



## خواص کششی و خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف خرما

محمد صالح احمدی<sup>1\*</sup>، مریم غلامی<sup>2</sup>، محمدعلی توانایی<sup>3</sup>، محمد خواجه مهریزی<sup>1</sup>

1- استادیار، مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد

3- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی 89195-741 ms.ahmadi@yazd.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/3/18

پذیرش: 96/5/25

### چکیده

در این پژوهش الیاف تنه درخت خرما به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت با ماتریس اپوکسی به کار گرفته شد. نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از الیاف برش داده شده به طول‌های 1، 2 و 3 سانتی‌متر و با سه سطح از درصد حجمی الیاف با استفاده از روش قالب‌گیری دستی تولید شدند و تحت آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد طول الیاف در محدوده متغیرهای پژوهش اثر معناداری بر خواص کششی و خمشی نداشته است. به‌طورکلی افزودن الیاف خرما سبب بهبود مقاومت کششی کامپوزیت نسبت به ماتریس خالص نگردید که علت این مسأله می‌تواند چسبندگی ضعیف الیاف و ماتریس و وجود عیوب ساختاری در نمونه‌ها باشد. مدول کششی محاسباتی با استفاده از مدل تسای-پاگانو نسبتاً خوبی با مقادیر تجربی نشان داد. نتایج آزمون خمش بیان می‌کند که افزودن 7.5 درصد حجمی الیاف خرما سبب بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت می‌گردد اما در درصد حجمی بالاتر (10.7 درصد) این خاصیت افت می‌نماید که علت آن افزایش بیش‌ازحد الیاف و در نتیجه نفوذ کمتر رزین در بین آن‌ها و اتصال و یکپارچگی کمتر کامپوزیت است. همچنین با افزودن الیاف خرما به اپوکسی مدول خمشی کامپوزیت افزایش یافت. این افزایش در نمونه‌های حاوی 7.5 و 10.7 درصد حجمی الیاف مشاهده شد که بیشترین مقدار آن به میزان 3.7 GPa در نمونه 7.5 درصد حجمی (105٪ افزایش) به دست آمد.

### کلیدواژگان:

کامپوزیت

الیاف خرما

اپوکسی

کشش

خمش

DOI: 10.22068/jstc.2018.29904

## Tensile and flexural properties of epoxy-date palm fiber composites

Mohammad Saleh Ahmadi\*, Maryam Gholami, Mohammad Ali Tavanaie, Mohammad Khajeh Mehrizi

Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

\* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, ms.ahmadi@yazd.ac.ir

### Keywords

Composites  
Date palm fibers  
Epoxy  
Tension  
Bending

### Abstract

In this research trunk fibers of date palm tree were utilized as the reinforcement for epoxy matrix composites. Composite samples were produced using the fibers with the cut length of 1, 2 and 3 cm and with three levels of fiber volume percentage (FVP) by the hand molding method and were subjected to tensile and three-point bending tests. The results showed that fiber length, in the range of the research parameters, didn't have a significant effect on the tensile and flexural properties. In general, adding date palm fibers (DPFs) didn't improve tensile strength compared with the pure matrix, which may be due to weak bonds between fibers and matrix and existence of structural defects in the samples. A fairly good agreement was observed between theoretical tensile moduli calculated using Tsai-Pagano model and experimental values. The results of bending test showed that adding 7.5 volume percent of DPFs leads to the improvement in flexural strength of the composites, however, in the higher FVP (10.7) it decreases which is due to the increase in fibers volume and thus less penetration of resin into them and deterioration of structural integrity of the samples. Moreover, by adding DPFs to epoxy the tensile modulus of the composite increased. This increase was observed in samples containing 7.5 and 10.7 FVP with a maximum value of 3.7 GPa in 7.5 FVP (105% enhancement).

### 1- مقدمه

و حجم بالای الیاف طبیعی در مقایسه با الیاف مصنوعی، در کامپوزیت‌های پلیمری بهره‌وری مصرف سوخت و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در صنعت خودرو را سبب گردیده است. البته این الیاف دارای ویژگی‌های نامطلوبی از جمله جذب رطوبت و ناهمگونی بالا در خواص هستند [1]. تاکنون الیاف طبیعی متنوعی مانند جوت<sup>1</sup>، کتان، سیسال، نارگیل و شاهدانه<sup>1</sup> به‌عنوان

کامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف به‌ویژه صنعت خودرو، هوافضا و ساختمان‌سازی برخوردارند. در دهه‌های اخیر نگرانی دانشمندان در خصوص محدود بودن منابع نفتی و آلودگی ناشی از استفاده پلیمرهای مصنوعی و تولید گازهای گلخانه‌ای، باعث ورود کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به بازار جهانی شده است. الیاف طبیعی به دلیل چگالی کمتر، قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدشوندگی بر الیاف مصنوعی برتری دارند. وزن کم

<sup>1</sup> Jute

Please cite this article using:

Ahmadi, M. S. Gholami, M. Tavanaie, M. A. and Khajeh Mehrizi, M., "Tensile and flexural properties of epoxy-date palm fiber composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:



Fig. 1 Date palm fibers in the trunk of the tree [4]  
شکل 1 الیاف خرما در ساقه نخل [4]

در کشور ما بعضاً از برگ‌ها و الیاف درخت نخل در تولید صنایع دستی و طناب استفاده می‌شود. از این رو یافتن کاربرد برای الیاف خرما در کامپوزیت‌ها، بازاری جدید برای آنچه به‌طور معمول ضایعات در نظر گرفته می‌شود یا در محصولات کم‌ارزش استفاده می‌شود، باز خواهد کرد [1].

تحقیقات محدودی در زمینه بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده از الیاف خرما و ماتریس‌های پلیمری انجام شده است. اسدزاده و همکارانش خواص خمشی کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ اتیلن پروپیلن دی ان منومر تقویت‌شده با الیاف خرما و جوت را بررسی کردند [8]. بر اساس نتایج با افزایش درصد وزنی الیاف، مقاومت خمشی کامپوزیت افزایش می‌یابد. اما چنانچه این میزان از حدی بیشتر شود مقاومت و مدول خمشی کاهش می‌یابد که ناشی از انتقال کمتر تنش بین الیاف و ماتریس است. مدول خمشی نیز با افزایش درصد وزنی الیاف افزایش می‌یابد و تنها در خصوص الیاف خرما در 30٪ وزنی، کاهش آن مشاهده می‌گردد. در نمونه 20٪ وزنی از الیاف خرما مدول خمشی تا 75٪ بهبود یافته است.

