مجله علوم و فناوری نساجی
دوره ۸، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۰
صفحه ۳۶-۲۵، ۱۳۹۸
ISSN: ۲۱۵۱-۷۱۶۲

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

چکیده

امروزه، الیاف طبیعی به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد پیداکرده‌اند. تحقیقات درزمینه‌ی الیاف گیاهی به علت وزن کم، قیمت مناسب، سازگاری با محیط‌زیست، فراوانی و خواص فیزیکی و مکانیکی قابل‌قبول 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 استفاده‌شده است. در این مطالعه، اثرعملیات اصلاح سطح متفاوت برخواص 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 اصلاح کننده 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.

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

۱- مقدمه

الیاف طبیعی در اشـــکال مختلفی به‌صورت طناب یا رشته به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زیستی استفاده می‌شود، الیاف طبیعی به علت تجزیه‌پذیری زیســـت‌محیطی، هزینه کم، اســـتحکام ویژه خاص و خـــواص فیزیکی خـــوب در صنایعی ماننـــد هوافضا، خودرو، لوازم‌خانگی، ساختمان و ساخت‌وساز کارکرد یافته است. الیاف طبیعی عمدتاً در سه گروه گیاهی، حیوانی معدنی طبقه‌بندی می‌شوند[۱].

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

درصد مواد تشکیل‌دهنده و نوع الیاف گیاهی خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد[۲، ۳].

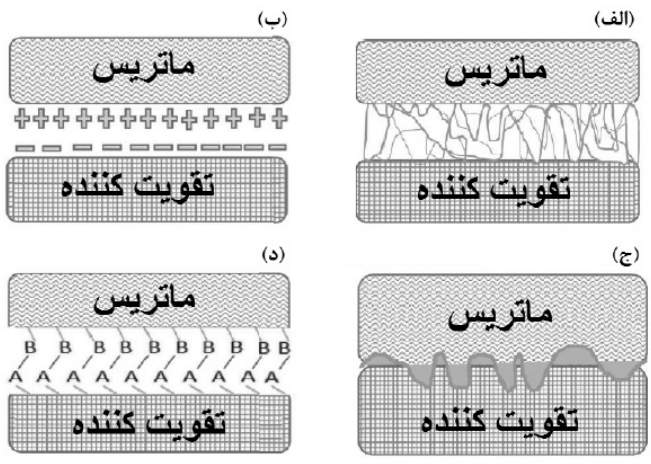
مشخص‌شده که الیاف گیاهی دارای توزیع نایکنواختی از مواد تشکیل دهنده و خواص مختلف هستند[۴] و خواص مکانیکی الیاف گیاهی نسبت به مصنوعی کمتر اســـت اگرچه الیاف گیاهی دارای خاصیت استحکام قابل قبولی هستند[۵] اما با اصلاح سطح‌های مختلف می توان خواص مکانیکی را تغییر داد. برای بررســـی خـــواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شـــده بـــا الیاف گیاهی، اثرات اصلاح ســـطحی در خصوص استحکام برشـــی، کششی، خمشی و ضربه‌ای و همچنین مدول کششی و خمشی بیان می‌شود.

*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 همی‌سلولز 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 تقویت‌شده 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 تقویت‌کننده و فاز ماتریس می‌شود و باعث شکست و تخریب کامپوزیت می گردد. بنابراین پیوند بین فازها عامل مهمی است که استحکام مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده 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 می دهد بنابراین مورفولوژی الیاف در استحکام آن‌ها اهمیت خاصی دارد [۷].

تعامل فاز تقویت‌کننده و فاز ماتریس در فصل مشترک به‌عنوان پیوند بین دو فاز[1] شناخته‌شده است. پیوند بین دو فاز عمدتاً به سازگاری فاز ماتریس با فاز تقویت‌کننده و شرایط سطحی فاز تقویت‌کننده 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 تقویت‌کننده می‌شود. درنتیجه، 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 پخش‌شدگی داخلی[2]، (ب) اتصال الکترواستاتیک[3]، (ج) اتصال مکانیکی[4] و (د) پیوند شیمیایی[5] (شکل ۱)[۱]. چسبندگی دو فاز تحت تأثیر دو عامل است جذب و پخش‌شدگی 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 به‌طور مستقیم منجر به پخش‌شدگی 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، به‌عنوان مثال زنگ‌زدگی منجر به زبری بالاتر کامپوزیت می‌گردد[۱].



