

مروری بر تأثیر اصلاح سطحی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف گیاهی

The Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Plant Fiber-reinforced Polymer Composites: A Review

ریحانه سرپناهی^۱، میترا توکلی^{۲*}

۱- یزد، دانشگاه یزد، پردیس فنی و مهندسی، گروه مهندسی نساجی، ۷۴۱-۸۹۱۹۵
 ۲- یزد، دانشگاه یزد، پردیس فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی و پلیمر، ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

امروزه، الیاف طبیعی به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد پیدا کرده‌اند. تحقیقات در زمینه‌ی الیاف گیاهی به علت وزن کم، قیمت مناسب، سازگاری با محیط‌زیست، فراوانی و خواص فیزیکی و مکانیکی قابل قبول و وسعت زیادی یافته است. یکی از مشکلات اساسی در استفاده از الیاف گیاهی در کامپوزیت‌ها، ناسازگاری بین الیاف و ماتریس است که برای رفع آن، از اصلاحات سطحی مختلفی استفاده شده است. در این مطالعه، اثر عملیات اصلاح سطح متفاوت بر خواص مکانیکی از جمله استحکام برشی، خمشی، کششی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف گیاهی مرور شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی به انتخاب الیاف گیاهی، مواد ماتریس، روش‌های تولید، اصلاح سطحی و همچنین درصد مواد اصلاح‌کننده بستگی دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که اکثر اصلاحات شیمیایی اثرات نامطلوبی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های حاوی الیاف گیاهی دارند و اصلاحات کمی مانند استفاده از سیلان، مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

درصد مواد تشکیل‌دهنده و نوع الیاف گیاهی خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲].

مشخص شده که الیاف گیاهی دارای توزیع نایک‌نواختی از مواد تشکیل‌دهنده و خواص مختلف هستند [۴] و خواص مکانیکی الیاف گیاهی نسبت به مصنوعی کمتر است اگرچه الیاف گیاهی دارای خاصیت استحکام قابل قبولی هستند [۵] اما با اصلاح سطح‌های مختلف می‌توان خواص مکانیکی را تغییر داد. برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی، اثرات اصلاح سطحی در خصوص استحکام برشی، کششی، خمشی و ضربه‌ای و همچنین مدول کششی و خمشی بیان می‌شود.

الیاف طبیعی در اشکال مختلفی به صورت طناب یا رشته به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زیستی استفاده می‌شود، الیاف طبیعی به علت تجزیه‌پذیری زیست‌محیطی، هزینه کم، استحکام ویژه خاص و خواص فیزیکی خوب در صنایعی مانند هوافضا، خودرو، لوازم خانگی، ساختمان و ساخت‌وساز کاربرد یافته است. الیاف طبیعی عمدتاً در سه گروه گیاهی، حیوانی معدنی طبقه‌بندی می‌شوند [۱].

در میان همه الیاف طبیعی، محققان عمدتاً کار خود را بر پایه گیاهان به علت ویژگی‌های امیدوارکننده آن‌ها مانند فراوانی و خواص فیزیکی و مکانیکی خوب متمرکز کردند [۱].

کلمات کلیدی

الیاف گیاهی، کامپوزیت، اصلاح سطح، خواص مکانیکی، استحکام

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: mtavakoli@yazd.ac.ir

۲- اثر پیوند بین فازها بر استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف گیاهی

ترکیبات شیمیایی الیاف گیاهی شامل سلولز، موم، ترکیبات لیگنین، همی سلولز، پکتین و موم است. در لیف‌های گیاهی، شبکه میکرو سلولز به عنوان یک عامل تقویت کننده و همی سلولز/ ترکیبات لیگنین/ پکتین به عنوان فاز ماتریس عمل می‌کنند [۶]. ترکیبات همی سلولز به سلولز توسط پیوند هیدروژنی متصل می‌شوند و به عنوان یک ماتریس سیمان بین میکرو لیف‌های سلولز که به عنوان جزء اصلی ساختار لیف است، عمل می‌کند استحکام مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی تحت تأثیر حذف ترکیبات غیر سلولزی مانند همی سلولز، لیگنین، واکس، پکتین و غیره قرار می‌گیرد. حضور این ترکیبات در سطح الیاف گیاهی مانع اتصال بین تقویت کننده و فاز ماتریس می‌شود و باعث شکست و تخریب کامپوزیت می‌گردد. بنابراین پیوند بین فازها عامل مهمی است که استحکام مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی را کنترل می‌کند. از طرفی مشخص شده که با افزایش سطح داخلی لومن و ضخامت دیواره سلولی ثانویه افزایش استحکام و مدول الیاف رخ می‌دهد بنابراین مورفولوژی الیاف در استحکام آن‌ها اهمیت خاصی دارد [۷].

تعامل فاز تقویت کننده و فاز ماتریس در فصل مشترک به عنوان پیوند بین دو فاز^۱ شناخته شده است. پیوند بین دو فاز عمدتاً به سازگاری فاز ماتریس با فاز تقویت کننده و شرایط سطحی فاز تقویت کننده بستگی دارد. الیاف طبیعی و ماتریس به ترتیب ماهیت قطبی و غیر قطبی دارند همچنین صاف بودن سطح الیاف گیاهی باعث اتصال ضعیف بین ماتریس و تقویت کننده می‌شود. در نتیجه، اصلاح سطحی الیاف گیاهی برای بهبود سازگاری آن‌ها با فاز ماتریس و بهبود شرایط سطح الیاف گیاهی پیشنهاد می‌شود. چهار نوع پیوند بین فازها وجود دارد: (الف) اتصال پخش شدگی داخلی^۲، (ب) اتصال الکترواستاتیک^۳، (ج) اتصال مکانیکی^۴ و (د) پیوند شیمیایی^۵ (شکل ۱) [۱]. چسبندگی دو فاز تحت تأثیر دو عامل جذب و پخش شدگی که توسط پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی کنترل می‌شوند. لیف و ماتریس باید با هم تماس داشته باشند تا نفوذ مناسب صورت گیرد. خیس شدن خوب

به طور مستقیم منجر به پخش شدگی مناسب بین مولکول‌های لیف و ماتریس در میان هم می‌شود. پیوند الکترواستاتیک نتیجه تعامل بین شارژهای مخالف مثبت و منفی است که برای ایجاد تماس محکم با توجه به جاذبه بین دو بار مخالف صورت می‌گیرد. پیوند شیمیایی نتیجه پیوند کووالانسی و یونی بین اتم‌ها است. به هم پیوستن مکانیکی هنگامی رخ می‌دهد که ماتریس در ناهمواری‌های الیاف نفوذ می‌کند، به عنوان مثال زنگ زدگی منجر به زبری بالاتر کامپوزیت می‌گردد [۱].

