

Mechanical Properties of Date Palm Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review

Polymerization
Quarterly, 2017
Volume 7, Number 1
Pages 82-93
ISSN: 2252-0449

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

Department of Textile Engineering, Yazd University,
Postal code: 89195-741, Yazd, Iran

Received: 27 May 2016, Accepted: 21 August 2016

Abstract

Nowadays, plant originated fibers have received much attention in many industrial applications, especially in fiber-reinforced composites, due to their potential in solving emerging problems concerning the living environment and shortage of oil resources. Natural fibers are lightweight, low cost, eco-friendly, renewable and biodegradable, in some cases, therefore, they can be used as alternatives to mineral and glass fibers for production of lightweight composite structures. In recent years, a number of research works have been done on date palm fibers as reinforcing agents in thermoset and thermoplastic composites. These fibers are usually discarded as agricultural wastes in annual pruning. Therefore, their utilization in composite industry can result in manufacturing cost-effective products. This study is a review on mechanical properties of date palm fiber reinforced composites studied and published by researchers to date. According to the results, surface modification of date palm fibers and improvement in interfacial adhesion increase tensile and flexural properties of the composites reinforced with these fibers. Also, weight fraction and fiber distribution are two important factors that influence mechanical properties of the composites. In this work, an attempt is made to collect information and to highlight previous works done in this field in order to provide a comprehensive literature for researchers to pave the way in their further studies.

Keywords

natural fiber composite,
date palm fibers,
mechanical properties,
surface modification,
interfacial adhesion

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ms.ahmadi@yazd.ac.ir

مروری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف نخل خرما

مریم غلامی، محمد صالح احمدی*، محمدعلی توانایی، محمد خواجه مهریزی

یزد، دانشگاه یزد، گروه مهندسی نساجی، کد پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

دریافت: ۱۳۹۵/۳/۷، پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۳۱

امروزه به علت بروز مشکلات زیست‌محیطی و کمبود منابع نفتی، الیاف گیاهی در بسیاری از کاربردهای صنعتی، به ویژه تقویت کامپوزیت‌ها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این دسته از الیاف را به واسطه دارا بودن خواصی نظیر سبکی، قیمت کم، سازگاری خوب با محیط زیست، تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری به‌عنوان جایگزین الیاف معدنی و شیشه در ساختارهای کامپوزیتی سبک می‌توان استفاده کرد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی درباره الیاف نخل خرما با کاربرد تقویت‌کنندگی در کامپوزیت‌های پلیمری گرمانرم و گرماسخت انجام شده است. این الیاف معمولاً در هرس‌های سالیانه درخت به شکل ضایعات دور ریخته می‌شوند. بنابراین، بهره‌گیری از آن‌ها در صنعت کامپوزیت می‌تواند به تولید محصولاتی با صرفه اقتصادی زیاد منجر شود. در کار حاضر، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف نخل خرما مرور می‌شود که توسط پژوهشگران انجام شده است. طبق نتایج، اصلاح سطحی الیاف نخل خرما و بهبود چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس سبب تقویت خواص کششی و خمشی کامپوزیت می‌شود. همچنین، درصد وزنی و نحوه توزیع الیاف نخل خرما در کامپوزیت از عوامل مهم در خواص مکانیکی آن است. در این مقاله سعی شده است با گردآوری اطلاعات و اشاره به پژوهش‌های پیشین، منبعی کامل در اختیار پژوهشگران قرار گیرد تا مسیر پژوهش را در مطالعات آتی هموار سازد.

بسپارش
فصلنامه علمی-ترویجی
سال هفتم، شماره ۱
صفحه ۸۲-۹۳، ۱۳۹۶
ISSN: 2252-0449

چکیده



مریم غلامی



محمد صالح احمدی



محمدعلی توانایی



محمد خواجه مهریزی

واژگان کلیدی

کامپوزیت الیاف طبیعی،
الیاف نخل خرما،
خواص مکانیکی،
اصلاح سطحی،
چسبندگی بین سطحی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

ms.ahmadi@yazd.ac.ir

مقدمه

امروزه دانشمندان بر این باورند که استفاده از منابع متداول انرژی مانند نفت، زغال و گاز طبیعی به شدت بر تغییرات آب‌وهوا مؤثر است. از این رو، امکان جایگزینی مواد مصنوعی، که منشأ نفتی دارند، با مواد طبیعی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین دلایل این جایگزینی، زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری مواد طبیعی و همچنین کاهش مصرف انرژی است که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از قبیل کربن‌دی‌اکسید را به همراه دارد [۱].

الیاف شیشه و کربن از متداول‌ترین الیاف تقویت‌کننده در ساختارهای کامپوزیتی به‌شمار می‌روند. این کامپوزیت‌ها با وجود دارا بودن خواص مکانیکی بسیار خوب، به دلیل عدم زیست‌تخریب‌پذیری، موجب آلودگی محیط می‌شوند. از این رو، استفاده از الیاف طبیعی در تولید کامپوزیت‌های پلیمری مورد توجه قرار گرفته است [۲،۳]. الیاف بامبو، سیسال، جوت، کتان و شاه‌دانه از جمله الیاف شناخته شده در تولید زیست‌کامپوزیت‌ها هستند [۴]. الیاف طبیعی به دلیل دارا بودن چگالی کمتر، مقاومت الکتریکی بیشتر، شرایط کاری بهتر برای کارگران، عایق بودن در برابر گرما و صدا، هزینه نسبتاً کمتر، استحکام ویژه قابل قبول، سفتی زیاد، عدم ایجاد آثار التهابی روی پوست، منابع فراوان و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدشوندگی بر الیاف مصنوعی برتری دارند [۵-۹]. البته الیاف طبیعی در کنار این مزایا، معایبی نیز دارند. ماهیت آب‌دوست و چسبندگی ضعیف بین سطحی لیف-ماتریس، جذب رطوبت، ناهمگونی در خواص و پایداری گرمایی کم از جمله مهم‌ترین مشکلات استفاده از این الیاف در کامپوزیت‌های پلیمری است [۲،۶،۱۰]. همچنین، خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی قسمت‌های مختلف یک گیاه می‌تواند در اثر شرایط رشد (آب‌وهوا و مقدار بارش در الیاف گیاهی)، دارای نایکنواختی و پراکندگی زیاد باشد [۱۱]. اصلاح سطحی الیاف طبیعی به کمک روش‌های فیزیکی یا شیمیایی در بهبود چسبندگی بین‌سطحی لیف-ماتریس مؤثر است [۱۲].

