozitif etki sağlamıştır. Cam-dokuma fiberler arasında cam-keçe takviyesi ile $0^{\circ}/90^{\circ}$ ile $\pm 45^{\circ}$ arasındaki mekanik anizotropi oranı (%AR) farkı;
 - Çekme dayanımı açısından maksimum %77.5'dan %13.7'ye kadar düşmüştür,
 - Eğilme dayanımı açısından %77.6'dan %14.8'e kadar düşmüştür,
 - Elastisite modülü açısından %74,4'den %0,9'a kadar düşmüştür,
 - Eğilme modülü açısından %71.6'dan %5.3'e kadar düşmüştür.
2. Mukavemet değerlerinin yüksekliği, özellikle anizotropi faktörlerinin düşüklüğü ve toplam fiber maliyeti açısından MAT grubu içinde en düşük maliyete sahip olan MAT1'e göre sadece %6 oranında yüksek olması açısından; MAT2 numunesine ait kombinasyon en optimum kompozit levha olarak tercih edilebilir,
3. Deneyler sonucunda, birçok sektörde kullanılan büyük ölçekli tabakalı kompozit levhalarda cam-

dokumalar arasında cam-keçe takviyesinin mekanik anizotropi üzerinde çok olumlu etkisi olduğu görülmüştür,

4. Deneysel olarak yapılan bu çalışma verileri, kompozit levhanın pratikte kullanım amacına göre tasarımcıya önemli bir yol gösterecektir.

4 Teşekkür

Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi (BAP2013/17 ve BAP2013/40) Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından desteklenmiştir.

5 Kaynaklar

- [1] Whang B. "Comparison Study of Aluminum, Ferro-Cement, and Fiber-Reinforced Plastic for Small Craft in Korea". Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, Structures Department Research and Development Report, 1972.
- [2] Scott RJ, Sommella JH. "Feasibility Study of Glass Reinforced Plastic Cargo Ship". Department of the Navy Naval Ship Engineering Center, Washington DC, Final Technical Report on Reinforced Plastic Ships, Project SR, 195, 1971.
- [3] Akkaoui W, Bayram G. "Effects of Processing Parameters on Mechanical and Thermal Properties of Glass Mat Reinforced Nylon 6 Composites". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(8), 881-892, 2004.
- [4] Miracle DB, Donaldson SL. *Composites*. Vol. 21, ASM International Handbook, 2001.
- [5] Alfors JB, Graner WR. "Reinforced Plastics-A Structural Material for Marine Applications". *SNAME Transactions, the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 62, 5-29, 1954.
- [6] Almeida JHS, Angrizani CC, Botelho EC, Amico SC. "Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites". *Materials & Design*, 65, 789-795, 2015.
- [7] Kim JW, Kim HS, Lee DG. "Tensile Strength of Glass Fiber-Reinforced Plastic by Fiber Orientation and Fiber Content Variations". *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 6, 640-645, 2012.
- [8] Kim JW, Lee DG. "Study on the fiber orientation during compression molding of reinforced thermoplastic composites". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(4), 335-339, 2014.
- [9] Onga LK, Kiena QK, Jyeb WK. "Effect of fibre orientation on the scratch characteristics of e-glass fibre-reinforced polyester composite". *Recent Patents on Materials Science*, 4(1), 56-62, 2011.
- [10] Mortazavian S, Fatemi A. "Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites". *Composites Part B: Engineering*, 72, 116-129, 2015.
- [11] Bura V, Dvr P. "Testing the flexural fatigue behavior of e-glass epoxy laminates". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(8), 224-241, 2014.
- [12] Cecen V, Sarikanat M, Seki Y, Govsa T, Yildiz H, Tavman IH. "Polyester composites reinforced with noncrimp stitched carbon fabrics: Mechanical characterization of composites and investigation on the interaction between polyester and carbon fiber". *Journal of Applied Polymer Science*, 102(5), 4554-4564, 2006.

- [13] Sandeep MB, Choudhary D, Nizamuddin I, Qalequr R. "Experimental study of effect of fiber orientation on the flexural strength of glass/epoxy composite material". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(9), 208-2011, 2014.
- [14] Siddhartha, Gupta K. "Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials". *Materials and Design*, 35, 467-479, 2012.
- [15] Banakar P, Shivananda HK, Niranjan HB. "Influence of Fiber Orientation and Thickness on Tensile Properties of Laminated Polymer Composites". *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 9(1), 61-68, 2012.
- [16] Kumar KV, Reddy PR, Shankar DVR. "Effect of Angle Ply Orientation on Tensile Properties of Bi Directional Woven Fabric Glass Epoxy Composite Laminate". *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(10), 55-61, 2013.
- [17] Heckadka SS, Nayak SY, Narang K, Pant KV. "Chopped Strand/Plain Weave E-Glass as Reinforcement in Vacuum Bagged Epoxy Composites". *Journal of Materials*, 2015(957043), 1-7, 2015.
- [18] Sakin R, Ay I, Yaman R. "An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials". *Materials & Design*, 29(1), 212-217, 2008.
- [19] Sakin R, Ay I. "Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites". *Materials & Design*, 29(6), 1170-1181, 2008.
- [20] Ary Subagia IDG, Kim Y, Tijing LD, Kim CS, Shon HK. "Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers". *Composites Part B: Engineering*, 58, 251-258, 2014.
- [21] Arifin AMT, Abdullah S, Rafiquzzaman Md, Zulkifli R, Wahab DA, Arifin AK. "Investigation of the behaviour of a chopped strand mat/woven roving/foam-Klegecell composite lamination structure during Charpy testing". *Materials & Design*, 59, 475-485, 2014.
- [22] Chang CY, Lin HJ. "Unsaturated polyester/E-glass fiber composites made by vacuum assisted compression resin transfer molding". *Journal of Polymer Engineering*, 32(8-9), 539-547, 2012.
- [23] Khoun L, Maillard D, Bureau MN. "Effect of process variables on the performance of glass fibre reinforced composites made by high pressure resin transfer moulding". *12th Annual Automotive Composites Conference*, Troy, MI, USA, 11-13 September 2012.
- [24] Han SH, Cho EJ, Lee HC, Jeong K, Kim SS. "Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites". *Composite Structures*, 119, 50-58, 2015.
- [25] Brocks T, Shiino MY, Cioffi MOH, Voorwald HJC, Caporalli Filho A. "Experimental RTM manufacturing analysis of carbon/epoxy composites for aerospace application". *Materials Research*, 16(5), 1175-1182, 2013.
- [26] Ou Y, Zhu D. "Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures". *Construction and Building Materials*, 96, 648-656, 2015.
- [27] Chen D, Arakawa K, Xu C. "Reduction of void content of vacuum-assisted resin transfer molded composites by infusion pressure control". *Polymer Composites*, 36(9), 1629-1637, 2015.
- [28] Cox BN, Flanagan G. "Handbook of Analytical Methods for Textile Composites". NASA Contractor Report 4750, Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 1997.
- [29] TS EN ISO 527-4. "Standard Test Method of Plastics-Determination of tensile properties -Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites", 2007.
- [30] ASTM-D7264/D7264M. "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials", 2007.
- [31] Alam S, Habib F, Irfan M, Iqbal W, Khalid K. "Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites". *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 32(3), 265-269, 2010.