الکعبی و همکارش قابلیت استفاده از الیاف خرما به‌عنوان تقویت‌کننده در ماتریس پلی‌استر را مورد بررسی قرار دادند [9]. در این تحقیق آرایش یافتگی الیاف به‌صورت تصادفی بوده و نمونه‌های کامپوزیت به روش قالب‌گیری تولید شدند. نتایج نشان می‌دهد که خواص کامپوزیت به‌شدت تحت تأثیر طول و درصد حجمی الیاف قرار دارد. به‌طور کلی مشخص گردید طول و درصد حجمی دارای مقادیری بهینه است که در مقادیر بالای آن مقاومت خمشی افت می‌نماید. دلیل این مسأله تماس بیشتر الیاف با یکدیگر و در نتیجه پیوند کمتر لیف/ماتریس گزارش شده است که در نهایت منجر به انتقال تنش کمتر بین لیف/ماتریس می‌شود.

رافیق و همکارانش خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف خرما و ذرات پوسته نارگیل به‌عنوان پرکننده را مورد مطالعه قرار دادند [10]. در این تحقیق الیاف خرما موجود در تنه درخت به شکل لایه حصیری، بدون جداسازی از یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است. کامپوزیت‌ها به روش دستی و با درصد وزنی ماتریس در کلیه نمونه‌ها 80٪ تولید شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده کامپوزیت اپوکسی/الیاف خرما مدول خمشی بالاتری در مقایسه با اپوکسی خالص دارد و افزودن پرکننده این مقادیر را افزایش می‌دهد. این در حالی است که نمونه‌های حاوی اپوکسی/پرکننده بیشترین میزان مدول خمشی را نشان می‌دهد.

تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول خواص برخی از الیاف گیاهی در مقایسه با الیاف مصنوعی نشان داده شده است.

جدول 1 خواص برخی از الیاف گیاهی و مصنوعی [2]

لیف	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	کرنش %
پنبه	1.5-1.6	287-597	5.5-12.6	7.0-8.0
جوت	1.3	393-773	26.5	1.5-1.8
خرما	0.9-1.2	170-275	5-12	2-19
کتان	1.5	345-1035	27.6	2.7-32
شاهدانه	-	690	-	1.6
رامی <sup>۲</sup>	-	400-938	61.4-128	3.6-3.8
سیسال	1.5	511-635	9.4-22	2.0-2.5
نارگیل	1.2	175	4-6	30.0
ویسکوز	-	593	11	11.4
شیشه-ای	2.5	2000-3500	70	2.5
شیشه-اس	2.5	4570	86	2.8
آرامید	1.4	3000-3150	63.0-67.0	3.3-3.7
کربن	1.4	4000	230-240	1.4-1.8

در چند سال اخیر، تحقیقاتی بر روی الیاف خرما و استفاده از آن در کامپوزیت‌ها صورت گرفته است. درخت خرما یک عضو از خانواده نخل (فونیکس داکتیلی فرا<sup>۱</sup>) است که معمولاً در خاورمیانه، شمال آفریقا، جزایر قناری، پاکستان، هند و آمریکا (کالیفرنیا) یافت می‌شود [11]. کشور ایران بر طبق آمار فائو سال 2012، بعد از مصر دومین کشور تولیدکننده خرما است [3]. به‌طور متوسط در سال یک میلیون تن خرما در کشور تولید می‌شود؛ بنابراین ایران پتانسیل بالقوه‌ای برای استفاده از الیاف خرما در مصارف صنعتی دارد. استان‌های جنوبی کشور نظیر خوزستان، سیستان و بلوچستان و بوشهر از جمله تولیدکنندگان بزرگ این محصول هستند. این الیاف که در ساقه درخت خرما به شکل حصیری بافته شده وجود دارند، عمدتاً به‌عنوان ضایعات دور ریخته می‌شوند. از این رو با به‌کارگیری این الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده می‌توان از یک ماده باقیمت پایین، محصولی باارزش افزوده بالا تولید کرد و با این عمل کمک قابل توجهی به محیط‌زیست و صنعت کشاورزی نمود [5,4].

ساقه درخت خرما با لایه‌های مشبک حصیر مانند متشکل از الیاف متقاطع با قطرهای متفاوت پوشیده شده است. در شکل الیاف موجود در ساقه نخل خرما مشاهده می‌شود [4].

در برخی مطالعات نشان داده شده است که الیاف خرما می‌توانند به‌عنوان پرکننده‌ای مؤثر در پلیمرهای گرماسخت و گرمانرم در کاربردهای متفاوت استفاده شوند [5-7]. ضایعات سالبانه حاصل از هرس درخت خرما برای هر درخت بیش از 20 کیلوگرم حاوی برگ‌های خشک و الیاف برآورد شده است. با وجود این که این الیاف منابع خوب سلولز، همی سلولز و لیگنین هستند، متأسفانه در اکثر کشورها، در هیچ‌یک از فرآیندهای بیولوژیکی یا کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند [5].

1 Hemp  
2 Rami  
3 Phoenix dactylifera

## 2-3- فرآیند تولید کامپوزیت

به منظور ساخت کامپوزیت‌ها، قالبی شامل سه صفحه از جنس پلکسی گلس به ابعاد  $300 \times 250 \times 3$  میلی‌متر مکعب مورد استفاده قرار گرفت. بخش میانی به شکل قاب بود که با قرارگیری بر صفحه بستر، الیاف با طول مشخص به‌طور تصادفی درون آن پخش شدند. در شکل 2 طرح شماتیک قالب نشان داده شده است.

جدول 2 مشخصات الیاف خرما استفاده شده در این پژوهش

Table 2 Properties of date palm fibers used in the research

محدوده قطر ( $\mu$ )	میانگین قطر ( $\mu$ )	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)
310-800	510	0.99	107.4	3493

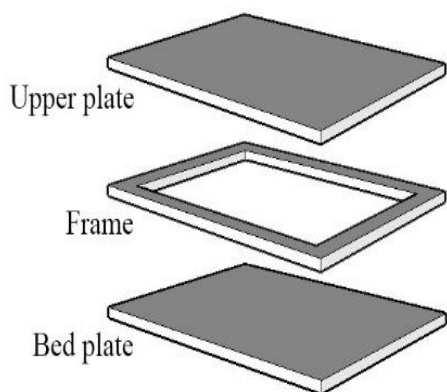


Fig. 2 Schematic of the mold

شکل 2 شماتیک قالب

بستر و صفحه بالایی قالب برای جلوگیری از چسبیدن رزین و جداسازی راحت آن، به کمک سلفون پوشیده شدند. در ادامه مخلوط رزین و سخت‌کننده (با نسبت 1:2) به آرامی و به‌طور یکنواخت درون قالب ریخته شد. پس از قرار دادن صفحه بالایی و قرار دادن وزنه مناسب بر روی آن، پخت نمونه‌ها در دمای محیط به مدت 24 ساعت صورت گرفت. سپس عملیات پسا پخت در آون و در دماهای 60، 90 و 120 درجه سانتی‌گراد به ترتیب به مدت 2، 1.5 و 1 ساعت انجام شد.