۳- اصلاح سطح

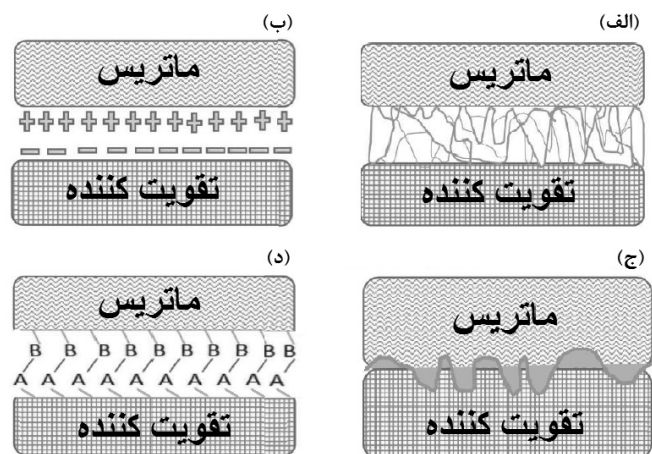
روش‌های مختلفی برای اصلاح سطح منسوجات وجود دارد که به طور کلی با توجه به تغییراتی که بر سطح می‌گذارد به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند [۸].

۳-۱- اصلاح فیزیکی

اصلاحات رایج فیزیکی شامل لیزر، اصلاح گرما، پلاسما و... است [۸، ۹]. اصلاحات فیزیکی شرایط سطح الیاف گیاهی را بدون تأثیر بر ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌دهد [۱۰]. مزایای اصلاح فیزیکی نسبت به اصلاح شیمیایی بهبود ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و حرارتی در الیاف گیاهی است. ولی، اصلاح فیزیکی گران‌تر از اصلاح شیمیایی است. بنابراین، محققان اصلاح شیمیایی را بیش از اصلاح فیزیکی ترجیح می‌دهند [۱]. پلاسما یکی از این روش‌ها بوده که موجب کنده کاری و زبری سطح الیاف می‌گردد و مشاهده شده که پلاسما هوا و نیتروژن باعث افزایش انرژی سطح می‌شود [۱۱، ۱۲]. همچنین پلاسما باعث افزایش رنگپذیری و چسبندگی سطحی الیاف پلی استر شده [۱۳] ولیکن این به معنای افزایش استحکام نیست و گاهی مشاهده می‌شود که استحکام و مدول نیز کاهش می‌یابد [۱۴].

۳-۲- اصلاح شیمیایی

اصلاح شیمیایی الیاف گیاهی مانند اصلاحات قلیایی، سیلان، الیگومر سیلوکسان^۶ و... توپوگرافی سطح^۷ و مورفولوژی^۸ الیاف گیاهی را تغییر می‌دهند. اصلاح شیمیایی الیاف گیاهی موجب (الف) حذف ترکیبات غیر سلولزی از الیاف گیاهی؛ (ب) بهبود سازگاری الیاف گیاهی با ماتریس؛ (ج) بهبود زبری سطح الیاف گیاهی؛ (د) بهبود پایداری حرارتی الیاف گیاهی می‌شود و هزینه نسبتاً کم و تهیه و آماده‌سازی آسان آن این روش را برای محققان جذاب کرده است [۸، ۹].



شکل ۱: (الف) اتصال پخش شدگی داخلی، (ب) اتصال مکانیکی، (ج) اتصال الکترواستاتیک و (د) پیوند شیمیایی [۱]

1. Interfacial bonding
2. Inter diffusion bonding
3. Electrostatic bonding
4. Mechanical interlocking
5. Chemical bonding
6. Oligomeric siloxane
7. Surface topography
8. Morphology

۴- اثر اصلاح سطح بر خواص مکانیکی

در آن D قطر الیاف و L طول الیاف است. جدول ۱ اثر اصلاحات مختلف بر استحکام برشی بین فازهای ماتریس و الیاف مختلف را نشان می‌دهد [۱]. غلامی و همکاران^۲ اثر اصلاح پلاسمای اکسیژن بر الیاف خرما را نشان دادند و مشخص شد که کامپوزیت اصلاح شده، استحکام برشی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های اصلاح نشده دارند [۱۶] که دلیل آن را می‌توان افزایش ضریب اصطکاک سطح الیاف، چسبندگی بهتر و افزایش سطح تماس بین ماتریس و لیف عنوان کرد. همچنین بیان شد که درصد همی سلولز و لیگنین بر اثر پلاسمای اکسیژن کاهش یافته است.

رحمان و همکاران^۳ [۱۷] تأثیر اصلاح سطح قلیایی و اشعه ماوراءبنفش را بر الیاف نارگیل بررسی کردند و بهبود پیوند بین سطحی الیاف و ماتریس را مشاهده کردند که به دلیل کاهش قطر و افزایش سطح تماس رزین و الیاف دانسته شده است.

برودوسکی و مادر^۴ [۱۹] اثر اصلاح سطحی را بر چسبندگی میان دو فاز الیاف جوت و اپوکسی بررسی کردند و مشخص شد که اصلاحات مختلف قلیایی، قلیایی + فنیل آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان و قلیایی + آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان + پراکندگی اپوکسی موجب بهبود

اصلاح سطح‌های متفاوت الیاف تأثیرات متفاوتی بر خواص مکانیکی از جمله استحکام برشی، کششی، خمشی و ضربه ای می‌گذارد که برخی از اصلاحات سطح و اثرات آن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در ادامه بیان می‌شود.