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

۳- اصلاح سطح

روش‌های مختلفی برای اصلاح سطح منسوجات وجود دارد که به‌طورکلی با توجه به تغییراتی که بر سطح می گذارد به دو دسته‌ی 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 روش ها بوده که موجب کنده کاری و زبری سطح الیاف می‌گردد و مشاهده شده که پلاسمای هوا و نیتروژن باعث افزایش انرژی سطح می شود[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 می شود که استحکام و مدول نیز کاهش می یابد[۱۴].

۳-۲- اصلاح شیمیایی

اصلاح شیمیایی الیاف گیاهی مانند اصلاحات قلیایی، سیلان، الیگومر سیلوکسان[6] و... توپوگرافی سطح[7] و مورفولوژی[8] 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].

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

اصلاح سطح‌های متفاوت الیاف تاثیرات متفاوتی بر خواص مکانیکی از جمله استحکام برشی، کششی، خمشی و ضربه ای می گذارد که برخی از اصلاحات سطح و اثرات آن بر خواص مکانیکی کامپوزیت ها در ادامه بیان می‌شود.

۴-۱- استحکام برشی

استحکام اتصال بین دو فاز بستگی به استحکام برشی بین فازی[1] 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 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[2] اثر اصلاح پلاسمای اکسیژن بر الیاف خرما را نشان دادند و مشخص شد که کامپوزیت اصلاح شده، استحکام برشی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های اصلاح‌نشده 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[3] [۱۷] تاثیر 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[4] [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

جدول ۱: اثر اصلاحات شیمیایی بر استحکام برشی بین فازی

نوع لیف	کامپوزیت	نوع اصلاح	نتیجه	مراجع
جوت	اپوکسی	سلولز میکروکریستالین[5]	بهبوداستحکام	[۵]
جوت	اپوکسی	نانولوله‌های کربنی چندهسته‌ای[6]	بهبوداستحکام	[۵]
جوت	اپوکسی	قلیایی الیگومرسیلوکسان قلیایی+الیگومرسیلوکسان	بهبوداستحکام	[۱۸]
جوت	اپوکسی	قلیایی قلیایی + فنیل آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان[7] قلیایی + آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان + پراکندگی اپوکسی[8]	بهبوداستحکام	[۱۹]
کنف	پلی بنزواکسازین	قلیا	بهبوداستحکام	[۲۱]
کتان	پلی هیدروکسی بوتیرات	پلاسما	بهبوداستحکام	[۲۲]
خرما[9]	پلی اورتان	قلیا	بهبوداستحکام	[۲۳]
خرما	اپوکسی	پلاسما	بهبوداستحکام	[۱۶]

*تا درصد وزنی خاصی رخ می دهد و بعد از درصد خاص رفتار تغییر می کند

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. همانطور که از جدول ۱ مشـــخص است تمامی تکمیل ها اثر مثبتی بر اســـتحکام برشی و IFSS دارند که می‌توان دلیل آن را حذف مواد زائد از سطح لیف در تمامی انواع تکمیل‌ها دانست.

بهبود اســـتحکام بین فازی کافی نبوده و محققان کارهای خود را از یک اصلاح سطح به اصلاح ترکیبی شامل دو یا چند اصلاح به‌طور هم‌زمان یا پی‌درپی انتقال دادند.

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	قلیایی پرمنگنات[1] پراکسید[1] سیلان	بهبود استحکام و مدول کششی	[۲۶]
کنف	پلی هیدروکسی بوتیرات	پلاسما اتیلن	بهبود خواص کششی	[۲۲]
نارگیل	پلی (بوتلن سوکسینات[1])/ پلی‌اتیلن	قلیا	بهبود خواص کششی*	[۲۷]
کتان	پلی‌پروپیلن	استیلینگ	بهبود خواص کششی*	[۱۰]
کتان	پلی‌پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	بهبود خواص کششی	[۲۸]
سیسل	پلی‌اتیلن	قلیایی[1] ایزوسیونات[1] دیکومیل پراکسید[1] KMno4	بهبود خواص کششی	[۲۹]
سیسل	اپوکسی	قلیایی	بهبود استحکام کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	استیل	کاهش مدول کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	اتیل سینو[1]	کاهش مدول و استحکام	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	ارگان سیلان کوپلینگ[1]	بهبود استحکام کششی	[۳۰]
سیسل	اپوکسی	گرمایی[1]	بهبود استحکام و مدول کششی	[۳۰]
نارگیل	اپوکسی	اشعه ماوراءبنفش اشعه ماوراءبنفش+پیوند با اتیلن دی متیل آکریلات[1]	بهبود استحکام کششی*	[۱۷]
کتان	پلی‌پروپیلن	وینیل تری متوکسی سیلان[1] کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	بهبود مدول کششی	[۳۱]