نمونه‌های کامپوزیت حاوی الیاف به طول 1، 2 و 3 سانتی‌متر به مقدار 4.16 درصد حجمی به‌منظور بررسی اثر طول و نمونه‌های حاوی الیاف به طول 1 سانتی‌متر در مقادیر 4.16، 7.5 و 10.7 درصد حجمی، برای بررسی تأثیر درصد حجمی الیاف تهیه شدند. نکته قابل توجه در زمینه تولید نمونه‌ها این است که الیاف خرما به دلیل قطر نسبتاً زیاد انعطاف‌پذیری کمی داشته و در نتیجه متراکم نمودن آن‌ها در داخل قالب به‌منظور دستیابی به مقادیر بالاتر درصد حجمی الیاف، با روش‌های معمول دستی میسر نگردد. چگالی تئوری کامپوزیت‌ها ( $\rho_c$ ) مطابق استاندارد ASTM D 2734 به کمک رابطه (2) و درصد حجمی الیاف ( $V_f$ ) بر اساس رابطه (3) محاسبه گردید [15]:

$$\rho_c = \frac{100}{(W_f/\rho_f) + (W_m/\rho_m)} \quad (2)$$

$$V_f = \frac{W_f \rho_c}{\rho_f} \quad (3)$$

العقلا و همکارانش معیارهایی برای مقایسه الیاف خرما با سایر الیاف گیاهی که معمولاً در صنایع خودرو استفاده می‌شوند، ارائه داده‌اند که نشان می‌دهد الیاف خرما قابلیت جایگزینی با سایر الیاف مانند سیسال، شاهدانه و نارگیل را دارد [5]. برخی جنبه‌های دیگر از خواص الیاف خرما در کامپوزیت‌ها نیز در تحقیقات اخیر برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است [11-13]. در این تحقیق گزارش شده که الیاف خرما ارزان‌ترین و دارای بالاترین نسبت مدول ینگ ویژه به قیمت، در بین الیاف مذکور هستند.

با توجه به محدود بودن تحقیقات انجام شده بر روی الیاف خرما به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها و با توجه به مزیت نسبی کشور ایران در زمینه استفاده از این الیاف در تحقیق حاضر به بررسی اثر طول و درصد حجمی الیاف خرما بر خواص کششی و خمشی کامپوزیت خرما/اپوکسی پرداخته می‌شود.

## 2- تجربی

## 2-1- مواد مورد استفاده

برای تولید نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمون‌های تجربی، کامپوزیت‌هایی با استفاده از رزین اپوکسی و الیاف خرما تولید شدند. الیاف خرما از نخلستان‌های استان بوشهر تهیه گردید و رزین اپوکسی ای-8128 و ماده سخت‌کننده اچ-3895 تولید شرکت ای سی آر تک<sup>1</sup> کشور تایوان در این کار مورد استفاده قرار گرفت.

## 2-2- آماده‌سازی الیاف

الیاف خرما به‌منظور حذف آلودگی و گردوغبار، با آب فراوان شسته شده و به مدت یک ساعت در حوضچه آب خیسانده شدند. سپس به کمک دست از یکدیگر جدا شده و در دمای محیط به مدت 24 ساعت خشک شدند [14]. این الیاف به‌صورت دستی در طول‌های 1، 2 و 3 سانتی‌متر بریده شدند. مشخصات الیاف در جدول 2 آمده است. چگالی الیاف خرما به روش غوطه‌وری با استفاده از بنزن، نیترو بنزن و تتراکلرید کربن اندازه‌گیری شد. با توجه به مشخص بودن چگالی این مواد، از ترکیب دو یا سه جز از آن‌ها می‌توان در لحظه غوطه‌وری لیف خرما، چگالی آن را با استفاده از رابطه (1) محاسبه کرد:

$$\rho = \frac{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \rho_3 v_3}{v_1 + v_2 + v_3} \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho_1$ ،  $\rho_2$  و  $\rho_3$  به ترتیب چگالی لیف، بنزن ( $0.88 \text{ g/cm}^3$ )، نیترو بنزن ( $1.05 \text{ g/cm}^3$ ) و تتراکلرید کربن ( $1.59 \text{ g/cm}^3$ ) و  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$  به ترتیب حجم بنزن، نیترو بنزن و تتراکلرید کربن است.

قطر الیاف به کمک میکروسکوپ پروژکتینا با بزرگنمایی 100 برابر اندازه‌گیری شد. در هر نمونه، قطر لیف در سه منطقه متفاوت مشاهده و میانگین آن به‌عنوان داده نهایی گزارش شد. در مجموع 80 نمونه لیف مورد بررسی قرار گرفت.

مقاومت کششی الیاف خرما نیز توسط دستگاه مقاومت سنج الیاف مدل EMT-3050 ساخت شرکت الیما با ظرفیت 20Kgf و استاندارد 3822 ASTM D اندازه‌گیری شد. تعداد نمونه‌ها در هر گروه 20 عدد، فاصله بین دو فک 5 سانتی‌متر و سرعت حرکت آن 1 سانتی‌متر در دقیقه، در نظر گرفته شد

<sup>1</sup> A.C.R. Tech Co.

ترتیب برابر با مدول خمشی و شیب نمودار نیرو- جابه‌جایی در بخش ابتدایی آن می‌باشد.



Fig. 3 A specimen of sample A3 for tensile test

شکل 3 یک نمونه کامپوزیت کد A3 برای آزمون کشش



Fig. 4 The tensile tester machine

شکل 4 دستگاه آزمون کشش



Fig. 5 A specimen under bending test

شکل 5 یک نمونه در حین آزمون خمش

که در این رابطه  $\rho_m$  و  $\rho_f$ ، به ترتیب چگالی ماتریس و لیف و  $W_f$  و  $W_m$ ، به ترتیب درصد وزنی ماتریس و الیاف است. مشخصات نمونه کامپوزیت‌های تولیدشده در جدول 3 نشان داده شده است. چگالی ماتریس و چگالی تجربی کامپوزیت نیز با استفاده از دانسیتومتر مدل KERN PLS360.3 اندازه‌گیری شد. به این منظور نمونه‌های کامپوزیت و اپوکسی در ابعاد  $3 \times 20 \times 20$  میلی‌متر مکعب با 5 تکرار مورد آزمون قرار گرفت [15].

جدول 3 مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی

Table 3 Specifications of the composite samples

کد نمونه	طول الیاف (cm)	درصد وزنی الیاف	میانگین درصد حجمی الیاف
A1	1	3.59	4.16
A2	2	3.75	4.16
A3	3	3.64	4.16
B1	1	6.51	7.50
C1	1	9.32	10.70
M	-	0	0

#### 4-2- آزمون کشش

نمونه‌های کامپوزیت به ابعاد  $3.7 \times 25 \times 230$  میلی‌متر طبق استاندارد ASTM D 3039 آماده شدند. برای انجام آزمایش دستگاه مقاومت سنج ساخت شرکت کاردوتک با سلول بار 1 تن مورد استفاده قرار گرفت. سرعت دستگاه 2 میلی‌متر در دقیقه و فاصله بین فک‌ها 130 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل 3 یک نمونه کامپوزیت جهت انجام آزمون و در شکل 4 تصویر دستگاه نشان داده شده است. در هر گروه از نمونه‌ها، آزمون با 5 بار تکرار انجام شد.