الیاف گیاهی را می‌توان در پنج گروه طبقه‌بندی کرد: الیاف ساقه‌ای (مانند رامی، جوت، کتان و کف)، الیاف برگ‌ی (مانند آناناس، موز و سیسال)، الیاف دانه‌ای (مانند پنبه و نارگیل)، علف و الیاف نی‌مانند (مانند گندم، برنج و ذرت) و سایر انواع چوب و ریشه‌ها [۱۱، ۱۳]. در چند سال اخیر، پژوهش‌هایی درباره الیاف نخل خرما و استفاده از آن در کامپوزیت‌های پلیمری انجام شده است. مطابق گزارش وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۰، مهم‌ترین استان‌های تولیدکننده خرما در ایران به ترتیب کرمان (به همراه

مناطق جیرفت و کهنوج)، بوشهر، خوزستان، سیستان و بلوچستان، فارس و هرمزگان هستند [۱۴]. بنابراین، ایران پتانسیل بالقوه‌ای برای استفاده از الیاف نخل خرما در تولید انواع کامپوزیت‌ها دارد. به‌منظور برداشت خرما با کیفیت مناسب، باید نخل خرما سالانه هرس شود. ضایعات حاصل از هرس هر نخل به‌طور متوسط در حدود ۱۷ kg تا ۳۴ kg است. در جدول ۱ درصد اجزای مختلف موجود در ضایعات هر درخت نخل ارائه شده است [۱۵]. البته مقدار ضایعات قابل جمع‌آوری کمتر از این مقدار بوده و حداکثر به ۲۰ kg تا ۲۵ kg در سال برای هر اصله نخل محدود می‌شود [۱۵]. این ضایعات با وجود آنکه منابع خوبی برای سلولوز، لیگنین و همی سلولوز هستند، در هیچ یک از فرایندهای زیستی یا کاربردهای صنعتی استفاده نمی‌شوند و عموماً سوزانده می‌شوند [۱۶]. از این رو، با به‌کارگیری این الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده می‌توان از ماده‌ای کم‌ارزش و ارزان، محصولی با ارزش افزوده زیاد تولید کرد.

متأسفانه تاکنون مقالات محدودی در زمینه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف نخل خرما به چاپ رسیده است. در این مقاله سعی شده است با وجود اطلاعات آماری اندک، با گردآوری مقالات چاپ شده در حوزه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف نخل خرما، به معرفی این لیف طبیعی و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با آن پرداخته شود.

الیاف نخل خرما

درخت خرما عضوی از خانواده نخل (*Phoenix dactylifera*) است که معمولاً در خاورمیانه، شمال آفریقا، جزایر قناری، پاکستان، هند و آمریکا (کالیفرنیا) یافت می‌شود [۶]. نخل با شرایط آب و هوایی مختلف سازگار است. به‌نحوی که محدوده دمایی بین ۶°C- (در مدت کوتاه) تا ۵۰°C را تحمل می‌کند و نسبت به شوری آب و خاک نیز مقاوم است [۱۷]. درختان خرما در مقایسه با بسیاری از درختان دیگر، ارتفاع بیشتری دارند و طول آن‌ها به ۱۶ m تا ۲۰ m جدول ۱- درصد ضایعات هر درخت نخل [۱۵].

نسبت جزء به کل ضایعات یک درخت (%)	مقدار (kg)	اجزا
۵۲/۹۴	۱۸	شاخه
۱۷/۶۵	۶	خوشه
۲۰/۵۹	۷	دسته منتهی به خوشه
۸/۸۲	۳	سیس
۱۰۰	۳۴	جمع

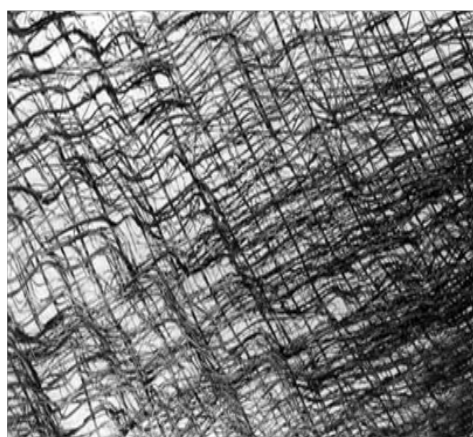
از آن برای تهیه سبد و حصیر و سایر کارهای دستی به کار می‌رود [۲۳]. در شکل ۱ نخل خرما و الیاف موجود در ساقه آن مشاهده می‌شود [۲۴]. طبق گزارش‌های پژوهشگران، با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب الیاف نخل خرما، می‌توان از آن در تولید کامپوزیت‌های پلیمری گرمانرم یا گرماسخت، به‌عنوان تقویت‌کننده یا پرکننده استفاده کرد.

طول الیاف، درصد وزنی الیاف نخل خرما و نحوه توزیع آن بر خواص مکانیکی نهایی کامپوزیت مؤثر است. همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، الیاف نخل خرما استوانه‌ای شکل هستند. سطح آن‌ها حاوی مقادیر زیادی الیاف نیمه‌رشد یافته و ناخالصی‌های مصنوعی (گردوغبار) است. همچنین، لایه مومی سرتاسر سطح لیف را می‌پوشاند [۲۵-۲۷]. با توجه به شکل ۲-ب، لیف نخل خرما مجموعه‌ای از الیاف چندسلولی بوده که هر لیف دارای یک حفره مرکزی است. قطر هر یک از این الیاف چندسلولی حدود $2\ \mu\text{m}$ تا $5\ \mu\text{m}$ است [۲۸]. ساختار و شکل الیاف نخل خرما بسیار شبیه به الیاف نارگیل است. مطالعات انجام شده در باره الیاف نارگیل نشان می‌دهد، لایه خارجی از جنس لیگنین، الیاف چندسلولی را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و حذف آن می‌تواند موجب بهبود پیوند بین لیف و ماتریس شود [۲۸]. ساختار شیمیایی الیاف طبیعی، از پارامترهای مهم در کاربرد آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌هاست.

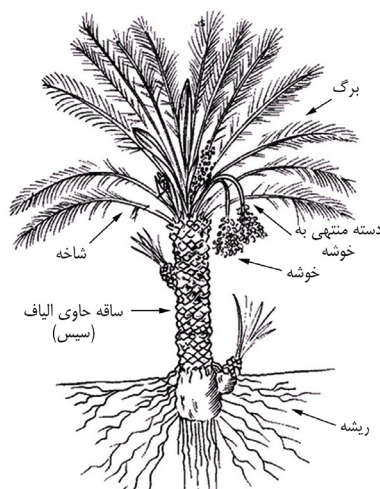
از این‌رو، برخی ویژگی‌های این دسته از کامپوزیت‌ها مانند زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدشوندگی، مقاومت در برابر حمله قارچ‌ها و غیره به‌شدت به ساختار شیمیایی الیاف یا پرکننده‌ها وابسته است [۲۹،۳۰]. الیاف گیاهی به‌طور عمده حاوی لیفچه‌های

می‌رسد. درخت خرما دارای ریشه‌ای اصلی است که در یکی دو سال اول زندگی چند برابر قسمت هوایی آن رشد می‌کند و در اعماق زمین فرو می‌رود. شاید یکی از علل مقاومت این گیاه به خشکی زیاد و کم‌آبی، عمیق بودن ریشه آن باشد [۱۸]. برگ‌های درخت خرما پهن و بلند هستند. عمر درخت خرما نزدیک به صد سال است ولی در شرایط مساعد ممکن است به دویست سال هم برسد [۱۸].