1.Cardanol derivative of polytoluene di isocyanate (CTDIC)

نارگیل		عامل مقاومت حرارت[1]	بهبود استحکام کششی	[۳۲]
کنف	اپوکسی	سیلان	کاهش استحکام کششی	[۳۳]
کتان	ترموپلاستیک پلی الفین[1]	تمیز کردن + قلیایی[1] تمیز کردن + قلیایی + عامل بنزوئیل سیلان[1] تمیز کردن + قلیایی + اتصال آمینو سیلان[1] تمیز کردن + قلیایی+ اتصال اپوکسی سیلان[1] کرونا[1] کرونا + اتصال آمینو سیلان[1] کرونا + اپوکسی سیلان[1]	فقط کرونا+اپوکسی سیلان افزایش استحکام کششی	[۳۴]
کنف	پلی‌پروپیلن	قلیا محلول NaOH ۶ درصد وزنی	بهبود مدول و استحکام کششی	[۳۵]
کتان	پلی لاکتیک اسید اکوویو[16] بایونول[1]	وینیل تری دکسی سیلان[1] مالئیک آنیدرید[1] نرم‌کننده‌ی تریبوتیل سیترات[1]	بهبود استحکام کششی تنها در کتان/ پلی لاکتیک اسید با تکمیل وینیل تری دکسی سیلان	[۳۶]
کنف	پلی لاکتیک اسید	قلیا	بهبود استحکام کششی*	[۳۷]
کنف	پلی استر	الکلی آکریلونیتریل سیلان متیل اتیل کتون پراکسید[1]	بهبود استحکام و مدول کششی	[۳۸]
کنف	پلی‌اتیلن	سیکلو هگزان/اتانول قلیایی سیلان	بهبود استحکام و مدول کششی	[۳۹]
خرما	پلی پروپیلن/اتیلن پلی پروپیلنادین[1]	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	افزایش استحکام کششی	[۴۰]
خرما		پلاسما	افزایش استحکام کششی	[۱۶]
خرما خرما/شیشه	اپوکسی	قلیا	بهبود استحکام کششی	[۴۱]
خرما		قلیا	بهبود استحکام و مدول کششی*	[۴۲]
خرما	پلی پروپیلن	قلیا	بهبود استحکام کششی	[۴۳]

۴-۲- خواص کششی

پارامترهای عمده‌ای بر خواص کششی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی تأثیر می‌گذارد ازجمله: (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[1] [۱۲] با استانداردهای مختلف ASTM مانند ASTM D256، ASTM D33795، ASTM D3039 ASTM D3379-75 و ASTM D3039-Mاجرا 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 آون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت پنج روز باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. ژوزف و همکاران[2] [۲۹] دریافتند که پیوند الیاف سیسال با مشتقات کاردانول پلی‌اتیلن دی ایزوسیانات[3] 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] تاثیر 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[4] [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 می کند اما همچنین باعث می شود که الیاف به راحتی در ماتریس کشیده شود که باعث کاهش خصوصیات مکانیکی کامپوزیت ها می گردد.

هو و لیم[5] [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 توسط ماتریس دانسته اند. همچنین مشاهده کردند که با اصلاح قلیایی، استحکام کامپوزیت با کسر حجمی ۴۰٪ الیاف افزایش یافته است.

بسا و همکاران[6] [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 اعمال‌شده اثرات نامطلوبی بر استحکام کششی و مدول دارند به‌جز 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.

ژئورجیپولوس و همکاران[7] [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/ پلی‌لاکتیک 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 ارائه‌شده است. بااین‌حال، استحکام کششی کامپوزیت کتان/پلی لاکتیک اسید تحت اصلاح سیلان افزایش دارد درنتیجه 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 دیده‌شده، در کتان/اکوویو در تمامی اصلاحات بهبود دیده‌شده ولی در کتان/پلی لاکتیک اسید فقط در اصلاح مالئیک آنیدرید بهبود رخ می‌دهد. شست و شوی سطح اهمیت بخصوصی در الیاف گیاهی دارد چراکه بر روی سطح پکتین و مواد زائد وجود دارد که با شست و شو از بین می رود همچنین مشخص شده که عملیات ترکیبی اصلاح سطح تاثیر بیشتری بر استحکام دارد [۴۵].