#### 5-2- تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی

بررسی سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA3 TESCAN انجام شد.

#### 6-2- آزمون خمش سه نقطه‌ای

این آزمون طبق استاندارد ASTM D 790 با استفاده از دستگاه مقاومت سنج مدل میکروتستر 350 ساخت شرکت شرلی<sup>1</sup> انگلستان با سلول بار 250kgf و با سرعت 1.4 میلی‌متر در دقیقه اجرا شد (شکل 5). طول، عرض و ضخامت نمونه به ترتیب 95، 14 و 3.7 میلی‌متر و فاصله بین دو تکیه‌گاه 55 میلی‌متر انتخاب شد. در هر گروه از نمونه‌ها، آزمون با 5 بار تکرار انجام شد. مطابق با استاندارد اشاره شده، مقاومت و مدول خمشی به ترتیب با روابط (4) و (5) محاسبه شد:

$$\sigma_b = 3PL/2bd^2 \quad (4)$$

$$E_b = L^3m/4bd^3 \quad (5)$$

در این روابط  $\sigma_f$ ،  $P$ ،  $L$ ،  $b$  و  $d$  به ترتیب مقاومت خمشی، نیروی اعمالی، فاصله بین دو تکیه‌گاه، عرض و ضخامت نمونه است. هم‌چنین  $E$  و  $m$  به

<sup>1</sup> Shirley

7-2- پیش‌بینی مدول کششی

مدول الاستیک کششی کامپوزیت‌ها بر اساس مدل تسای- پاگانو<sup>1</sup> که برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف منقطع با آرایش تصادفی توسعه داده شده است بر اساس رابطه (6) به دست می‌آید [15]:

$$E_c = \frac{3}{8}E_L + \frac{5}{8}E_T \quad (6)$$

که در این رابطه مقادیر  $E_L$  و  $E_T$  به ترتیب مدول‌های طولی و عرضی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف منقطع آرایش یافته بر اساس مدل هالپین تسای<sup>2</sup> بوده که از رابطه (7) به دست می‌آیند:

$$E_L = E_m \left( \frac{1 + 2(L/D)\eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} \right), E_T = E_m \left( \frac{1 + 2\eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} \right) \quad (7)$$

که در آن:

$$\eta_L = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2\frac{L}{D}}, \quad \eta_T = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2} \quad (8)$$

که در این روابط  $E_f$  و  $V_f$  به ترتیب مدول الاستیسیته و درصد حجمی الیاف و  $E_m$  و  $V_m$  به ترتیب مدول الاستیسیته و درصد حجمی ماتریس و  $L$  و  $D$  به ترتیب طول و قطر الیاف می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- چگالی کامپوزیت

در جدول 4 چگالی تجربی و محاسباتی کامپوزیت‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به اختلاف مقادیر چگالی محاسباتی ( $\rho_c$ ) و تجربی ( $\rho_e$ ), درصد حجمی حفره<sup>3</sup> ( $V_v$ ) در ساختار کامپوزیت طبق استاندارد ASTM D 2734 به کمک رابطه (9) به دست آمد.

جدول 4 چگالی و درصد حجمی حفره نمونه‌های کامپوزیتی

Table 4 Density and void volume fraction of composite samples

کد نمونه	چگالی محاسباتی (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی تجربی (g/cm <sup>3</sup> )	درصد حجمی حفره
A1	1.1355	1.1281	0.65
A2	1.1351	1.1269	0.72
A3	1.1354	1.1210	1.27
B1	1.1299	1.1131	1.49
C1	1.1248	1.1099	1.32
M	-	1.1453	-

$$V_v = \frac{\rho_c - \rho_e}{\rho_c} \times 100 \quad (9)$$

3-2- خواص کششی

اثر طول الیاف بر مقاومت و مدول کششی و کرنش کامپوزیت خرما / اپوکسی به ترتیب در شکل‌های 6، 7 و 8 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول الیاف از 1 به 3 سانتی‌متر، میزان مقاومت کششی افزایش می‌یابد. مدول یانگ در نمونه‌های حاوی الیاف به طول 2 سانتی‌متر بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف به طول 1 سانتی‌متر است و با افزایش طول الیاف به 3 سانتی‌متر مقدار مدول کاهش می‌یابد. شکل 8 نشان می‌دهد این مسأله متأثر

از کرنش شکست نمونه‌هاست. در واقع با کاهش کرنش شکست، مدول کششی افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود کرنش شکست کامپوزیت‌ها از کرنش شکست ماتریس خالص کمتر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت در این نمونه‌ها کامپوزیت به حداکثر توان تحمل بار خود نرسیده است. تفاوت مقادیر کرنش شکست در بین نمونه‌های کامپوزیتی می‌تواند به علت نایکنواختی‌های ساختاری باشد.

البته تحلیل آماری داده‌ها به روش تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد در سطح 5 درصد اختلاف بین گروه‌ها برای متغیرها معنی‌دار نیست. به عبارت دیگر طول الیاف در محدوده تغییرات این پژوهش بر خواص کششی کامپوزیت خرما/اپوکسی مؤثر نمی‌باشد. هرچند در برخی کارهای گذشته به اثر گذاری طول الیاف بر خواص مکانیکی اشاره شده است [9] و به لحاظ نظری نیز این پارامتر بر خواص تأثیرگذار است اما پایین بودن درصد حجمی الیاف در نمونه‌ها که به علت انعطاف‌پذیری کم الیاف و محدودیت در فشرده و متراکم سازی آن‌ها با روش دستی می‌باشد، سبب گردیده است که اثر متغیر طول در خواص کششی چشمگیر نباشد.

البته ممکن است وجود نایکنواختی‌های ساختاری در نمونه‌ها ناشی از شیوه دستی تولید کامپوزیت بر این مسأله تأثیرگذار بوده باشد،