تولید صنعتی خرما در بسیاری از کشورها مانند مصر (۱,۳۵۲,۹۵۰ ton)، عربستان سعودی (۱,۰۷۸,۳۰۰ ton) و ایران (۱,۰۲۳,۱۳۰ ton) وجود دارد [۱۶،۱۹]. بر طبق آمار فائو، کشور ایران در سال ۲۰۱۲ بعد از مصر دومین کشور تولیدکننده خرماست [۲۰]. سهم ایران از تولید جهانی محصول از ۱۳/۴٪ در سال ۲۰۰۰ به ۱۴/۱٪ در سال ۲۰۱۲ ارتقا یافته است [۱۷]. کشورهای عربستان، الجزایر، عراق و پاکستان نیز به ترتیب با دارا بودن سهمی معادل ۱۳/۹، ۱۰/۵، ۸/۶ و ۷/۹٪ از تولید در مقام‌های سوم تا ششم تولید خرما در جهان قرار دارند [۱۷]. بر اساس آمار منتشر شده بیش از ۲۵۶ هزار هکتار از اراضی کشور زیر کشت این محصول است [۲۱]. در کشور به‌طور متوسط یک میلیون تن خرما در سال تولید می‌شود و نواحی جنوبی کشور نظیر خوزستان و سیستان و بلوچستان به کشت آن اختصاص دارد. ساقه درخت نخل از الیاف متقاطع با قطرهای متفاوت پوشیده شده است که مانند بافت تار-پودی از میان یکدیگر عبور کرده‌اند. در استان بوشهر این الیاف، لیف و در جیرفت و بم به ترتیب سیس و سی‌سی نامیده می‌شوند [۲۲]. متأسفانه در کشور به مسئله استفاده کامل از چوب و برگ درخت نخل توجه نشده است. در حال حاضر، تنها درصد کمی

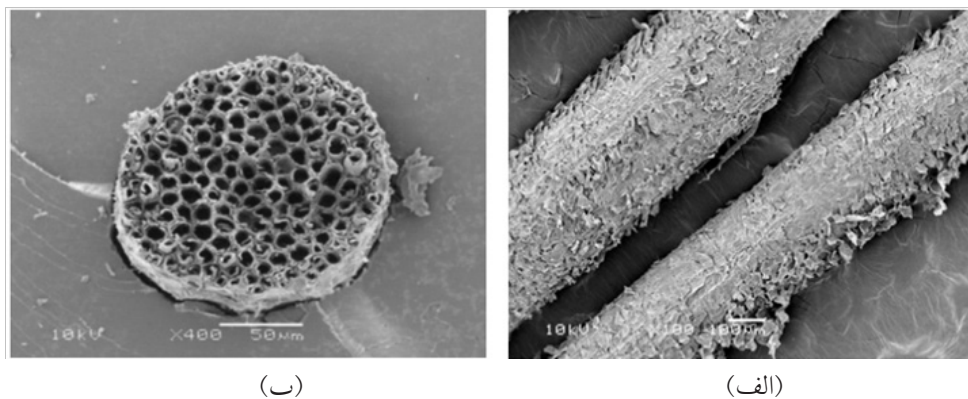


(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) نمایی از درخت نخل و (ب) الیاف ساقه درخت نخل [۲۴].



(ب)

(الف)

شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی از سطح الیاف نخل خرما: (الف) سطح طولی لیف و (ب) سطح مقطع عرضی لیف [۲۸].

چگالی الیاف نخل خرما در حدود $0.917 \pm 0.127 \text{ g/cm}^3$ بوده که در حدود ۶۰٪ کمتر از چگالی الیاف شیشه است [۳۴]. در دمای 28°C و رطوبت نسبی ۵۰٪، جذب رطوبت الیاف حاصل از برگ درخت خرما ۱۰/۶۷٪ و الیاف حاصل از بافت اطراف ساقه درخت ۹/۵۵٪ است [۳۶]. جدول ۴ مقایسه خواص مکانیکی الیاف نخل خرما با سایر الیاف طبیعی و مصنوعی را نشان می‌دهد [۲،۳،۳۷].

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف نخل خرما

بخش عمده‌ای از ترکیبات شیمیایی الیاف طبیعی، سلولوز و لیگنین است. مقدار سلولوز سهم مهمی در خواص مکانیکی دارد که این خواص به عوامل متعددی مانند طول الیاف، درصد وزنی الیاف، نسبت طول به قطر الیاف، نحوه توزیع الیاف و چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس وابسته است [۲،۳۸]. در جدول ۵ گزارشی از پژوهش‌های انجام شده در باره کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف نخل خرما درج شده است.

سلولوزی هستند که در ماتریس لیگنین احاطه شده‌اند. در این الیاف، هر دیواره سلولی دارای سه جزء اصلی به نام‌های سلولوز، همی سلولوز و لیگنین است [۳۱-۳۳]. در جدول ۲ متوسط درصد وزنی ترکیبات شیمیایی برخی الیاف طبیعی مشاهده می‌شود [۲۹]. در مقایسه با سایر الیاف طبیعی مقدار زیاد سلولوز (۴۶٪) در الیاف نخل خرما نشان‌دهنده استحکام آن است. یادآور می‌شود، تجزیه شیمیایی الیاف نخل خرما می‌تواند تحت تأثیر شرایط کشت و پارامترهای کشاورزی مانند کیفیت خاک، شرایط آب‌وهوا و غیره قرار گیرد [۳۴].

جدول ۳ نتایج گزارش پژوهشگران را درباره خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف نخل خرما نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، داده‌های ارائه شده دارای پراکندگی زیادی بوده که نشان‌دهنده نایکنواختی خواص در انواع لیف نخل خرماست. این نایکنواختی می‌تواند ناشی از کیفیت خاک، موقعیت لیف در گیاه، نژاد گیاه، سن، شرایط آب و هوایی و زمان برداشت باشد [۱۶،۳۵].

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الیاف نخل خرما [۲۹].

ماده	سلولوز	لیگنین	همی سلولوز	مقدار رطوبت (%)	سایر
درصد وزنی	۴۶	۲۰	۱۸	۵	۱۱

جدول ۳- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف نخل خرما.

مرجع	قطر (μm)	طول (mm)	چگالی (g/cm^3)	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ازدیاد طول (%)
۲۷	۱۰۰-۱۰۰۰	-	-	۵۸-۲۰۳	۲-۵/۷	۵-۱۰
۱۶ و ۳۴	-	۲۰-۲۵۰	۰/۹-۱/۲	۹۷-۲۷۵	۲/۵-۱۲	۲-۱۹
۲۸	۱۰۰-۱۰۰۰	-	۰/۹	۱۷۰-۲۷۵	۵-۱۲	۵-۱۰

کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت

Wazzan اثر درصد حجمی و نحوه توزیع الیاف نخل خرما بر خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌استر را بررسی کرده است [۴۴]. در این پژوهش، در برخی نمونه‌ها الیاف با توزیع تک‌جهتی و در سایر نمونه‌ها به شکل پارچه در کامپوزیت استفاده شدند. طبق نتایج با افزایش درصد حجمی الیاف، استحکام کششی، ازدیاد طول و مدول کامپوزیت در تمام نمونه‌ها افزایش یافته است. اما کامپوزیت‌های دارای الیاف تک‌جهتی مقادیر بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های حاوی پارچه نشان می‌دهند.