بلدزکی و همکاران[8] [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.

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 تقویت‌شده 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	پلی‌پروپیلن	لستیلینگ	بهبود خواص خمشی*	[۱۰]
کتان	پلی‌پروپیلن	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	بهبود خواص خمشی	[۲۸]
کتان	پلی‌پروپیلن	وینیل تری متوکسی سیلان کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	بهبود مدول و استحکام خمشی	[۳۱]
کتان	پلی لاکتیک اسید	وینیل تری دکسی سیلان مالئیک آنیدرید نرم‌کننده‌ی تریبوتیل سیترات	کاهش استحکام خمشی	[۳۶]
کنف	پلی‌پروپیلن	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	پلی‌اتیلن	سیکلو هگزان/اتانول قلیایی سیلان	بهبود استحکام و مدول خمشی	[۳۹]
خرما	پلی پروپیلن/اتیلن پلی پروپیلنادین	کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن	افزایش استحکام خمشی	[۴۰]
خرما خرما/شیشه	اپوکسی	قلیا	بهبود استحکام خمشی	[۴۱]

هالدار و همکاران[1] [۴۶] کامپوزیت سیسال/اپوکسی را تهیه کردند آن‌ها دریافتند 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[2] [۳۰] تاثیر اصلاحات مختلف را بر الیاف سیسال بررسی کردند. مشخص شد که الیاف سیسال می توانند به طورِ مؤثر توسط مواد شیمیایی اصلاح شوند و اصلاحات شیمیایی معمولاً باعث ایجاد برخی گروه‌های فعال در سطح لیف می‌شوند که موجب استحکام بیشتر می گردد ولی درصد همی سلولز و لیگنین را در ساختار لیف می‌کاهند. در مقابل، عملیات گرمایی الیاف به دلیل افزایش بلورینگی سلولز می تواند 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 درحالی‌که درصد وزنی و نحوه توزیع الیاف نخل خرما در کامپوزیت از عوامل مهم در خواص مکانیکی آن است[۴۷].

گوریپارتی و همکاران[3] [۲۶] اثر اصلاحات سطحی مختلف ازجمله قلیایی، پرمنگنات، پراکسید و سیلان را بر الیاف جوت مشاهده کردند و مشخص شد که تمامی اصلاحات تاثیر مثبتی بر استحکام کششی دارد. اصلاح‌های سطحی تغییرات ساختاری و شیمیایی زیادی را در سطح الیاف ایجاد می کنند. این تغییرات سطح بر مکانیسم اتصال سطحی بین الیاف و ماتریس تأثیر می گذارد. 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 دهنده‌ی بین الیاف و ماتریس نقش مهمی در عملکرد مکانیکی کامپوزیت ها دارد.

معمولا در منابع مختلف مشاهده می شود که با افزایش درصد قلیا یا اصلاحاتی دیگر و یا زمان اعمال آن ابتدا رفتار استحکام کششی بهتر و سپس کاهش پیدا می کند. 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 همی‌سلولز در ساختار لیف، و آسیب زدن به لیف باعث کاهش استحکام کششی می‌گردد. در روش‌های مختلف به کار گرفته شده مشاهده می شود 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.

۴-۳- استحکام و مدول خمشی

مهمترین عوامل مؤثر بر استحکام خمشی و مدول کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی (الف) چسبندگی بین فازی بین ماتریس و الیاف ، (ب) میزان انتقال تنش بین ماتریس و الیاف می‌باشند. برخلاف استحکام کششی، استحکام خمشی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی عمدتاً به IFSS به‌جای استحکام الیاف بستگی دارد. به‌طورکلی، آزمون خمش سه نقطه‌ای[4] برای بررسی خواص خمشی با استفاده از دستگاه آزمون کشش جهانی (UTM) با استانداردهای ASTM D-790، JIS-7171 (ابعاد نمونه ۵۰ میلی‌متر ۲۵ میلی‌متر ۲ میلی‌متر)، GB-1499–83 (ابعاد نمونه ۶۵ میلی‌متر ۱۰ میلی‌متر ۳. ۵ میلی‌متر)، D790-02 (۱۵۴ میلی‌متر ۱۳ میلی‌متر ۴ میی‌متر)، D790-07 (۸۰ میلی‌متر ۱۰ میلی‌متر ۴ میلی‌متر) انجام می‌شود[۴۷].