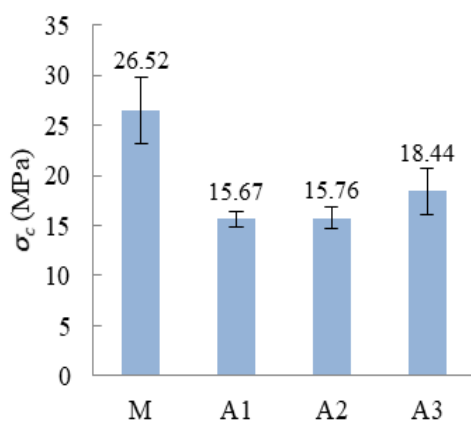


Fig. 6 Effect of fiber length on tensile strength of the samples

شکل 6 اثر طول الیاف بر مقاومت کششی نمونه‌ها

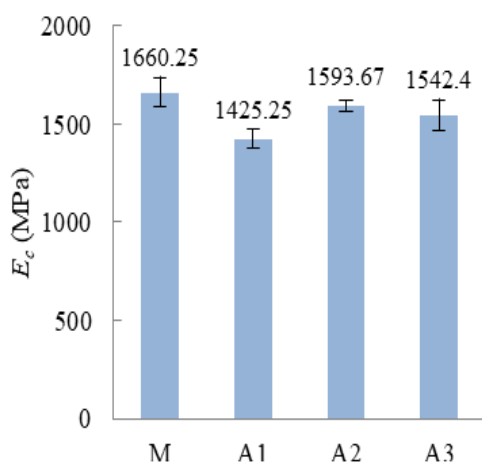


Fig. 7 Effect of fiber length on tensile modulus of the samples

شکل 7 اثر طول الیاف بر مدول کششی نمونه‌ها

<sup>1</sup> Tsai-Pagano

<sup>2</sup> Halpin-Tsai

<sup>3</sup> Void



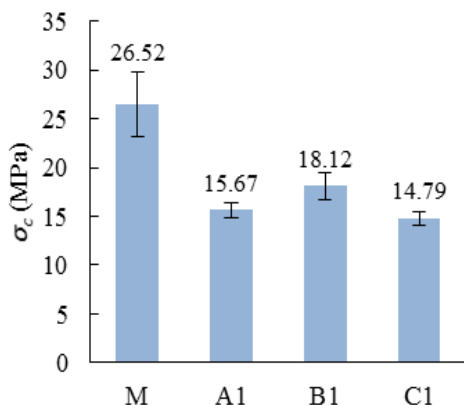


Fig. 9 Effect of fiber volume percentage on tensile strength of the samples

شکل 9 اثر درصد حجمی الیاف بر مقاومت کششی نمونه‌ها

در شکل‌های 10 و 11 به ترتیب اثر درصد حجمی الیاف بر مدول یانگ و کرنش نمونه‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به توضیحات قبل دیده می‌شود که با افزودن الیاف، مدول یانگ نمونه‌ها نسبت به رزین اپوکسی افزایش نمی‌یابد. همچنین با افزودن الیاف، میزان کرنش نسبت به زمینه کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده شکست زود هنگام نمونه‌ها و در نتیجه نرسیدن کامپوزیت به حداکثر توان تحمل بار خود است.

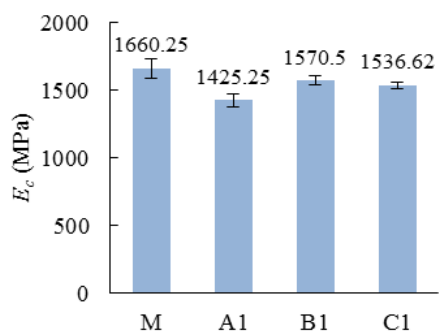


Fig. 10 Effect of fiber volume percentage on tensile modulus of the samples

شکل 10 اثر درصد حجمی الیاف بر مدول کششی نمونه‌ها

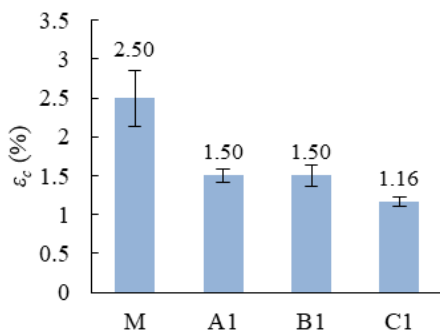


Fig. 11 Effect of fiber length on strain of the samples

شکل 11 اثر طول الیاف بر کرنش شکست نمونه‌ها

در شکل 9 مقادیر مقاومت کششی کامپوزیت بر حسب درصد حجمی الیاف نشان داده شده است. طبق نتایج، افزودن الیاف خرما به رزین اپوکسی باعث بهبود مقاومت کششی کامپوزیت نشده است. در واقع می‌توان گفت به دلیل ماهیت آب‌گریز پلیمرهای مصنوعی و وجود گروه‌های آبدوست در الیاف لیگنوسولوزی، سازگاری ضعیفی بین الیاف طبیعی و پلیمرهای مصنوعی وجود دارد. از این رو ممکن است علت عدم تقویت‌کنندگی الیاف خرما ناشی از چسبندگی ضعیف فصل مشترک لیف/ماتریس باشد که بر لزوم اصلاح سطحی الیاف به منظور حل این مشکل تأکید دارد [16]. لازم به ذکر است خواص کششی لیف خرما به عنوان یک لیف طبیعی در مقایسه با بسیاری از الیاف متداول تقویت‌کننده، به طور قابل‌ملاحظه‌ای پایین‌تر می‌باشد (جدول 1). بنابراین به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن مشکلات دیگر از قبیل چسبندگی ضعیف با ماتریس‌های پلیمری و نایکنواختی‌های ذاتی لیف، افزودن الیاف به ماتریس با درصد‌های حجمی کم، نه تنها خاصیت تقویت‌کنندگی ندارد بلکه به دلیل ایجاد تمرکز تنش اثر تخریبی نیز خواهد داشت. بدیهی است این مسأله با به‌کارگیری روش‌های قالب‌گیری مناسب که امکان دستیابی به مقادیر بالای درصد حجمی را فراهم آورد و یا بهبود خواص سطحی که منجر به بهبود چسبندگی لیف با ماتریس شود تا حد زیادی مرتفع خواهد شد، چراکه لیف خرما به تنهایی دارای مقاومت و مدول کششی بسیار بالاتری نسبت به ماتریس خالص می‌باشد (رجوع شود به جدول 2 و خواص نمونه M در شکل‌های 9 و 10). با این حال با مقایسه نمونه‌های A1، B1 و C1 در شکل 9 مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی الیاف از 4.16 به 7.5 درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و در نمونه‌های حاوی 10.7 درصد الیاف، این مقدار کاهش می‌یابد. دلیل این مسأله می‌تواند افزایش بیش‌ازحد الیاف (درصد مذکور با توجه به شرایط تولید نمونه که قالب‌گیری دستی می‌باشد درصد بالایی بوده است) و در نتیجه نفوذ کمتر رزین در بین آن‌ها و کاهش اتصال و یکپارچگی ماتریس، و در نتیجه شکست زود هنگام کامپوزیت باشد. این پدیده در برخی کارهای گذشته نیز مشاهده شده است [9,8]. به همین دلیل مقاومت کششی در نمونه C1 کمتر از سایر نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف است. در بین نمونه‌های کامپوزیتی، نمونه B1 دارای بیشترین میزان مقاومت کششی است.