۴-۱- استحکام برشی

استحکام اتصال بین دو فاز بستگی به استحکام برشی بین فاز^۱ دارد که با ارزیابی حداکثر نیروی کشش موردنیاز، در یک آزمون بیرون کشیدن تک لیف ارزیابی می‌شود [۱۵].

$$IFSS = \frac{F_{max}}{S.A} \quad (1)$$

در فرمول ۱، F_{max} حداکثر نیروی بیرون کشیدن و $S.A = \pi \times D \times L$ است و

جدول ۱: اثر اصلاحات شیمیایی بر استحکام برشی بین فاز

نوع لیف	کامپوزیت	نوع اصلاح	نتیجه	مراجع
جوت	اپوکسی	سلولز میکرو کریستالین ^۵	بهبود استحکام	[۵]
جوت	اپوکسی	نانولوله‌های کربنی چند هسته‌ای ^۶	بهبود استحکام	[۵]
جوت	اپوکسی	قلیایی الیگومر سیلوکسان قلیایی + الیگومر سیلوکسان	بهبود استحکام	[۱۸]
جوت	اپوکسی	قلیایی قلیایی + فنیل آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان ^۷ قلیایی + آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان + پراکندگی اپوکسی ^۸	بهبود استحکام	[۱۹]
کنف	پلی بنزو اکسازین	قلیا	بهبود استحکام	[۲۱]
کتان	پلی هیدروکسی بوتیرات	پلاسم	بهبود استحکام	[۲۲]
خرما ^۹	پلی اورتان	قلیا	بهبود استحکام	[۲۳]
خرما	اپوکسی	پلاسم	بهبود استحکام	[۱۶]

*تا درصد وزنی خاصی رخ می‌دهد و بعد از درصد خاص رفتار تغییر می‌کند

1. Interfacial shear stress (IFSS)
2. Gholami et al.
3. Rahman et al.
4. Brodowsky and Mader
5. Microcrystalline cellulose (MCC)

6. Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)
7. Alkali+phenyl aminopropyl triethoxy silane (NaOH+PAPS)
8. Alkali+aminopropyl triethoxy silane+epoxy dispersion (NaOH+APS+ED)
9. Date palm fibers (DPFs)

استحکام برشی و چسبندگی سطحی میان جوت و اپوکسی می گردند. بهبود استحکام بین فازی کافی نبوده و محققان کارهای خود را از یک همانطور که از جدول ۱ مشخص است تمامی تکمیل ها اثر مثبتی بر استحکام برشی و IFSS دارند که می توان دلیل آن را حذف مواد زائد از سطح لیف در تمامی انواع تکمیل ها دانست.

جدول ۲: اثرات اصلاحات سطحی بر خواص کششی کامپوزیت

نوع لیف	کامپوزیت	نوع اصلاح	نتیجه	مراجع
جوت	اپوکسی	سلولز میکرو کریستالین	بهبود استحکام کششی	[۵]
جوت	پلی لاکتیک اسید	قلیلی پرمگنات ^۱ پراکسید ^۱ سیلان	بهبود استحکام و مدول کششی	[۲۶]
کنف	پلی هیدروکسی بوتیرات	پلاسماتیلن	بهبود خواص کششی	[۲۲]
نارگیل	پلی (بوتلن سوکسینات ^۱)/پلی اتیلن	قلیا	بهبود خواص کششی*	[۲۷]
کتان	پلی پروپیلن	لستیلینگ	بهبود خواص کششی*	[۱۰]
کتان	پلی پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	بهبود خواص کششی	[۲۸]
سیسل	پلی اتیلن	قلیایی ^۱ ایزوسیونات ^۱ دیگومیل پراکسید ^۱ KMno4	بهبود خواص کششی	[۲۹]
سیسل	اپوکسی	قلیایی	بهبود استحکام کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	استیل	کاهش مدول کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	اتیل سینو ^۱	کاهش مدول و استحکام	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	ارگان سیلان کوپلینگ ^۱	بهبود استحکام کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	گرمایی ^۱	بهبود استحکام و مدول کششی	[۳۰]
نارگیل	اپوکسی	اشعه ماوراءبنفش اشعه ماوراءبنفش+پیوند با اتیلن دی متیل آکریلات ^۱	بهبود استحکام کششی*	[۱۷]
کتان	پلی پروپیلن	وینیل تری متوکسی سیلان ^۱ کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	بهبود مدول کششی	[۳۱]

1. Cardanol derivative of polytoluene di isocyanate (CTDIC)

[۳۲]	بهبود استحکام کششی	عامل مقاومت حرارت ^۱		نارگیل
[۳۳]	کاهش استحکام کششی	سیلان	اپوکسی	کنف
[۳۴]	فقط کرونا+ اپوکسی سیلان افزایش استحکام کششی	تمیز کردن + قلیایی ^۱ تمیز کردن + قلیایی + عامل بنزوئیل سیلان ^۱ تمیز کردن + قلیایی + اتصال آمینو سیلان ^۱ تمیز کردن + قلیایی + اتصال اپوکسی سیلان ^۱ کرونا ^۱ کرونا + اتصال آمینو سیلان ^۱ کرونا + اپوکسی سیلان ^۱	ترموپلاستیک پلی الفین ^۱	کتان
[۳۵]	بهبود مدول و استحکام کششی	قلیا محلول NaOH ۶ درصد وزنی	پلی پروپیلن	کنف
[۳۶]	بهبود استحکام کششی تنها در کتان / پلی لاکتیک اسید با تکمیل وینیل تری دکسی سیلان	وینیل تری دکسی سیلان ^۱ مالئیک آنیدرید ^۱ نرم کننده‌ی تری بوتیل سترات ^۱	پلی لاکتیک اسید اکووپو ^{۱۶} بایونول ^۱	کتان
[۳۷]	بهبود استحکام کششی*	قلیا	پلی لاکتیک اسید	کنف
[۳۸]	بهبود استحکام و مدول کششی	الکلی آکریلونیتریل سیلان متیل اتیل کتون پراکسید ^۱	پلی استر	کنف
[۳۹]	بهبود استحکام و مدول کششی	سیکلو هگزان / اتانول قلیایی سیلان	پلی اتیلن	کنف
[۴۰]	افزایش استحکام کششی	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	پلی پروپیلن / اتیلن پلی پروپیلن ^۱	خرما
[۱۶]	افزایش استحکام کششی	پلازما		خرما
[۴۱]	بهبود استحکام کششی	قلیا	اپوکسی	خرما خرما شیشه
[۴۲]	بهبود استحکام و مدول کششی*	قلیا		خرما
[۴۳]	بهبود استحکام کششی	قلیا	پلی پروپیلن	خرما