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

ژئورجیپولوس و همکاران [۳۶]، همچنین استحکام خمشی را نیز مورد بررسی قرار داده اند 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 نرم‌کننده‌ی تریبوتیل سیترات 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 می یابد که علت آن بهبود تر شوندگی 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[5] نیز افزایش استحکام خمشی را با اصلاح قلیایی به همگن بودن و بهبود پیوند الیاف کنف با ماتریس پلی پروپیلن نسبت دادند[۳۵].

یان و همکاران[6] [۴۸]، مطالعه‌ای انجام دادند که اپوکسی با الیاف کتان تحت اصلاح قلیایی تقویت‌شده است و دریافتند که اصلاحات قلیایی با ۵ درصد وزنی NaOH در الیاف کتان نشان‌دهنده افزایش استحکام خمشی و افزایش مدول است که ممکن است به علت بهبود در زبری سطح الیاف و چسبندگی میان ماتریس و تقویت‌کننده دانست[۲۰، ۴۹].

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

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.

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

تجربیات نشـــان می‌دهد که اغلب اصلاحات ســـطحی تأثیر مثبتی بر استحکام خمشی داشته اســـت که می توان دلیل آن را حذف مواد زائد سطحی، افزایش چســـبندگی 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.

۴-۴- مقاومت در برابر ضربه

مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شـــده با الیاف گیاهی می‌تواند با استفاده از آزمون استاندارد ضربه اندازه‌گیری شود. آزمون ضربه چارپی[1] و ضربه ایزود[2] برای تجزیه‌وتحلیل تغییر حالت شـــکننده یا تغییر حالت انعطاف‌پذیر[3] در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱۰، ۴۴]. جدول ۴ اثر اصلاحات شـــیمیایی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شـــده با الیاف گیاهی را نشـــان می‌دهد. اصلاح الیاف گیاهی باعث افزایش اســـتحکام 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

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	پلی‌پروپیلن	استیلینگ	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۱۰]
سیسال	پلی‌استر	قلیایی (۵ درصد وزنی NaOH) عملیات حرارتی پرمنگنات بنزوسیون سیلان	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۵۱]
جوت	پلی لاکتیک اسید	قلیایی پرمنگنات پراکسید سیلان	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۲۶]
کنف		آکریلونیتریل سیلان متیل اتیل کتون پراکسید	بهبود مقاومت در برابر ضربه	[۳۸]
کنف	پلی‌اتیلن	سیکلو هگزان/اتانول قلیایی سیلان	بهبود مقاومت در برابر ضربه	[۳۹]
خرما	پلی پروپیلن/اتیلن پلی پروپیلنادین	کوپلیمرمالئیک‌آنیدرید-پلی‌پروپیلن	کاهش مقاومت در برابر ضربه	[۴۰]

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

و همـــکاران[۱۰] گزارش دادند که افـــزودن کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن به فاز ماتریس، منجر به کاهش مقاومت در برابر ضربه مواد کامپوزیت شده و باعث افزایش حالت شکنندگی[1] در فاز ماتریس می‌شود. از کارهای صورت گرفته مشخص‌شـــده که مقدار مقاومت در برابر ضربه در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی به‌طور کامل توسط نوع اصلاح شیمیایی کنترل نمی‌شود و به نوع الیاف گیاهی بستگی دارد. در کامپوزیت هیبرید جوت/خرما[2]، با افزایش درصد الیاف جوت مقدار مقاومت در برابر ضربه به دلیل بهبود انتقال تنش از ماتریس به الیاف، کاهش پیدا می‌کند این در حالی است که خواص کششی و خمشی افزایش می‌یابد[۵۰].

تجربیات موجود نشـــان می‌دهد که مقاومـــت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شـــده با الیاف گیاهی تحت تأثیر بسیاری از پارامترها مانند اتصال بین فازی، ترکیبات الیاف گیاهی، چقرمگی یا ســـفتی مواد و غیره قرار می‌گیرد. در واقع هر چه مقدار مواد انعطاف پذیر در ســـاختار کامپوزیت بیشتر شود مقاومت در برابر ضربه به دلیل افزایش حالت نرمی و چقرمگی، بهتر می شود.