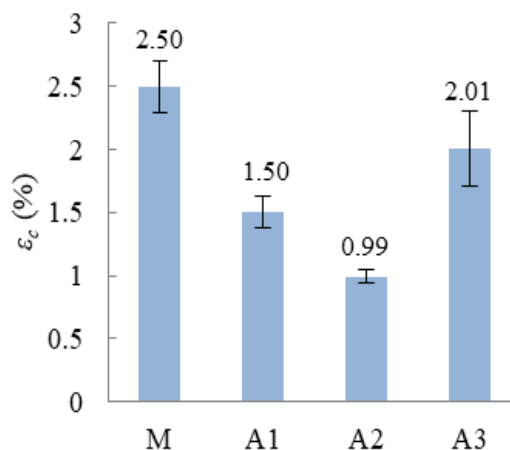


Fig. 8 Effect of fiber length on strain of the samples

شکل 8 اثر طول الیاف بر کرنش شکست نمونه‌ها

مشاهده می‌شود، مقاومت خمشی و مدول خمشی در نمونه B1 (حاوی 7.5 درصد حجمی الیاف) نسبت به اپوکسی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. این مسئله نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزودن لیف خرما در بهبود خواص خمشی است. البته مقاومت خمشی در نمونه A1 (با 4.16 درصد حجمی الیاف) نسبت به رزین خالص کمتر می‌باشد. اثر تخریبی مذکور در مقادیر مدول خمشی نمونه مذکور نیز مشاهده می‌شود. همچنین در نمونه C1 نیز کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه M مشاهده می‌شود. با توجه به مشاهدات تجربی و همان‌گونه که در تحلیل خواص کششی ذکر گردید، دلیل این مسأله می‌تواند افزایش بیش‌ازحد الیاف و تأثیرات منفی بر یکپارچگی ساختاری ماتریس در نمونه‌ها باشد که منجر به شکست زود هنگام کامپوزیت می‌شود [8,9]. با توجه به بالا بودن مقدار مدول خمشی C1 نسبت به M می‌توان دریافت که اضافه نمودن الیاف سبب بهبود سفتی کامپوزیت گردیده است. اما به دلیل شکست زود هنگام نمونه با توجه به دلایل ذکر شده در بالا، مقاومت خمشی به مقدار بیشینه خود نرسیده است. نتایج فوق نشان می‌دهد که میزان بهینه خواص خمشی با شرایط کاری پژوهش در سطح 7.5 درصد حجمی از الیاف به دست می‌آید. همچنین تحلیل واریانس یک‌طرفه داده‌ها نشان داد که در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌داری در مقادیر مقاومت و مدول خمشی وجود دارد. به عبارتی افزودن الیاف خرما با درصد‌های متفاوت بر خواص خمشی کامپوزیت مؤثر است.

با مقایسه نتایج آزمون خمش و کشش ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های حاوی 7.5 درصد حجمی الیاف، مقاومت خمشی نسبت به رزین خالص افزایش اما مقاومت کششی کاهش یافته است. طبق نظریه مقاومت آماری توزیع ویبول، مقاومت بالاتر در خمش نسبت به کشش به دلیل تفاوت در ماهیت تنش است. در آزمون خمش، کامپوزیت به تدریج دچار شکست می‌شود و بیشینه نیروی کششی در وسط نمونه و سطح خارجی آن اتفاق می‌افتد. لذا سطح تحت نیروی بیشینه کششی بسیار کوچک می‌باشد که در نتیجه احتمال وجود حفره و عیوب ساختاری در آن کم است. در حالی که در آزمون کشش تمامی سطح مقطع کامپوزیت تحت تنش یکسان است و وجود هرگونه عیب در ساختار کامپوزیت می‌تواند سبب تمرکز تنش و شروع شکست زود هنگام آن شود [15]. همچنین در تست خمش نیمی از نمونه تحت کشش و نیمی دیگر تحت فشار قرار می‌گیرد. لذا ممکن است الیاف خرما به دلیل صلبیت و انعطاف پذیری کم، تأثیر مطلوبی بر افزایش خواص فشاری نمونه نداشته و از این طریق بر بهبود خواص خمشی نمونه نسبت به رزین خالص تأثیرگذار بوده‌اند.

نتایج حاصل از مقادیر مقاومت و مدول خمشی نمونه‌های A1، A2 و A3 در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است. با توجه تحلیل آماری داده‌ها، اختلاف معنی‌داری بین خواص خمشی نمونه‌های مذکور مشاهده نگردید. در واقع همان‌گونه که در تحلیل خواص کششی نیز مشاهده گردید این مسأله حاکی از تأثیرگذار نبودن طول الیاف بر خواص خمشی می‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف خرما با استفاده از الیاف برش داده شده به طول‌های 1، 2 و 3 سانتی‌متر و با سه سطح از درصد حجمی الیاف با استفاده از روش قالب‌گیری دستی تولید شدند و تحت آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. یافته‌های اصلی پژوهش عبارتند از:

در شکل 12 مقادیر تجربی مدول یانگ کامپوزیت‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه شده است. هر چند نتایج حاکی از انطباق نسبتاً خوب مقادیر تئوری و تجربی است، مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها مقادیر تجربی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده هستند. در این مدل فرض شده است که چسبندگی کامل بین لیف/ماتریس به وقوع پیوسته است. در حالی که در نمونه‌های واقعی کامپوزیت، چسبندگی سطح مشترک بین الیاف خرما و ماتریس کامل نیست. از سوی دیگر وجود حفره در نمونه‌ها و پراکندگی داده‌ها که متأثر از شیوه تولید کامپوزیت و ماهیت نایک‌نواخت الیاف خرما است، سبب اختلاف بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که حتی در نتایج تئوری میزان افزایش مدول الاستیک نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به ماتریس خالص چشمگیر نیست. البته در مقادیر بالاتر از درصد حجمی الیاف طبیعتاً مدول کششی نمونه افزایش بیشتری خواهد داشت، اما به طور کلی به دلیل این که لیف خرما دارای مدول بسیار بالایی نمی‌باشد طبیعتاً افزایش قابل توجه در مدول کششی نمونه‌های کامپوزیتی با ماتریس اپوکسی نسبت به ماتریس خالص که خود مدول نسبتاً مناسبی را در بین ماتریس‌های گرماسخت دارا است، انتظار نمی‌رود.