۴-۲- خواص کششی

توسط ماتریس دانسته اند. همچنین مشاهده کردند که با اصلاح قلیایی، استحکام کامپوزیت با کسر حجمی ۴۰٪ الیاف افزایش یافته است. بسا و همکاران^[۳۴]، مطالعه‌ای انجام دادند که در آن اثرات اصلاحات شیمیایی و فیزیکی مختلف (الف) تمیز کردن + قلیایی؛ (ب) تمیز کردن + قلیایی + عامل بنزوئیل سیلان؛ (ج) تمیز کردن + قلیایی + اتصال آمینو سیلان (د) تمیز کردن + قلیایی + اتصال اپوکسی سیلان، (ه) کرونا، (و) کرونا + اتصال آمینو سیلان و (ز) کرونا + اپوکسی را بر ویژگی‌های کششی کامپوزیت‌های کتان/ ترموپلاستیک مشاهده کردند و نتیجه گرفته شد که تمام اصلاحات اعمال شده اثرات نامطلوبی بر استحکام کششی و مدول دارند به جز اصلاح کرونا که استحکام کششی را تا تقریباً ۲ درصد در مقایسه با نمونه‌های بدون اصلاح افزایش می‌دهد. مطالعه آن‌ها نشان داد که اصلاح تمیز کردن + قلیایی و تمیز کردن + قلیایی + اتصال اپوکسی سیلان بر پارچه‌ی کتان کمترین مدول یانگ و بیشترین ازدیاد طول، حدود ۱۰۰٪ بیشتر از کامپوزیت بدون اصلاح را دارا هست. ژئورجیوپولوس و همکاران^[۳۶]، تأثیر سه روش شیمیایی (الف) وینیل تری دکسی سیلان، (ب) مالئیک آنیدرید و (ج) نرم‌کننده‌ی تریبوتیل سیترات را بر ویژگی‌های مکانیکی سه کامپوزیت متفاوت کتان/ پلی لاکتیک اسید، کتان/ اکوویو و کتان/ بایونول بررسی کردند و دریافتند که با اینکه پلی لاکتیک اسید استحکام بالایی نسبت به اکوویو و بایونول دارد ولی استحکام کتان/ پلی لاکتیک اسید کمتر از کامپوزیت بایونول است که دلیل آن خواص الاستیک و چقرمگی بهتر در پلی لاکتیک اسید دانسته شده است که در آزمون کشش موجب ضعف اتصال بین دو فاز می‌گردد. اصلاحات سیلان، نرم‌کننده تریبوتیل سیترات و مالئیک آنیدرید بر خواص کششی کامپوزیت کتان بایونول تأثیر منفی دارد. علاوه بر این، نتایج مشابهی در کامپوزیت الیاف کتان اکوویو ارائه شده است. باین حال، استحکام کششی کامپوزیت کتان/ پلی لاکتیک اسید تحت اصلاح سیلان افزایش دارد در نتیجه از تمام کامپوزیت‌های تحت اصلاح، فقط ترکیب کامپوزیتی کتان/ پلی لاکتیک اسید تحت اصلاح با سیلان، در استحکام کششی افزایش داشته است. مدول کامپوزیت کتان بایونول فقط تحت تکمیل سیلان کاهش دیده شده، در کتان/ اکوویو در تمامی اصلاحات بهبود دیده شده ولی در کتان/ پلی لاکتیک اسید فقط در اصلاح مالئیک آنیدرید بهبود رخ می‌دهد. شست و شوی سطح اهمیت بخصوصی در الیاف گیاهی دارد چرا که بر روی سطح پکتین و مواد زائد وجود دارد که با شست و شوی بین می‌رود همچنین مشخص شده که عملیات ترکیبی اصلاح سطح تأثیر بیشتری بر استحکام دارد [۴۵].

بلدزکی و همکاران^[۱۰] بررسی کردند که اصلاح استیلینگ با ۱۸ درصد وزنی، استحکام کششی کامپوزیت‌های تقویت‌شده لیف کتان را افزایش می‌دهد و اصلاح استیلینگ بیشتر از ۱۸ درصد وزنی استحکام کششی را کاهش می‌دهد و بیشینه استحکام کششی به ۲۵ درصد بیشتر از استحکام کششی کامپوزیت بدون اصلاح می‌رسد.

پارامترهای عمده‌ای بر خواص کششی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی تأثیر می‌گذارد از جمله: (الف) پیوند بین فازی، (ب) حضور ترکیبات غیر سلولزی در سطح لیف، (ج) زبری سطح الیاف، (د) استحکام کششی الیاف گیاهی، (ه) شاخص بلوری در الیاف گیاهی، (و) چقرمگی مواد ماتریس [۱۵، ۱۸، ۲۴، ۲۵] آزمون کشش با استفاده از دستگاه آزمون کشش جهانی^[۱۲] با استانداردهای مختلف ASTM مانند ASTM D256، ASTM D33795، ASTM D3039 و ASTM D3379-75 اجرا می‌شود. جدول ۲ اثرات اصلاحات سطحی الیاف را بر خواص کششی کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد.

تجربیات موجود نشان می‌دهد که الیاف بدون اصلاح و کامپوزیت‌های آن‌ها، دارای استحکام کششی ضعیف به علت حضور ترکیبات غیر سلولزی در الیاف گیاهی هستند که باعث توانایی خیس شدن ضعیف و عدم سازگاری الیاف گیاهی با ماتریس می‌شود [۴۴]. بنابراین، لازم است که از روش‌های اصلاح سطحی برای الیاف گیاهی استفاده شود تا ترکیبات غیر سلولزی را از الیاف گیاهی حذف کند و منجر به افزایش خواص کششی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی شود. تجربیات موجود نشان می‌دهد که غلظت NaOH در اصلاح قلیایی برای به دست آوردن نتایج مطلوب برای استحکام کششی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی استاندارد نشده است [۱].

مانجولا و همکاران [۳۲]، اثرات عامل استحکام حرارت را بر ویژگی‌های مکانیکی الیاف نارگیل بررسی کردند و دریافتند که نگه‌داشتن الیاف در آن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت پنج روز باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. ژوزف و همکاران^[۲۹] دریافتند که پیوند الیاف سیسال با مشتقات کاردانول پلی‌اتیلن دی‌ایزوسیانات^۳ منجر به بهبود ویژگی‌های کششی کامپوزیت سیسال/ پلی اتیلن سبک به علت خیس شدن بهتر الیاف اصلاح‌شده با پلی اتیلن سبک می‌شود. رحمان و همکاران [۱۷] تأثیر اصلاح سطح قلیایی و اشعه ماوراءبنفش را بر استحکام کششی الیاف نارگیل بررسی کردند و دریافتند که با افزایش مقدار دز اشعه مقدار استحکام افزایش یافته که دلیل آن را افزایش زبری سطح و در نتیجه چسبندگی بیشتر سطح لیف و ماتریس دانسته اند.