در کامپوزیت‌های دارای پارچه، آرایش نیمی از الیاف در جهت مخالف است و در نتیجه استحکام آن نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف تک‌جهتی، کمتر است. نتایج آزمون ضربه نیز نشان می‌دهد، با افزایش درصد حجمی الیاف مقدار انرژی آغاز شکست ترک (crack fracture initiation energy) و عامل شدت تنش بحرانی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، میزان کاهش این مقادیر در نمونه‌های دارای پارچه در مقایسه با نمونه‌های حاوی الیاف تک‌جهتی بیشتر است. Al-Kaabi و همکار قابلیت استفاده از الیاف نخل خرما را به‌عنوان تقویت‌کننده در ماتریس پلی‌استر بررسی کرده‌اند [۲۶]. در این پژوهش، آرایش یافتگی الیاف به طور تصادفی بوده و نمونه‌های

کامپوزیت به روش قالب‌گیری تولید شده است. طبق نتایج، خواص کامپوزیت به‌شدت تحت تأثیر طول و درصد وزنی الیاف قرار دارد. استحکام خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۲ cm، ۲۶٪ بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۰/۵ cm است. همچنین، کامپوزیت‌های دارای الیاف به طول ۱ و ۳ cm استحکام خمشی کمتری نسبت به الیاف دارای طول ۲ cm نشان می‌دهند.

مدول خمشی کامپوزیت‌های دارای الیاف نخل خرما به طول ۲ cm حدود ۱۷٪ بیش از نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۰/۵ cm است. با افزایش درصد وزنی الیاف از ۶٪ تا ۹٪، استحکام خمشی افزایش می‌یابد. البته در نمونه‌های ۱۰٪ وزنی الیاف، کاهش استحکام خمشی مشاهده شده است که دلیل آن تماس بیشتر الیاف با یکدیگر و در نتیجه پیوند کمتر لیف-ماتریس و انتقال تنش کمتر بین لیف-ماتریس گزارش شده است. Rafeeq و همکاران خواص مکانیکی و گرمایی کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف نخل خرما و ذرات پوسته نارگیل را به‌عنوان پرکننده را مطالعه کردند [۴۷]. در این پژوهش، الیاف نخل خرما موجود در تنه درخت، بدون جداسازی از یکدیگر استفاده شده‌اند. کامپوزیت‌ها به روش دستی تولید شده و درصد وزنی ماتریس در کلیه نمونه‌ها ۸۰٪ بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده، کامپوزیت اپوکسی-الیاف نخل خرما مدول

جدول ۴- خواص مکانیکی برخی الیاف طبیعی و مصنوعی [۲،۳،۳۷].

الیاف	چگالی (g/cm ³)	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
پنبه	۱/۵-۱/۶	۷/۰-۸/۰	۲۸۷-۵۹۷	۵/۵-۱۲/۶
کنف	۱/۴۵	۱/۶	۹۳۰	۵۳
آناناس	۱/۵۶	۲/۴	۱۷۰-۱۶۲۷	۶۰-۸۲
جوت	۱/۳	۱/۵-۱/۸	۳۹۳-۷۷۳	۲۶/۵
نخل خرما	۰/۹-۱/۲	۲-۱۹	۱۷۰-۲۷۵	۵-۱۲
کتان	۱/۵	۲/۷-۳/۲	۳۴۵-۱۰۳۵	۲۷/۶
شاه‌دانه	-	۱/۶	۶۹۰	-
رامی	-	۳/۶-۳/۸	۴۰۰-۹۳۸	۶۱/۴-۱۲۸
سیسال	۱/۵	۲/۰-۲/۵	۵۱۱-۶۳۵	۹/۴-۲۲/۰
نارگیل	۱/۲	۳۰/۰	۱۷۵	۴/۰-۶/۰
شیشه E	۲/۵	۲/۵	۲۰۰۰-۳۵۰۰	۷۰/۰
شیشه S	۲/۵	۲/۸	۴۵۷۰	۸۶/۰
آرامید	۱/۴	۳/۳-۳/۷	۳۰۰۰-۳۱۵۰	۶۳/۰-۶۷/۰
کربن	۱/۴	۱/۴-۱/۸	۴۰۰۰	۲۳۰-۲۴۰

جدول ۵- گزارشی از مطالعات انجام شده در باره کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف نخل خرما.

منبع	ماتریس	تقویت‌کننده
۶ و ۳۹	اپوکسی	الیاف عمل‌آوری شده با سود
۴۰	PP/EPDM	الیاف عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده نخل خرما و جوت
۴۱	اپوکسی	برگ نخل
۲۶	پلی استر	الیاف عمل‌آوری نشده و شده به روش قلیایی و سفیدگری
۴۲	PP/EPDM	الیاف عمل‌آوری شده و نشده
۴۳	پلی استر با گرانروی زیاد و کم	الیاف عمل‌آوری نشده و شده با قلیا و سیلان
۴۴	پلی استر	الیاف عمل‌آوری نشده
۴۵	اپوکسی	الیاف عمل‌آوری شده با سود
۴۶	فنول فرمالدهید-بیس فنول	برگ نخل
۴۷	اپوکسی	الیاف نخل خرما و ذرات پوسته نارگیل
۴۸	پلی پروپیلن	الیاف نخل خرما و نارگیل عمل‌آوری شده با نمک دی‌آزونیوم بنزن
۴۹	پلی استر و اپوکسی	الیاف عمل‌آوری شده با استیک و مالئیک انیدرید
۵۰	پلی اتیلن سنگین	الیاف خالص سازی شده

الیاف نخل خرماست.

Haque و همکاران اثر درصد وزنی الیاف را بر خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف نخل خرما-پلی پروپیلن بررسی کرده‌اند [۴۸]. با افزایش درصد وزنی الیاف به مقدار ۳۵٪، استحکام کششی و مدول یانگ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. دلیل کاهش استحکام کششی، گسترش نواحی ضعیف بین‌سطحی در لیف-ماتریس به سبب افزایش درصد وزنی الیاف گزارش شده است. استحکام خمشی و ضربه‌ای کامپوزیت نیز با افزایش درصد وزنی الیاف تا مقدار ۳۰٪ سیر صعودی و در بازه ۳۰٪ تا ۳۵٪ سیر نزولی پیدا می‌کند. استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف به ماهیت لیف و چسبندگی بین‌سطحی لیف-ماتریس وابسته است. افزایش درصد وزنی الیاف، احتمال تراکم آن‌ها را بیشتر می‌کند و در نتیجه نواحی در معرض تنش، به انرژی کمتری برای گسترش ترک نیاز دارند [۴۸،۵۱]. غفارزاده و همکاران برخی مشخصه‌های کامپوزیت‌های تهیه شده از الیاف نخل خرما خالص سازی شده را گزارش کرده‌اند [۵۰]. الیاف خالص سازی شده با نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ وزنی در دو اندازه ریز و درشت با پلی اتیلن سنگین مخلوط و نمونه‌های کامپوزیتی به شیوه قالب‌گیری تزریقی تهیه شدند. طبق نتایج، با افزایش درصد وزنی الیاف، مقدار استحکام و مدول کششی و درصد جذب رطوبت کامپوزیت افزایش یافته، ولی

خمشی بیشتری در مقایسه با اپوکسی خالص دارد و افزودن پرکننده این مقدار را افزایش می‌دهد. این در حالی است که نمونه‌های حاوی اپوکسی-پرکننده بیشترین مقدار مدول خمشی را نشان می‌دهند.