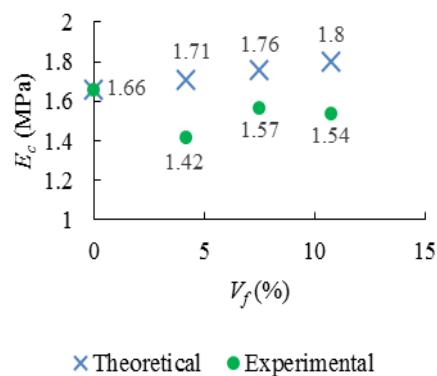


Fig. 12 Experimental and theoretical tensile moduli of the samples

شکل 12 نتایج تجربی و پیش‌بینی شده مدول کششی نمونه‌ها

#### 3-3- مورفولوژی سطح شکست

شکل 13 سطح شکست کامپوزیت‌های اپوکسی/خرما را پس از آزمون کشش نشان می‌دهد. در شکل 13(a-c) پدیده بیرون کشیده شدن لیف<sup>1</sup> در سطح مقطع و جدایی لیف از ماتریس کاملاً مشخص می‌باشد که نمایانگر چسبندگی ضعیف بین لیف و ماتریس اپوکسی است. یکی از عوامل مهم در کاهش چسبندگی سطحی بین لیف و ماتریس وجود لایه واکسی روی الیاف است که در شکل 13(b) مشاهده می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد سازگاری ضعیف بین الیاف طبیعی و اکثر ماتریس‌های پلیمری مصنوعی و در نتیجه چسبندگی ضعیف فصل مشترک لیف/ماتریس در مواد کامپوزیتی سبب شده است اصلاح سطحی الیاف به روش‌های مختلف شیمیایی و فیزیکی به عنوان یکی از راه‌های حل این مشکل مد نظر قرار گیرد. البته لازم به ذکر است این روش‌ها غالباً موجب افزایش قیمت تمام شده کامپوزیت شده و بعضاً نگرانی‌های زیست‌محیطی را نیز به همراه دارند.

#### 4-3- خواص خمشی

میانگین مقاومت خمشی و مدول خمشی نمونه‌های A1، B1، C1 به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که

<sup>1</sup> Fiber pull-out

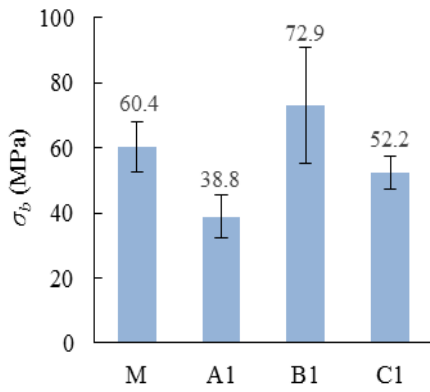


Fig. 14 Effect of fiber volume percentage on flexural strength of the samples

شکل 14 اثر درصد حجمی الیاف بر مقاومت خمشی نمونه‌ها

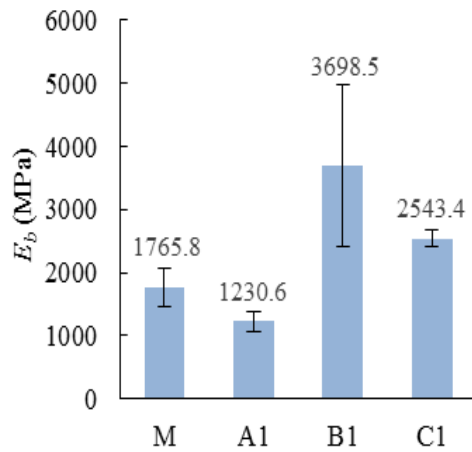


Fig. 15 Effect of fiber volume percentage on flexural modulus of the samples

شکل 15 اثر درصد حجمی الیاف بر مدول خمشی نمونه‌ها

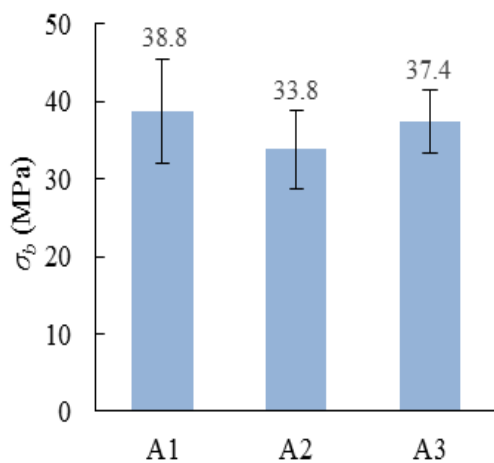


Fig. 16 Effect of fiber length on flexural strength of the samples

شکل 16 اثر طول الیاف بر مقاومت خمشی نمونه‌ها

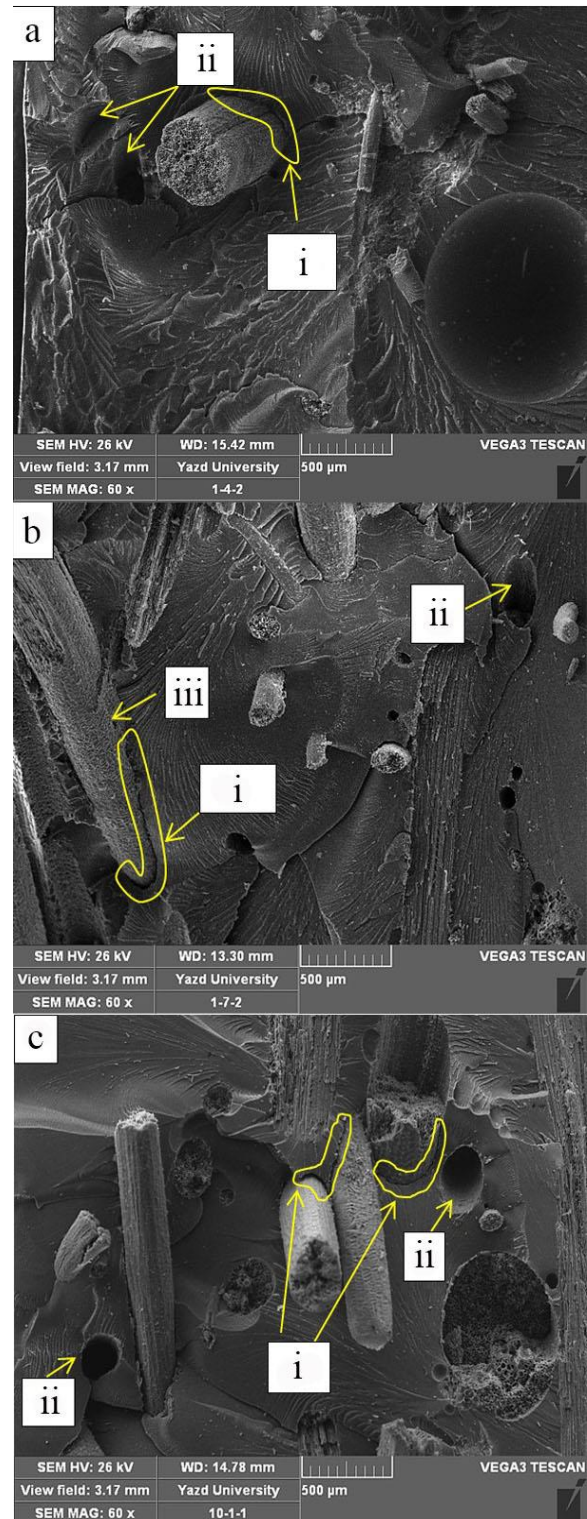


Fig. 13 SEM images of fracture surface after tensile test; a) Sample A1, b) Sample B1, c) Sample C1, i) Fiber/matrix debonding region, ii) Fiber pull-out, iii) wax layer