سپه و همکاران^[۳۳] گزارش دادند که اصلاح الیاف کنف با عامل سیلان بهبود بیشتری در استحکام کششی کامپوزیت الیاف کنف/ اپوکسی نسبت به اصلاح الیاف کنف با محلول‌های قلیایی دارد. تکمیل قلیایی، لیگنین و همی سلولز را از سطح الیاف طبیعی خارج می‌کند اما همچنین باعث می‌شود که الیاف به راحتی در ماتریس کشیده شود که باعث کاهش خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌گردد.

هو و لیم^[۳۷] اصلاح قلیایی را بر الیاف کنف مشاهده کرده و دریافتند که با افزایش درصد الیاف کنف استحکام کششی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است که دلیل کاهش را امکان خیس شدن کمتر الیاف

1. Universal testing machine (UTM)

2. Joseph et al.

3. Cardanol derivative of polytoluene di isocyanate(CTDIC)

4. Sepe et al.

5. Hu and Lim

6. Bessa et al.

7. Georgiopoulos et al.

8. Bledzki et al.

جدول ۳: اثر اصلاحات شیمیایی بر استحکام و مدول خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی

نوع لیف	کامپوزیت	نوع اصلاح	نتیجه	مراجع
جوت	اپوکسی	سلولز میکرو کریستالین	بهبود استحکام خمشی	[۵]
سیسل	اپوکسی	قلیایی	بهبود استحکام و مدول خمشی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	استیل	بهبود استحکام و مدول خمشی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	اتیل سینو	بهبود مدول خمشی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	ارگان سیلان کوپلینگ	بهبود استحکام و مدول خمشی	[۳۰]
کتان	پلی پروپیلن	لستیلینگ	بهبود خواص خمشی*	[۱۰]
کتان	پلی پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	بهبود خواص خمشی	[۲۸]
کتان	پلی پروپیلن	وینیل تری متوکسی سیلان کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	بهبود مدول و استحکام خمشی	[۳۱]
کتان	پلی لاکتیک اسید	وینیل تری دکسی سیلان مالئیک آنیدرید نرم کننده‌ی تری بوتیل سترات	کاهش استحکام خمشی	[۳۶]
کنف	پلی پروپیلن	قلیا محلول NaOH ۶ درصد وزنی	بهبود مدول و استحکام خمشی	[۳۵]
کنف	پلی لاکتیک اسید	قلیا	بهبود استحکام خمشی*	[۳۷]
کتان	اپوکسی	قلیا	بهبود استحکام و مدول خمشی طولی و عرضی	[۴۵]
کنف	اپوکسی	قلیا	کاهش استحکام خمشی*	[۳۳]
کنف	اپوکسی	سیلان	افزایش استحکام خمشی*	[۳۳]
جوت	پلی لاکتیک اسید	قلیایی پرمنگنات پراکسید سیلان	بهبود استحکام خمشی و مدول خمشی	[۲۶]
کنف	پلی اتیلن	سیکلو هگزان / اتانول قلیایی سیلان	بهبود استحکام و مدول خمشی	[۳۹]
خرما	پلی پروپیلن / اتیلن پلی پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن	افزایش استحکام خمشی	[۴۰]
خرما خرما شیشه	اپوکسی	قلیا	بهبود استحکام خمشی	[۴۱]

کششی، استحکام خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی عمدتاً به IFSS به جای استحکام الیاف بستگی دارد. به طور کلی، آزمون خمش سه نقطه‌ای^۳ برای بررسی خواص خمشی با استفاده از دستگاه آزمون کشش جهانی (UTM) با استانداردهای JIS-7171، ASTM D-790 (ابعاد نمونه ۵۰ میلی متر ۲۵ میلی متر ۲ میلی متر)، GB-1499-83 (ابعاد نمونه ۶۵ میلی متر ۱۰ میلی متر ۵ میلی متر)، D790-02 (۱۵۴ میلی متر ۱۳ میلی متر ۴ میلی متر)، D790-07 (۸۰ میلی متر ۱۰ میلی متر ۴ میلی متر) انجام می‌شود [۴۷].

کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی ساخته شده از الیاف بدون اصلاح دارای مقدار کم استحکام خمشی و مدول خمشی هستند زیرا که IFSS برای کامپوزیت‌های الیاف اصلاح نشده ضعیف است بنابراین لازم است که مقدار IFSS در کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی برای بهبود استحکام خمشی افزایش یابد. در نتیجه، محققان برخی از اصلاحات شیمیایی و فیزیکی را برای الیاف گیاهی برای بهبود IFSS در کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی یافته‌اند [۱]. جدول ۳ اثر برخی اصلاحات شیمیایی را بر استحکام و مدول خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی را نشان می‌دهد.

ژئورجیپولوس و همکاران [۳۶]، همچنین استحکام خمشی را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند و مشاهده کردند که همانطور که استحکام خمشی پلی لاکتیک اسید بیشتر از بایونول و اکوویو است، استحکام خمشی کامپوزیت پلی لاکتیک اسید نیز بیشتر از استحکام کتان/اکوویو و کتان/بایونول است ولی اصلاحات مختلف وینیل تری دکسی سیلان، مالئیک آنیدرید و نرم کننده‌ی تری بوتیل سترات بر استحکام و مدول خمشی اثرات منفی گذاشته است.

هو و لیم [۳۷] اصلاح قلیایی را نیز بر استحکام خمشی کامپوزیت کنف/ پلی لاکتیک اسید بررسی کردند و متوجه شدند که با اصلاح قلیایی استحکام خمشی بهبود می‌یابد که علت آن بهبود تر شونده‌ی و ایجاد اتصال بهتر بین الیاف و ماتریس و حذف مواد غیر سلولزی در لیف که باعث افزایش درصد الیاف می‌باشد، است.

اختر و همکاران^۵ نیز افزایش استحکام خمشی را با اصلاح قلیایی به همگن بودن و بهبود پیوند الیاف کنف با ماتریس پلی پروپیلن نسبت دادند [۳۵]. بان و همکاران^۶ [۴۸]، مطالعه‌ای انجام دادند که اپوکسی با الیاف کتان تحت اصلاح قلیایی تقویت شده است و دریافته‌اند که اصلاحات قلیایی با ۵ درصد وزنی NaOH در الیاف کتان نشان دهنده افزایش استحکام خمشی و افزایش مدول است که ممکن است به علت بهبود در زبری سطح الیاف و چسبندگی میان ماتریس و تقویت کننده دانست [۲۰، ۴۹].