کامپوزیت‌های پلیمری گرمانرم

اسدزاده و همکاران خواص خمشی کامپوزیت‌های PP/EPDM تقویت‌شده با الیاف نخل خرما و جوت را بررسی کرده‌اند [۴۰]. طبق نتایج با ازدیاد درصد وزنی الیاف، استحکام خمشی کامپوزیت افزایش می‌یابد. در نمونه حاوی ۲۰٪ وزنی الیاف نخل خرما، استحکام خمشی به مقدار ۸/۳٪ بهبود یافته است. با افزایش درصد وزنی الیاف نخل خرما به مقدار ۳۰٪، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که ناشی از انتقال کمتر تنش بین الیاف و ماتریس است. مدول خمشی نیز با ازدیاد درصد وزنی الیاف افزایش می‌یابد و تنها برای الیاف نخل خرما در ۳۰٪ وزنی، کاهش آن مشاهده می‌شود. در نمونه ۲۰٪ وزنی از الیاف نخل خرما مدول خمشی تا ۷۵٪ بهبود یافته است. بنابراین، با افزودن ۲۰٪ وزنی الیاف نخل خرما می‌توان به بالاترین سطح از خواص خمشی رسید. لازم به ذکر است، مقادیر ازدیاد طول و استحکام خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف جوت در تمام درصدهای وزنی، بیشتر از کامپوزیت‌های حاوی

مقدار ازدیاد طول و استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد. نمونه‌های تهیه شده از الیاف ظریف استحکام کششی، مدول کشسانی و استحکام ضربه‌ای بیشتری نسبت به کامپوزیت‌های تهیه شده از الیاف ضخیم دارند. با این حال، درصد جذب رطوبت و ازدیاد طول بیشینه آن‌ها کمتر است.

اثر اصلاح سطحی الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت

مطالعات بسیاری در باره روش‌های اصلاح خواص سطحی الیاف طبیعی برای بهبود چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس انجام شده است. پیش‌نیاز وجود چسبندگی به نسبت خوب بین دو ماده، تماس مولکولی نزدیک میان آن‌هاست. در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، قابلیت پلیمر برای مرطوب کردن سطح لیف وابسته به کشش سطحی هر دو ماده است که به‌طور کلی نیازمند کمتر بودن کشش سطحی پلیمر نسبت به لیف است. افزون بر این، شرایط بهینه برای مرطوب شدن زمانی به دست می‌آید که قطبیت هر دو ماده با یکدیگر مطابقت داشته باشد [۵۲]. از آنجا که نواحی بین‌سطحی ضعیف در لیف-ماتریس، به علت ماهیت آب‌دوستی الیاف طبیعی اغلب موجب کاهش پتانسیل به‌کارگیری آن‌ها به‌عنوان عامل تقویت‌کننده می‌شود، روش‌های مختلف اصلاح سطح الیاف مورد توجه قرار گرفته است [۵۳]. روش‌های اصلاح سطحی الیاف را می‌توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی کرد. از جمله روش‌های فیزیکی می‌توان به روش‌های عمل‌آوری با کرونا و پلاسما و برای روش‌های شیمیایی می‌توان به روش‌های عمل‌آوری قلیایی، عمل‌آوری با سیلان‌ها، استیل‌دار کردن، بنزویل‌دار کردن، عمل‌آوری با پراکسید، پرمنگنات، سدیم کلریت، ایزوسیانات‌ها، آنزیم، استفاده از عوامل جفت‌کننده، آکریل‌دار کردن و پیوندزنی با آکریلونیتریل اشاره کرد [۳۴-۵۴، ۵۷].

اگرچه بهبود چسبندگی بین‌سطحی با روش‌های شیمیایی موفقیت‌آمیز بوده است، اما مشکلاتی در باره هزینه زیاد فرایندها و پساب‌های شیمیایی وجود دارد [۵۸]. در جدول ۶ مزایا و معایب روش‌های متفاوت اصلاح سطح الیاف نشان داده شده است [۵۹]. طبق مقالات چاپ‌شده، عمل‌آوری قلیایی رایج‌ترین روش برای اصلاح سطح الیاف نخل خرماست. به‌طور کلی، قلیا با حذف لایه مومی و ناخالصی‌های روی سطح الیاف نخل خرما و ایجاد حفره‌هایی در سطح آن موجب بهبود چسبندگی لیف نخل خرما و ماتریس و تقویت خواص مکانیکی الیاف می‌شود. البته غلظت بهینه قلیا بسیار حائز اهمیت است. Alsaeed و همکاران اثر قلیا بر کامپوزیت الیاف نخل خرما-اپوکسی را بررسی کرده‌اند [۶]. طبق نتایج در غلظت سود ۹٪ در مقایسه با سود ۳ و ۶٪، ازدیاد طول به ترتیب در حدود ۴ و ۱۵٪ کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار استحکام کششی (۴۰۰ MPa) در غلظت ۳٪ سود و کمترین مقدار (۱۱۰ MPa) در غلظت ۹٪ سود حاصل شده است. همچنین با افزایش غلظت سود، لایه مومی در سطح الیاف از بین رفته و زبری ایجاد شده در سطح لیف باعث بهبود چسبندگی لیف-ماتریس شده است. بنابراین، افزایش غلظت سود اثر منفی بر خواص کششی لیف نخل خرما دارد. از سویی، حذف لایه مومی باعث افزایش ویژگی‌های سطحی بین لیف و ماتریس شده است. بنابراین، مقدار بهینه غلظت ۶٪ سود می‌تواند خواص مطلوب استحکامی و سطحی را فراهم کند. همچنین، مقدار چسبندگی بین‌سطحی از طریق آزمایش بیرون‌کشی تک‌لیف (single fiber pull out) انجام شده است. با افزایش غلظت سود، مقدار تنش برشی در ناحیه بین‌سطحی لیف-ماتریس نیز افزایش یافته است. اما در غلظت ۹٪ سود، به دلیل تضعیف لیف، کاهش تنش برشی مشاهده شده است. در پژوهش دیگری، اسلامی اثر عملیات قلیایی بر خواص مکانیکی الیاف نخل خرما در کامپوزیت

جدول ۶- مقایسه روش‌های اصلاح سطحی الیاف طبیعی [۵۹].