۵- نتیجه‌گیری و خلاصه

اثرات اصلاحات شیمیایی مختلف بر خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی ارائه‌شده است. بر اساس بررسی تجربیات ارائه‌شده در این مقاله، نتیجه‌گیری‌های زیر انجام می‌شود:

۱- خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی به‌طور عمده توسط انتخاب الیاف گیاهی، انتخاب مواد ماتریس، انتخاب روش‌ها و درصد ماده در اصلاح سطحی و انتخاب تکنیک‌های تولید تنظیم می‌شود. الیاف گیاهی اصلاح‌نشـــده دارای ترکیبات غیر سلولزی و سطح صاف هستند که باعث اتصال مکانیکی بد و ناســـازگاری بین الیاف گیاهی و ماتریس می‌شود، بنابراین، اصلاحات شیمیایی الیاف گیاهی برای بهبود سازگاری، آب‌گریزی، پیوند فضایی و زبری سطح پیشنهاد شده است.

۲- مشـــاهده می‌شود که اصلاحات شـــیمیایی انحلال مانند مرسریزه و اســـتیله کردن، با حذف ترکیبات غیر سلولزی از الیاف گیاهی منجر به تضعیف استحکام کششی الیاف گیاهی می‌شوند، درحالی‌که خیس شدن و اتصال مکانیکی الیاف با ماتریس بهبود می‌یابند. بااین‌حال، اصلاحاتی مانند سیلان، الیگومر سیلوکسان ، کوپلیمر مالئیک آنیدرید-پلی‌پروپیلن تأثیر معنی‌داری بر زبری سطح الیاف گیاهی ندارند، درحالی‌که آب‌گریزی الیاف گیاهی و استحکام بین ماتریس و تقویت‌کننده در این روش‌ها به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود از روش‌های ترکیبی اســـتفاده شـــود تا بهبود زیادی در زبری سطح الیاف گیاهی و سازگاری الیاف گیاهی با مواد ماتریس ایجاد شود که سبب افزایش بیشتر استحکام کششی و خمشی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی می‌شود.

۳- اصلاحات فیزیکی نظیر اشـــعه ماورا بنفش و پلاسما موجب فعال شـــدن سطح لیف شـــده و با حذف مواد زائد سطحی و ایجاد زبری بر ســـطح لیف موجب افزایش چسبندگی بین الیاف و ماتریس می شود. همچنین پلاسما موجب ایجاد گروه های مختلف بر سطح لیف می‌گردد که به محیط گازی استفاده شده بستگی دارد. در پلاسما نوع گاز، زمان اعمال آن بر الیاف، نرخ گاز، فرکانس، توان و فشـــار بسیار اهمیت دارد و باید مقدار بهینه برای هر لیف طوری در نظر گرفته شـــود تا موجب اثرات مخرب بر لیف نشود.

۴- یافته‌ها نشـــان می‌دهد که اکثر اصلاحات شیمیایی اثرات مثبتی بر استحکام خمشی و اثرات نامطلوبی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شـــده با الیاف گیاهی دارند. بهبود استحکام برشی سطح بین دو فاز در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی، همیشه برای بهبود مقاومت در برابر ضربه مفید نیست در صورتی که برای بهبود استحکام کششی و خمشی مفید است. بیشترین اصلاح شیمیایی رایج یعنی مرسریزه کردن اثرات نامطلوبی بر مقاومت در برابر ضربه‌ی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی دارد، درحالی‌که اصلاحات شـــیمیایی خیلی کمی مانند سیلان، لاتکس و متیل اتیل کتون پراکســـید برای بهبود مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف گیاهی مفید است.

منابع

1. 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.
2. 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.
۳. کلاگرم، مرزبان مریدانی ا، مروری بر عمل‌آوری‌های شیمیایی الیاف گیاهی برای استفاده در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف گیاهی، فصلنامه علمی بسپارش، ۳، ۷۶-۸۷، ۲۰۱۳.
4. 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., Fangueiro 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، خدامی ا، ایزدان ح، مروری بر فرآیندهای اصلاح منسوجات تهیه شـــده ازالیاف پلی لاکتیک اســـید : 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 با نانوذرات 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 نســـاجی ایران، ۱۶ الی ۱۸ اردیبهشت۱۳۹۳.
۱۴. دوست حسینی ب، بابادی عکاشه ن، توکلی م، ملاحسینی ح، بررسی اثر پلاسمای سرد روی خواص فیزیکی و رنگ پذیری پلی استر و پلی پروپیلن، نهمین کنفرانس ملی مهندسی نســـاجی 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. Arbelaiz 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 با الیاف نخل خرما، فصلنامه علمی بسپارش، ۷۰، 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., Thiruchitrambalam 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.