رانگ و همکاران [۳۰] تأثیر اصلاحات مختلف را بر خصوصیات مکانیکی الیاف سیسال بررسی و بیان کردند که خصوصیات مکانیکی کامپوزیت

هالدار و همکاران^۱ [۴۶] کامپوزیت سیسال/اپوکسی را تهیه کردند آن‌ها دریافته‌اند که استفاده از پودر آلومینیوم در کامپوزیت‌های سیسال/اپوکسی خواص کششی را ۱۹٪ در مقایسه با کامپوزیت لیف سیسال/اپوکسی خالص افزایش می‌دهد، که دلیل آن را می‌توان به تخلخل پایین و اتصال بین فازی خوب دانست.

رانگ و همکاران^۲ [۳۰] تأثیر اصلاحات مختلف را بر الیاف سیسال بررسی کردند. مشخص شد که الیاف سیسال می‌توانند به طور مؤثر توسط مواد شیمیایی اصلاح شوند و اصلاحات شیمیایی معمولاً باعث ایجاد برخی گروه‌های فعال در سطح لیف می‌شوند که موجب استحکام بیشتر می‌گردد ولی درصد همی سلولز و لیگنین را در ساختار لیف می‌کاهند. در مقابل، عملیات گرمایی الیاف به دلیل افزایش بلورینگی سلولز می‌تواند منجر به افزایش استحکام گردد.

اصلاح سطحی الیاف نخل خرما موجب بهبود چسبندگی بین سطحی لیف-ماتریس شده و سبب تقویت خواص کششی و خمشی کامپوزیت می‌شود در حالی که درصد وزنی و نحوه توزیع الیاف نخل خرما در کامپوزیت از عوامل مهم در خواص مکانیکی آن است [۴۷].

گوریپارتی و همکاران^۲ [۲۶] اثر اصلاحات سطحی مختلف از جمله قلیایی، پرمنگنات، پراکسید و سیلان را بر الیاف جوت مشاهده کردند و مشخص شد که تمامی اصلاحات تأثیر مثبتی بر استحکام کششی دارد. اصلاح‌های سطحی تغییرات ساختاری و شیمیایی زیادی را در سطح الیاف ایجاد می‌کنند. این تغییرات سطح بر مکانیسم اتصال سطحی بین الیاف و ماتریس تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، قلیایی شدن الیاف باعث کاهش استحکام و سفتی الیاف جوت می‌شود ولی افزایش زبری سطح و در نتیجه اتصال بهتر مکانیکی بین الیاف و ماتریس را در پی دارد که موجب بهبود استحکام می‌شود. در مورد سایر اصلاح‌های سطحی که در این کار در نظر گرفته شده است، مکانیسم پیوند بین سطحی غالب پیوند شیمیایی است. تفاوت در ماهیت و مواد شیمیایی تشکیل دهنده بین الیاف و ماتریس نقش مهمی در عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌ها دارد.

معمولاً در منابع مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش درصد قلیا یا اصلاحاتی دیگر و یا زمان اعمال آن ابتدا رفتار استحکام کششی بهتر و سپس کاهش پیدا می‌کند. بهبود زبری سطح لیف با حذف مواد غیر سلولزی، بهبود اتصال مکانیکی بین لیف‌ها و فاز ماتریس، افزایش نسبت سطح/ناحیه‌ی تماس لیف به ماتریس، بهبود خیس شدن و پایداری لیف با مواد ماتریس باعث افزایش استحکام کششی و در ادامه به دلیل حذف لیگنین و مواد همی سلولز در ساختار لیف، و آسیب زدن به لیف باعث کاهش استحکام کششی می‌گردد. در روش‌های مختلف به کار گرفته شده مشاهده می‌شود که جنس لیف، جنس ماتریس، درصد استفاده از مواد اصلاحی اهمیت دارند. پس نیاز است که برای استفاده از اصلاحات از مقدار بهینه آن استفاده کرد.

۳-۴- استحکام و مدول خمشی

مهمترین عوامل مؤثر بر استحکام خمشی و مدول کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی (الف) چسبندگی بین فازی بین ماتریس و الیاف، (ب) میزان انتقال تنش بین ماتریس و الیاف می‌باشند. برخلاف استحکام

1. Joseph et al.
2. Cardanol derivative of polytoluene di isocyanate(CTDIC)
3. Sepe et al.
4. Three-point bending test
5. Akhtar et al.
6. Yan et al.

۴-۴- مقاومت در برابر ضربه

مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی می‌تواند با استفاده از آزمون استاندارد ضربه اندازه‌گیری شود. آزمون ضربه چارپی^۱ و ضربه ایزود^۲ برای تجزیه و تحلیل تغییر حالت شکننده یا تغییر حالت انعطاف‌پذیر^۳ در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۴، ۱۰]. جدول ۴ اثر اصلاحات شیمیایی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی را نشان می‌دهد. اصلاح الیاف گیاهی باعث افزایش استحکام پیوند ماتریس و تقویت‌کننده در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی می‌شود که منجر به کاهش مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی می‌شود [۱۰]. بلدزکی

بسیار به چسبندگی میان دو فاز بستگی دارد. در شرایط خم شدن سه نقطه‌ای، مقاومت در برابر شکست بین لایه ای خواص نهایی لمینیت‌ها را کنترل می‌کند. چسبندگی بین سطحی بهبود یافته منجر به استحکام خمشی بالا می‌شود.

تجربیات نشان می‌دهد که اغلب اصلاحات سطحی تأثیر مثبتی بر استحکام خمشی داشته است که می‌توان دلیل آن را حذف مواد زائد سطحی، افزایش چسبندگی بین الیاف و ماتریس، توزیع مناسب با تر شدن بهتر سطح لیف با رزین دانست. بنابراین برای به دست آوردن بهبود بیشتر در رفتار خمشی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی لازم است که بهترین اصلاح سطحی برای الیاف گیاهی شناسایی گردد.