روش	اثر	مزایا	مشکلات
شیمیایی	تمیز شدن سطح لیف، اصلاح شیمیایی سطح، افزایش زبری سطح و آب‌گریزی، چسبندگی سطحی خوب، بهبود استحکام الیاف	متداول‌ترین روش مورد استفاده، فرایندپذیری آسان، قابل استفاده در مقیاس صنعتی	استفاده از مواد شیمیایی، دفع زباله حلال، افزایش قیمت تمام‌شده محصول
پلاسما	حذف لایه‌های ضعیف سطحی، تشکیل گروه‌های عاملی جدید، اثر مثبت بر خواص مکانیکی، افزایش آب‌گریزی و بهبود چسبندگی سطحی	عدم نیاز به مواد شیمیایی مضر و حلال‌ها، زمان فرایند کوتاه، انعطاف‌پذیری، تأثیر زیستی حداقل	پلاسمای کم‌فشار نیازمند طراحی خوب راکتور و سامانه خلأ گران، فرایند ناپیوسته

است. اما در هر سه روش مقادیر استحکام خمشی بیشتری در مقایسه با الیاف عمل‌آوری نشده حاصل می‌شود. در اثر عمل‌آوری با سود ناخالصی‌های سطح لیف از بین رفته و ترشوندگی سطح الیاف با رزین بهبود یافته است. سفیدگری الیاف با محلول دی‌اکسین سبب ایجاد حفره در سطح و کاهش استحکام لیف می‌شود. از سوی دیگر با سایش لایه خارجی لیف، آب‌دوستی لیف بیشتر شده و چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس کاهش می‌یابد.

کامپوزیت‌های حاوی الیاف عمل‌آوری نشده و سفیدگری شده دارای بیشترین مقادیر مدول خمشی هستند. به‌طور کلی، افزودن الیاف نخل خرما به پلی‌استر موجب بهبود مدول خمشی به مقدار بیش از ۳ GPa شده است. از این رو، استفاده از این الیاف ارزان، سبک و زیست‌سازگار به‌منظور حصول مدول زیاد پیشنهاد می‌شود. Kaddami و همکاران کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با برگ‌های خرما را بررسی کرده‌اند [۴۹]. در این پژوهش، پلیمرهای اپوکسی و پلی‌استر اشباع‌نشده استفاده شدند. الیاف پرکننده در ماتریس‌های پلی‌استر و اپوکسی به ترتیب با استیک و مالئیک انیدرید در محیط قلیایی عمل‌آوری شدند. طبق نتایج خواص گرمایی-مکانیکی، مدول خمشی، تنش شکست و بیشینه انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های اپوکسی بهبود یافته است. البته چسبندگی بین سطحی الیاف نخل خرما-پلی‌استر ضعیف گزارش شده و عمل‌آوری الیاف با استیک انیدرید سبب بهبود آن نشده است. در کنار روش‌های شیمیایی، عمل‌آوری با کرونا نیز به‌عنوان روش فیزیکی برای الیاف نخل خرما بررسی شده است [۶۰]. در این پژوهش، الیاف به مدت ۱۵ min تحت عملیات کرونا قرار گرفتند و کامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک‌اسید-الیاف نخل خرما با درصدهای وزنی متفاوت ۳۰٪ و ۴۰٪ تهیه شد. بر اساس نتایج، افزودن الیاف نخل خرما به‌تنهایی باعث افزایش استحکام پلی‌لاکتیک‌اسید نشده است. اما در الیاف عمل‌آوری شده با کرونا، استحکام کششی و مدول یانگ افزایش یافته که ناشی از چسبندگی بین سطحی بهتر میان لیف-ماتریس بر اثر پدیده حکاکی است. در اثر بمباران سطح الیاف به‌وسیله ذرات پلاسما هوا، ریزحفره‌هایی در سطح ایجاد شده و زبری سطح افزایش یافته است. همین پدیده درگیری مکانیکی بین لیف-ماتریس را افزایش داده و موجب بهبود چسبندگی بین سطحی شده است [۵۸، ۶۰، ۶۱].

نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از الیاف نخل خرما در ساقه درخت نخل که

(PP/EPDM) را بررسی کرده است [۴۲]. مالئیک انیدرید پیوند خورده با پلی‌پروپیلن (MAPP) به‌عنوان سازگار کننده برای بهبود سازگاری بین الیاف نخل خرما و کامپوزیت استفاده شده است. طبق نتایج، استفاده از الیاف نخل خرما استحکام کششی و خمشی را افزایش و استحکام ضربه‌ای را کاهش داده است. عمل‌آوری الیاف با قلیا سبب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت در مقایسه با الیاف عمل‌آوری نشده، شده است. همچنین اصلاح سطح الیاف به کمک MAPP و قلیا، موجب بهبود چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس شده است. عمل‌آوری الیاف نخل خرما با سیلان‌ها می‌تواند خواص مکانیکی را به مقدار بیشتری در مقایسه با عمل‌آوری با قلیا، افزایش دهد. از سوی دیگر، الیافی که تحت عمل‌آوری با قلیا و جفت‌کننده سیلانی قرار گرفته‌اند، ۴۰٪ افزایش بازده انتقال تنش را در سطح داشته‌اند [۴۳].

Shalwan و همکار نیز اثر عمل‌آوری قلیایی و قطر الیاف را بر چسبندگی بین سطحی لیف نخل خرما-اپوکسی، با استفاده از روش قطعه‌قطعه شدن تک‌لیف (single fiber fragmentation) بررسی کرده‌اند [۳۹]. در این مطالعه، الیاف با قطرهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ mm در سود با غلظت‌های ۳، ۶ و ۹٪ عمل‌آوری شدند. طبق نتایج، افزودن الیاف نخل خرما به رزین اپوکسی استحکام آن را در همه قطرها و در غلظت‌های متفاوت سود افزایش می‌دهد. الیاف عمل‌آوری نشده اثر کمی بر استحکام کششی کامپوزیت دارند و عمل‌آوری آن‌ها با سود ۶٪ در نمونه‌های دارای قطر ۰/۳ mm، استحکام کششی را به مقدار ۳۶٪ افزایش می‌دهد. مقدار بهینه چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس در الیاف با قطر ۰/۳ mm و غلظت ۶٪ سود حاصل می‌شود. با افزایش قطر الیاف، مقدار کمی از رزین به لیف نفوذ می‌کند و ناحیه جدایی بین لیف-ماتریس ایجاد می‌شود. در پژوهش دیگری، اصلاح سطحی الیاف نخل خرما با نمک دی‌آزونیوم بنزن انجام شده است [۴۸]. افزودن این الیاف اصلاح شده به پلیمر پلی‌پروپیلن سبب افزایش استحکام کششی و خمشی کامپوزیت شده که ناشی از بهبود چسبندگی بین سطحی است. با افزایش درصد وزنی الیاف به مقدار ۱۵٪ استحکام کششی سیر صعودی و پس از آن سیر نزولی پیدا می‌کند.