شکل 13 تصاویر SEM سطح شکست پس از آزمون کشش؛ (a) نمونه A1، (b) نمونه B1، (c) نمونه C1، i) ناحیه جدایی الیاف از ماتریس، ii) بیرون کشیده شده الیاف از ماتریس، iii) لایه واکسی



- Its Composites" In Biomass and bioenergy, Springer International Publishing, pp. 1-25, 2014.
- [5] Al-Oqla, F. M. and Sapuan, S. M., "Natural Fiber Reinforced Polymer Composites in Industrial Applications: Feasibility of Date Palm Fibers for Sustainable Automotive Industry" Journal of Cleaner Production, Vol. 66, pp. 347-354, 2014.
- [6] Agoudjil B, B. A. Boudenne, A. Ibos, L. Fois, M., " Renewable Materials to Reduce Building Heat Loss: Characterization of Date Palm Wood" Energy Build, Vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [7] Abdal-Hay, A. Suardana, N. P. G. Jung, D. Y. Choi, K. S. and Lim, J. K., " Effect of Diameters and Alkali Treatment on the Tensile Properties of Date Palm Fiber Reinforced Epoxy Composites" International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, pp. 1199-1206, 2012.
- [8] Asadzadeh, M., "Bending Properties of Date Palm Fiber and Jute Fiber Reinforced Polymeric Composite" International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology ,Vol. 5, No. 4, pp. 59-63, 2012.
- [9] Al-Kaabi, K. Al-Khanbashi, A. and Hammami, A., "Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: DPF/Polyester Composite Properties" Polymer Composites, Vol. 26, No. 5, pp. 604-613, 2005.
- [10] Rafeeq, S. N. Abdulmajeed, I. M. and Saeed, A. R., "Mechanical and Thermal Properties of Date Palm Fiber and Coconut Shell Particulate Filler Reinforced Epoxy Composite" Indian Journal Of Applied Research, Vol. 3, No. 4, pp. 89-92, 2013.
- [11] Hasan, A. M., "Investigation on Thermal and Acoustic Properties of Hybrid Polymer Composite Reinforced by Date Palm Fibers and Rice Husks as a Construction Material" Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, Vol. 19, No. 1, pp. 56-65, 2017.
- [12] Boumhaout, M. Boukhattem, L. Hamdi, H. Benhamou, B. and Nouh, F. A., "Thermomechanical Characterization of a Bio-Composite Building Material: Mortar Reinforced with Date Palm Fibers Mesh" Construction and Building Materials, Vol. 135, pp. 241-250, 2017.
- [13] Saleh, M. A. Al Haron, M. H. Saleh, A. A. and Farag, M. "Fatigue Behavior and Life Prediction of Biodegradable Composites of Starch Reinforced with Date Palm Fibers" International Journal of Fatigue, Vol. 103, pp. 216-222, 2017.
- [14] Alawar, A. Hamed, A. M. and Al-Kaabi, K., "Characterization of Treated Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement" Composites Part B, Vol. 40, pp. 601-606, 2009.
- [15] Ibrahim, H. Farag, M. Megahed, H. and Mehanny, S., "Characteristics of Starch-Based Biodegradable Composites Reinforced with Date Palm and Flax Fibers" Carbohydrate Polymers, Vol. 101, pp. 11-19, 2014.
- [16] Gholami, M. Ahmadi, M. S. Tavanaie, M. A. Khajeh Mehrizi, M., "Mechanical Properties of Date Palm Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review " Polymerization, Vol. 7, No. 1, pp. 83-94, 2017 (in Persian)

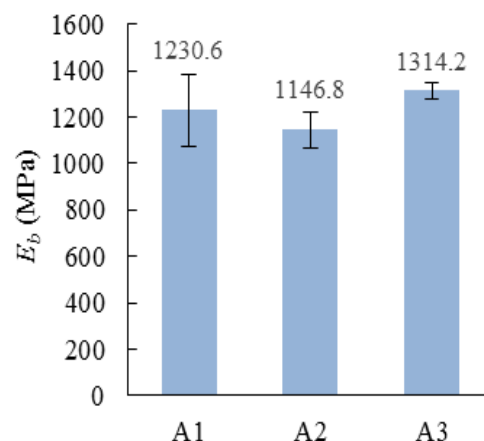


Fig. 17 Effect of fiber length on flexural modulus of the samples

شکل 17 اثر طول الیاف بر مدول خمشی نمونه‌ها

- طول الیاف در محدوده متغیرهای پژوهش اثر معناداری بر خواص کششی و خمشی نداشت.
- به‌طور کلی افزودن الیاف خرما در شرایط کاری پژوهش سبب بهبود مقاومت کششی کامپوزیت نسبت به ماتریس خالص نگردید.
- افزودن 7.5 درصد حجمی الیاف خرما سبب بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت گردید. در درصد حجمی بالاتر (10.7 درصد) افت مقاومت خمشی به علت افزایش بیش‌ازحد الیاف و در نتیجه نفوذ کمتر رزین در بین آن‌ها و کاهش اتصال و یکپارچگی ماتریس اتفاق افتاد.
- علیرغم اینکه لیف خرما نسبت به بسیاری از الیاف متداول تقویت‌کننده دارای خواص کششی ضعیف‌تری می‌باشد اما در مقایسه با اکثر ماتریس‌های متداول خواص به‌مراتب بالاتری دارد که این مسأله نشان‌دهنده قابلیت این لیف در تقویت کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشد. لذا در صورت رفع برخی مشکلات از قبیل محدودیت در افزایش درصد حجمی الیاف که ناشی از انعطاف‌پذیری کم لیف می‌باشد، استفاده از سایر روش‌های تولید مانند قالب‌گیری تزریقی و یا تحت خلأ و همچنین بهبود خواص سطحی به‌منظور بهبود چسبندگی لیف - ماتریس، می‌توان به یافتن کاربردی صنعتی برای این لیف که در حال حاضر به‌طور معمول به‌صورت ضایعات دور ریخته شده و یا به‌صورت محدود در صنایع دستی بومی استفاده می‌شود، کمک کرد.

## 5- مراجع

- [1] Alsaheed, T. Yousif, B. F. and Ku, H., "The Potential of Using Date Palm Fibres as Reinforcement for Polymeric Composites" Materials and Design, Vol. 43, pp. 177-184, 2013.
- [2] John, M. J. and Thomas, S., "Biofibres and biocomposites" Carbohydrate Polymers, Vol. 71, pp. 343-364, 2008.
- [3] Shalwan, A. and Yousif, B., "Investigation on Interfacial Adhesion of Date Palm/Epoxy Using Fragmentation Technique" Materials & Design, Vol. 53, pp. 928-937, 2014.
- [4] AL-Oqla, F. M. Alothman, O. Y. Jawaid, M. Sapuan, S. M. and Es-Saheb, M. H., "Processing and Properties of Date Palm Fibers and