جدول ۴: اثر اصلاحات شیمیایی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی

نوع لیف	کامپوزیت	نوع اصلاح	نتیجه	مراجع
جوت	اپوکسی	سلولز میکرو کریستالین	بهبود مقاومت در برابر ضربه	[۵]
کتان	پلی پروپیلن	لستیلینگ	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۱۰]
سیسل	پلی استر	قلیایی (۵ درصد وزنی NaOH) عملیات حرارتی پرمگنت بنزوسیون سیلان	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۵۱]
جوت	پلی لاکتیک اسید	قلیایی پرمگنت پراکسید سیلان	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۲۶]
کنف		آکریلونیتریل سیلان متیل اتیل کتون پراکسید	بهبود مقاومت در برابر ضربه	[۳۸]
کنف	پلی اتیلن	سیکلو هگزان / اتانول قلیایی سیلان	بهبود مقاومت در برابر ضربه	[۳۹]
خرما	پلی پروپیلن / اتیلن پلی پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید- پلی پروپیلن	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۴۰]

1. Charpy Impact
2. Izod impact
3. Brittle ductile transition

و همکاران [۱۰] گزارش دادند که افزودن کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی پروپیلن به فاز ماتریس، منجر به کاهش مقاومت در برابر ضربه مواد کامپوزیت شده و باعث افزایش حالت شکنندگی^۱ در فاز ماتریس می شود. از کارهای صورت گرفته مشخص شده که مقدار مقاومت در برابر ضربه در کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی به طور کامل توسط نوع اصلاح شیمیایی کنترل نمی شود و به نوع الیاف گیاهی بستگی دارد. در کامپوزیت هیبرید جوت/خرما^۲، با افزایش درصد الیاف جوت مقدار مقاومت در برابر ضربه به دلیل بهبود انتقال تنش از ماتریس به الیاف، کاهش پیدا می کند این در حالی است که خواص کششی و خمشی افزایش می یابد [۵۰].

تجربیات موجود نشان می دهد که مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی تحت تأثیر بسیاری از پارامترها مانند اتصال بین فازی، ترکیبات الیاف گیاهی، چقرمگی یا سفتی مواد و غیره قرار می گیرد. در واقع هر چه مقدار مواد انعطاف پذیر در ساختار کامپوزیت بیشتر شود مقاومت در برابر ضربه به دلیل افزایش حالت نرمی و چقرمگی، بهتر می شود.

۵- نتیجه گیری و خلاصه

اثرات اصلاحات شیمیایی مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی ارائه شده است. بر اساس بررسی تجربیات ارائه شده در این مقاله، نتیجه گیری های زیر انجام می شود:

۱- خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف گیاهی به طور عمده توسط انتخاب الیاف گیاهی، انتخاب مواد ماتریس، انتخاب روش ها و درصد ماده در اصلاح سطحی و انتخاب تکنیک های تولید تنظیم می شود. الیاف گیاهی اصلاح نشده دارای ترکیبات غیر سلولزی و سطح صاف هستند که باعث اتصال مکانیکی بد و ناسازگاری بین الیاف گیاهی و ماتریس می شود، بنابراین، اصلاحات شیمیایی الیاف گیاهی برای بهبود سازگاری، آب گریزی، پیوند فضایی و زبری سطح پیشنهاد شده است.

منابع

- Latif R., Wakeel S., Zaman Khan N., Noor Siddiquee A., Lal Verma S., Akhtar Khan Z., Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30, 19-38, 2019.
- Park S., Baker JO., Himmel ME., Parilla PA., Johnson DK., Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance, *Biotechnology for biofuels*, 3, 10, 2010.
- کلاگرم، مرزبان مریدانی، مروری بر عمل آوری های شیمیایی الیاف گیاهی برای استفاده در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف گیاهی، فصلنامه علمی بسپارش، ۳، ۷۶-۸۷، ۲۰۱۳.
- Komuraiah A., Shyam Kumar N., Durga Prasad B., Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties, *Mechanics of composite materials*, 50.3, 359-376, 2014.

1. Brittle

2. Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber

5. Pichandi S., Rana S., Parveen S., Fanguero R., A green approach of improving interface and performance of plant fibre composites using microcrystalline cellulose, Carbohydrate polymers., 197, 137-46, 2018.
6. Safinia L., et al., Towards a methodology for the effective surface modification of porous polymer scaffolds, Biomaterials., 26.36, 7537-7547, 2005.
7. Fidelis M.E.A., et al., The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers, Journal of Materials Research and Technology, 2(2), 149-157, 2013.
۸. فتاحی ف، خدایمی ا، ایزدان ح، مروری بر فرآیندهای اصلاح منسوجات تهیه شده از الیاف پلی لاکتیک اسید: عملیات پلاسما، تابش UV/Ozone، تولید سطوح ابرآبگریز، عملیات آنزیمی، علوم و فناوری نساجی، ۶، ۱۹-۲۶، ۲۰۱۷.
۹. متقی طلب و، حقدوست ف، محترم ف، اثر عمل آوری با پلاسما بر شکل شناسی و مقاومت الکتریکی پارچه‌های پلی استر لایه‌نشانی شده بانانوذرات مس، علوم و فناوری نساجی، ۴، ۳-۱۰، ۲۰۱۴.
10. Bledzki A., Mamun A., Lucka-Gabor M., Gutowski V., The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites, Express Polymer Letters., 2, 413-22, 2008.
۱۱. عظیمی ع، توکلی م، شریفیان م، اصلاح سطحی فیلم پلی پروپیلن در مجاورت پلاسمای DBD در حضور گاز نیتروژن، اولین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، اول و دوم خرداد ۱۳۹۲.
۱۲. عظیمی ع، توکلی م، شریفیان م، اصلاح سطحی فیلم پلی پروپیلن در مجاورت پلاسمای DBD با هوا، اولین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، اول و دوم خرداد ۱۳۹۲.
۱۳. ساجدی س.ف، توکلی م، بررسی اثر پلاسمای DBD بر رنگرزی پارچه پلی استر، نهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۱۶ الی ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۳.
۱۴. دوست حسینی ب، بابادی عکاشه ن، توکلی م، ملاحظه‌سینی ح، بررسی اثر پلاسمای سرد روی خواص فیزیکی و رنگ‌پذیری پلی استر و پلی پروپیلن، نهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۱۶ الی ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۳.
15. Sair S., Oushabi A., Kammouni A., Tanane O., Abboud Y., Hassani FO., et al., Effect of surface modification on morphological, mechanical and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp-Polyurethane composite, Case studies in thermal engineering., 10, 550-9, 2017.
16. Gholami M., Ahmadi M. S., Tavanaie M. A., Khaje Mehrizi M., Effect of oxygen plasma treatment on tensile strength of date palm fibers and their interfacial adhesion with epoxy matrix, Science and Engineering of Composite Materials., 25, 5, 993-1001, 2018.
17. Rahman M.M., Khan M.A., Surface treatment of coir (Cocos nucifera) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties, Composites Science and Technology., 67, 11-12, 2369-2376, 2007.
18. Seki Y., Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fiber surface and its effect on the mechanical properties of jute/thermoset composites, Materials Science and Engineering., 508, 247-52, 2009.
19. Brodowsky H., Mäder E., Jute fibre/epoxy composites: Surface properties and interfacial adhesion, Composites science and technology., 72, 10, 1160-1166, 2012.
20. Orue A., et al., The effect of surface modifications on sisal fiber properties and sisal/poly (lactic acid) interface adhesion, Composites Part B: Engineering., 73, 132-138, 2015.
21. Dayo A.Q., et al., Natural hemp fiber reinforced polybenzoxazine composites: Curing behavior, mechanical and thermal properties, Composites Science and Technology., 144, 114-124, 2017.
22. Lee S.G., et al., Characterization of surface modified flax fibers and their biocomposites with PHB, in Macromolecular symposia., Wiley Online Library, 2003.
23. Oushabi A., et al., The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibers (DPFs): Study of the interface of DPF-Polyurethane composite, South African Journal of Chemical Engineering., 23, 116-123, 2017.
24. Van Krevelen D.W., Group contribution techniques for correlating polymer properties and chemical structure., Marcel Dekker: New York, 1992.
25. Zhou Y, Fan M, Chen L., Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview, Composites Part B: Engineering., 101, 31-45, 2016.
26. Goriparthi B.K., Suman K, Rao N.M, Effect of fiber surface treatments on mechanical and abrasive wear performance of polylactide/jute composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing., 43, 10, 1800-1808, 2012.
27. Nam T.H., et al., Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites, Composites Part B: Engineering., 42, 6, 1648-1656, 2011.
28. Arbelaz A., et al., Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling, Composites Science and Technology., 65, 10, 1582-1592, 2005.
29. Joseph K., Thomas S., Pavithran C, Effect of chemical treatment