Al-kaabi و همکار اصلاح سطحی الیاف نخل خرما را به سه روش عمل‌آوری با قلیا، صابونی کردن و سفیدگری با محلول دی‌اکسین بررسی کرده‌اند [۲۶]. در این پژوهش از رزین پلی‌استر استفاده شده و کامپوزیت‌های حاوی ۹٪ وزنی الیاف به طول ۲ cm تهیه شدند. طبق نتایج از بین سه روش مزبور، تنها عمل‌آوری با سود سبب افزایش استحکام خمشی در مقایسه با رزین خالص شده

خواص مکانیکی کامپوزیت افزایش می‌یابد. در کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف نخل خرما، اصلاح سطحی الیاف به کمک سود ۶٪ می‌تواند خواص مطلوب مکانیکی و سطحی را به دست دهد. همچنین، اصلاح سطحی الیاف نخل خرما به وسیله قلیا و جفت‌کننده‌های سیلانی، می‌تواند افزایش ۴۰٪ انتقال تنش را در پلیمرهای PP/EPDM نشان دهد که تأثیر آن بیشتر از عمل‌آوری الیاف با قلیاست. عمل‌آوری الیاف با نمک دی‌آزونیوم بنزن نیز سبب افزایش استحکام کششی و خمشی کامپوزیت پلی‌پروپیلن-الیاف نخل خرما می‌شود. در کامپوزیت‌های پلی‌استر اشباع‌نشده-الیاف نخل خرما، اصلاح الیاف با استیک انیدرید موجب بهبود چسبندگی بین سطحی نمی‌شود. در کنار روش‌های شیمیایی، اصلاح سطح الیاف با کرونا نیز سبب افزایش استحکام کششی و مدول کامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک‌اسید-الیاف نخل خرما می‌شود.

به طور عمومی به شکل ضایعات کشاورزی دور ریخته می‌شوند، در تولید کامپوزیت‌ها مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. درصد وزنی، طول و نحوه توزیع الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف نخل خرما مؤثر است. قرارگیری الیاف در یک جهت، در مقایسه با استفاده از این الیاف به شکل پارچه، خواص کششی رزین پلی‌استر را به مقدار بیشتری افزایش می‌دهد. در توزیع تصادفی الیاف، کامپوزیت‌های حاوی الیاف به طول ۲ cm خواص خمشی زیادتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف به طول ۱، ۰/۵ و ۳ cm دارند. اگر درصد وزنی الیاف از مقدار بهینه آن بیشتر باشد، تماس آن‌ها با یکدیگر بیشتر شده و نفوذ ماتریس در بین الیاف کاهش می‌یابد. در نتیجه انتقال تنش از الیاف به ماتریس کمتر می‌شود و خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. اصلاح سطحی الیاف سبب بهبود چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس می‌شود و

مراجع

1. Monteiro S.N., Lopez F.P.D., Ferreira A.S., and Nascimento D.C.O., Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: Cheaper, Tougher and Environmentally Friendly, *JOM*, **61**, 17-22, 2009.
2. Saba N., Paridah M.T., and Jawaid M., Mechanical Properties of Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composite: A Review, *Constr. Build. Mater.*, **76**, 87-96, 2015.
3. Mahjoub R., Yatim J.M., Mohd Sam A.R., and Hashemi S.H., Tensile Properties of Kenaf Fiber due to Various Conditions of Chemical Fiber Surface Modifications, *Constr. Build. Mater.*, **55**, 103-113, 2014.
4. Yan L., Chou N., and Yuan X., Improving the Mechanical Properties of Natural Fibre Fabric Reinforced Epoxy Composites by Alkali Treatment, *J. Reinf. Plast. Comp.*, **36**, 425-437, 2012.
5. Thakur V.K., Thakur M.K., and Gupta R.K., Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites, *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, **19**, 256-271, 2014.
6. Alsaeed T., Yousif B.F., and Ku H., The Potential of Using Date Palm Fibres as Reinforcement for Polymeric Composites, *Mater. Design*, **43**, 177-184, 2013.
7. Sreekumar A.P. and Thomas S., Matrices for Natural-Fiber Reinforced Composites, *Properties and Performance of Natural-Fiber Composites*, Pickering K.L. (Ed.), Woodhead, Cambridge, England, 67-71, 2008.
8. Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., and Arora S., Are Natural Fiber Composites Environmentally Superior to Glass Fiber Reinforced Composites?, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **35**, 371-376, 2004.
9. Biagiotti J., Puglia D., and Kenny J.M., A Review on Natural Fibre-Based Composites-Part I: Structure, Processing and Properties of Vegetable Fibres, *J. Nat. Fibers*, **1**, 37-68, 2004.
10. Gandini A. and Belga Cem M.N., Modifying Cellulose Fiber Surfaces in the Manufacture of Natural Fiber Composites, *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*, Zafeiropoulos N.E. (Ed), Woodhead, Cambridge, England, 3-21, 2011.
11. Rowell R.M., Natural Fibres: Types and Properties, *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Pickering K.L. (Ed.), Woodhead, Cambridge, England, 44-50, 2008.
12. Taj S., Munawar M.A., and Ullah Khan Sh., Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites, *Proc. Pakistan Acad. Sci.*, **44**, 129-144, 2007.
13. Muniyasamy S., Anstey A., Reddy M.M., Misra M., and Mohanty A., Biodegradability and Compostability of Lignocellulosic Based Composite Materials, *J. Renew. Mater.*, **1**, 253-272, 2013.
14. Date-Suitable Regions for Cultivation of Date Palm in Iran and the World (Persian), <http://allfruits.ir/fa/accordion-a/date->