- on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites, *Polymer*, 37, 23, 5139-5149, 1996.
30. Rong M.Z., et al., The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites, *Composites Science and technology*, 61, 10, 1437-1447, 2001.
 31. Wu C M., Lai W Y., Wang C Y., Effects of surface modification on the mechanical properties of flax/ β -polypropylene composites, *Materials*, 9, 5, 314, 2016.
 32. Manjula R., Raju NV., Chakradhar RPS., Johns J., Effect of thermal aging and chemical treatment on tensile properties of coir fiber, *Journal of natural fibers*, 15, 112-21, 2018.
 33. Sepe R., Bollino F., Boccarusso L., Caputo F., Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, 133, 210-7, 2018.
 34. Bessa J., Matos J., Mota C., Cunha F., Araújo I., Silva L., et al., Influence of surface treatments on the mechanical properties of fibre reinforced thermoplastic composites, *Procedia engineering*, 200, 465-71, 2017.
 35. Akhtar M.N., et al., Influence of alkaline treatment and fiber loading on the physical and mechanical properties of kenaf/polypropylene composites for variety of applications, *Progress in Natural Science: Materials International*, 26, 6, 657-664, 2016.
 36. Georgiopoulos P., Christopoulos A., Koutsoumpis S., Kontou E., The effect of surface treatment on the performance of flax/biodegradable composites, *Composites Part B: Engineering*, 106, 88-98, 2016.
 37. Hu R., Lim J K., Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced polylactic acid composites, *Journal of Composite Materials*, 41,13, 1655-1669, 2007.
 38. Mehta G., et al., Effect of fiber surface treatment on the properties of biocomposites from nonwoven industrial hemp fiber mats and unsaturated polyester resin, *Journal of applied polymer science*, 99, 3, 1055-1068, 2006.
 39. Dayo A.Q., et al., The influence of different chemical treatments on the hemp fiber/polybenzoxazine based green composites: Mechanical, thermal and water absorption properties, *Materials Chemistry and Physics*, 217, 270-277, 2018.
 40. Eslami-Farsani R., Effect of fiber treatment on the mechanical properties of date palm fiber reinforced PP/EPDM composites, *Advanced Composite Materials*, 24, 1, 27-40, 2015.
 41. Tripathy S., Dehury J., Mishra D., A Study On the effect of Surface treatment on the Physical and Mechanical properties of date-palm stem liber embedded epoxy composites, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishin, 2016.
 42. Alawar A., Hamed A.M., Al-Kaabi K., Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement, *Composites Part B: Engineering*, 40, 7, 601-606, 2009.
 43. Alawar A., Ahmed W., Al-Kaabi K., Comparative Study of Polypropylene Matrix Reinforced with Date Palm Fibers & Date Palm Twigs, in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Pub, 2010.
 44. Gomes A., et al., Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 8, 1811-1820, 2007.
 45. Van de Weyenberg I., et al., Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 9, 1368-1376, 2006.
 46. Haldar P., Modak N., Sutradhar G., Comparative evaluation of mechanical properties of sisal-epoxy composites with and without addition of aluminium powder, *Materials Today: Proceedings*, 4, 3397-406, 2017.
۴۷. [۴۷] غلامی م، احمدی م، توانایی م، خواجه مهریزی م، مروری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده بالیاف نخل خرما، فصلنامه علمی بسپارش، ۷، ۸۲-۹۳، ۲۰۱۷.
48. Yan L., Chouw N., Yuan X., Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 425-37, 2012.
 49. Flynn J., Amiri A., Ulven C., Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance, *Materials & Design*, 102, 21-9, 2016.
 50. Shanmugam D., Thiruchitrabalam M., Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites, *Materials & Design*, 50, 533-42, 2013.
 51. Sreekumar P., et al., Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 11, 1777-1784, 2009.

The Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Plant Fiber-reinforced Polymer Composites: A Review

Reyhaneh Sarpanahi¹, Mitra Tavakoli^{2*}

1- Textile Engineering Department, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran, P.O. Box: 89195-741

2- Chemical and Polymer Engineering Department, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran, P.O. Box: 89195-741

Abstract

Nowadays, natural fibers are widely used for reinforcing polymer composites. Research investigations on such polymer composites have become widespread due to the low weight, low cost, environmental compatibility, abundance, and acceptable physical and mechanical properties of plant fibers. These polymer composites normally suffer from the incompatibility of natural fibers with the polymer matrix. To improve compatibility, various surface treatments can be used. In this study, the effects of different surface treatments on shear, flexural, tensile, and impact strengths of plant fiber-reinforced polymer composites have been reviewed. The mechanical properties of plant fiber-reinforced composites depend on the type of plant fibers, polymer matrix, production techniques, surface treatment methods, and materials. The chemical treatments can have undesirable effects on the impact strength of plant fiber composites with few exceptions, such as silanization.

Keywords

plant fibers,
composite,
surface treatment,
mechanical properties,
strength

(*) Address Correspondence to M. Tavakoli, E-mail: mtavakoli@yazd.ac.ir