- palm.html?showall=&start=2, available in 15 February 2015.
15. Hosseinkhani H., MDF Production from Date Palm Pruning Residues in Pilot Plant Scale, *Iran J. Wood Paper Sci. Res. (Persian)*, **29**, 591-604, 2015.
 16. 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 Its Composites, *Biomass and Bioenergy*, Hakeem Kh.R., Jawaid M., and Rashid U. (Eds.), Springer, Switzerland, 1-25, 2014.
 17. 14% Production of Date Palms in Iran/ Cultivation, Production and Operation of Dates in the World and the Major Producing Countries (Persian), <http://www.iana.ir/keshavarzi/item/23152-1.html>, available in 20 February 2015.
 18. The Similarity Between Palm Tree and Human (Persian), <http://www.parsine.com/fa/news/234657/-/شباهت-درخت-نخل-و-انسان>, available in 20 February 2015.
 19. Chandrasekaran M.B.A., Valorization of Date Palm (Phoenix Dactylifera) Fruit Processing By-products and Wastes Using Bioprocess Technology-Review, *Saudi. J. Biol. Sci.*, **20**, 105-120, 2013.
 20. Top Production-Date-2012, <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>, available in 17 November 2014.
 21. Mousavi S.A., The Use of Lignocellulosic Wastes; Waiting for Investors, *Anim. Cultivat. Ind. (Persian)*, **143**, 49-50, 2011.
 22. Date and Date Palm Tree Terms, <https://fa.wikipedia.org/wiki/date> (Persian), available in 20 February 2015.
 23. Vaezi S., Date Palm; *The Tree of Life (Persian)*, Azineh Golmehar, Tehran, 65-68, 1383.
 24. Barrevelde W.H., Date Palm Products, <http://www.fao.org/docrep/t0681e/t0681e02.htm>, Available in 20 July 2016.
 25. Elbadry E.A., Agro-Residues: Surface Treatment and Characterization of Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement, *Composites*, **2014**, 1-8, 2014.
 26. Al-Kaabi A., Al-Khanbakhshi A., and Hammami A., Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: DPF/Polyester Composite Properties, *Polym. Compos.*, **26**, 604-613, 2005.
 27. Alawar A., Hamed A.M., and Al-Kaabi Kh., Characterization of Treated Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement, *Composites*, **40**, 601-606, 2009.
 28. Al-Khanbashi A., Al-Kaabi Kh., and Hammami A., Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization, *Polym. Compos.*, **26**, 486-497, 2005.
 29. 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, *J. Clean. Prod.*, **66**, 347-354, 2014.
 30. Azwa Z.N., Yousif B.F., Manalo A.C., and Karunasena W., A Review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibres, *Mater. Design*, **47**, 424-442, 2013.
 31. Summerscales J., Dissanayake N.P.J., Virk A.S., and Hall W., A Review of Bast Fibres and Their Composites, Part 1-Fibres as Reinforcements, *Compos. Part A: Appl. Sci.*, **41**, 1329-1335, 2010.
 32. Malherbe S. and Cloete T.E., Lignocellulose Biodegradation: Fundamentals and Applications, *Environ. Sci. Biotechnol.*, **1**, 105-114, 2002.
 33. Ho M.P., Wang H., Lee J.H., Ho C.K., Lao K., Leng J., and Hui D., Critical Factors on Manufacturing Processes of Natural Fibre Composites, *Compos. Part B: Eng.*, **43**, 3549-3562, 2012.
 34. AL-Oqla F.M., Salit M.S., Ishak M.R., and Aziz N.A., Combined Multi-Criteria Evaluation Stage Technique as an Agro Waste Evaluation Indicator for Polymeric Composites: Date Palm Fibers as a Case Study, *Bioresources*, **9**, 4608-4621, 2014.
 35. Faruka O., Bledzki A.K., Fink H.P., and Sain M., Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010, *Prog. Polym. Sci.*, **37**, 1552-1596, 2012.
 36. Rao R.A.K.M., Extraction and Tensile Properties of Natural Fibers: Vakka, Date and Bamboo, *Compos. Struct.*, **7**, 288-295, 2007.
 37. John M.J. and Thomas S., Review: Biofibres and Biocomposites, *Carbohydr. Polym.*, **71**, 343-364, 2008.
 38. Rassiah K. and Ahmad M.M.H.M., A Review on Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composite, *Aust. J. Basic. Appl. Sci.*, **7**, 247-253, 2013.
 39. Shalwan A. and Yousif B.F., Investigation on Interfacial Adhesion of Date Palm/Epoxy Using Fragmentation Technique, *Mater. Design*, **53**, 928-937, 2014.
 40. Asadzadeh M., Khalili S.M.R., Eslami Farsani R., and Rafizadeh S., Bending Properties of Date Palm Fiber and Jute Fiber Reinforced Polymeric Composite, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, **5**, 59-63, 2012.
 41. Sbiai A., Kaddami H., Fleury E., Maazouz A., Erchiqui F., Koubaa A., Soucy J., and Dufresne A., Effect of the Fiber

- Size on the Physicochemical and Mechanical Properties of Composites of Epoxy and Date Palm Tree Fibers, *Macromol. Mater. Eng.*, **293**, 684–691, 2008.
42. Eslami Farsani R., Effect of Fiber Treatment on the Mechanical Properties of Date Palm Fiber Reinforced PP/EPDM Composites, *Adv. Compos. Mater.*, **24**, 27-40, 2015.
43. Wazzan A.A., The Effect of Surface Treatment on the Strength and Adhesion Characteristics of Phoenix dactylifera-L(Date Palm) Fibers, *Int. J. Polym. Mater.*, **55**, 485-499, 2006.
44. Wazzan A.A., Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties and Fracture Characteristics of Date Palm Fiber Reinforced Composites, *Int. J. Polym. Mater.*, **54**, 213-225, 2005.
45. Abdal-hay A., Suardane 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, *Int. J. Precise Eng. Man.*, **13**, 1199-1206, 2012.
46. Al-Sulaiman F.A., Mechanical Properties of Date Palm Fiber Reinforced Composites, *Appl. Compos. Mater.*, **9**, 369-377, 2002.
47. 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 J. Appl. Res.*, **3**, 89-92, 2013.
48. Haque M., Hasan M., Islam S., and Ali E., Physico-mechanical Properties of Chemically Treated Palm and Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composites, *Bioresour. Technol.*, **100**, 4903–4906, 2009.
49. Kaddami H., Dufresne A., Khelifi B., Bendahou A., Taourirte M., Raihane M., Issartel N., Sautereau H., Gérard J.F., and Sami N., Short Palm Tree Fibers–Thermoset Matrices Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci.*, **37**, 1413–1422, 2006.
50. Ghafarzade Zare H., Ghazanfari Moghaddam A., and Hashemipour Rafsanjani H., Investigating Some Characteristics of Biocomposites Prepared from Chemically Purified Date Palm Fibers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **23**, 467-474, 2011.
51. Karmakar A., Chauhan S.S., Modak J.M., and Chanda M., Mechanical Properties of Wood–Fiber Reinforced Polypropylene Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci.*, **38**, 227-233, 2007.
52. Arbelaiz A. and Mondragon I., Testing the Effect of Processing and Surface Treatment on the Interfacial Adhesion of Single Fibres in Natural Fibre Composites, *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*, Zafeiropoulos N.E. (Ed), Woodhead, Cambridge, England, 146-149, 2011.
53. Kalagar M. and Marzban Moridani E., Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fibre-Reinforced Composites: A Review, *Polymerization (Persian)*, **3**, 76-87, 2013.
54. John M.J. and Anandjiwala D.A., Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites, *Polym. Compos.*, **29**, 187-207, 2008.
55. Kalia S., Kaith B.S., and Kaur I., Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites-A Review, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1253-1272, 2009.
56. Li X., Tabil L.G., and Panigrahi S., Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review, *J. Polym. Environ.*, **15**, 25-33, 2007.
57. Ahmad F., Choi H.S., and Park M.K., A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties, *Macromol. Mater. Eng.*, **300**, 10-24, 2015.
58. Bozaci E., Sever K., Sarikanat M., Seki Y., Demir A., Ozdogan E., and Tavman E., Effects of the Atmospheric Plasma Treatments on Surface and Mechanical Properties of Flax Fiber and Adhesion Between Fiber–Matrix for Composite Materials, *Compos. Part B: Eng.*, **45**, 565-572, 2013.
59. Kalia S., Thakur K., Celli A., Kiechel M.A., and Schauer C.L., Surface Modification of Plant Fibers Using Environment Friendly Methods for their Application in Polymer Composites, Textile Industry and Antimicrobial Activities, *Environ. Chem. Eng.*, **1**, 97-112, 2013.
60. Amirou S., Zerizer A., Haddadou I., and Merlin A., Effects of Corona Discharge Treatment on the Mechanical Properties of Biocomposites from Polylactic acid and Algerian Date Palm Fibres, *Sci. Res. Essays*, **8**, 946-952, 2013.
61. Gibeop N., Lee D.W., Prasad C.V., and Toru F., Effect of Plasma Treatment on Mechanical Properties of Jute Fiber/ Poly(lactic acid) Biodegradable Composites, *Adv. Compos. Mater.*, **22**, 389–399, 2013.