

Manufacturing and Investigating Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with Natural Fibers

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abolhasani Sh.¹ MSc,
Fallah F.*¹ PhD,
Akbari J.¹ PhD

How to cite this article

Abolhasani Sh, Fallah F, Akbari J. Manufacturing and Investigating Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with Natural Fibers. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):75-83.

ABSTRACT

By increasing the level of public awareness, more recyclable and natural materials are used. The aim of this research was to fabricate natural fiber reinforced composites and to investigate the effects of fiber length (5mm and 9mm), fiber mass percent (5%, 10%, 12.5%, and 15%), and fiber surface treatment on tensile, flexural, and water absorption properties of the fabricated composite. The experiments were designed, by the Taguchi method. In this research, epoxy resin and kenaf fiber have been used. Tensile, flexural and water absorption tests were performed on the samples. The highest values were 37.67 MPa for tensile strength, 4.94 GPa for tensile modulus, 31.78 MPa for flexural strength, and 6.05 GPa for flexural modulus. The lowest percentage of water absorption was 0.3%. Alkali treatment improved tensile, flexural, and water absorption properties. The optimum of fiber mass percent was 12.5% to maximize tensile strength, tensile modulus, and flexural strength, 10% to maximize flexural modulus, and 5% to minimize water absorption. Except for the tensile modulus, the effect of fiber length on the mechanical properties of the composite is observed to be less pronounced than the other two factors. To maximize the tensile modulus, the fiber length is better to be 9 mm. In this study, the values obtained for the tensile strength and tensile modulus of the fabricated composite are more than the ones in the previous works. Finally, the strength and tensile modulus obtained experimentally were compared with the ones obtained via two micro-mechanical models, modified rule of mixture, and modified Halpin-Tsai model.

Keywords Composite; Mechanical Properties; Kenaf Fiber; Epoxy; Micromechanical Models

CITATION LINKS

[1] Progress report on natural fiber reinforced composites [2] State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world [3] Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites [4] A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites [5] Mechanical properties and water absorption behavior of polypropylene/ijuk fiber composite by using silane treatment. Procedia Manufacturing [6] Characterization and modeling of process parameters on tensile strength of short and randomly oriented Borassus Flabellifer (Asian Palmyra) fiber reinforced composite [7] Study on the mechanical properties of epoxy composite using short sisal fibre [8] Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices [9] Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite [10] Factorial study on the tensile strength of a coir fiber-reinforced epoxy composite [11] Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: Micro-mechanics and strength prediction modelling [12] Biocomposites from abaca strands and polypropylene, Part I: Evaluation tensile properties [13] Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics [14] Predicting the tensile strength of natural fibre reinforced thermoplastics [15] The mechanical properties of natural fiber composites [16] Flexural properties of fully biodegradable alpha-grass fibers reinforced starch-based thermoplastics [17] Cellulose fiber reinforced nylon 6 or nylon 66 composites [18] Mechanical properties of random discontinuous fiber composites manufactured from wetlay process [19] Effect of fiber parameters on physical, mechanical and water absorption behaviour of coir fiber-epoxy composites [20] mechanical and microstructure characterization of Coconut spathe fibers and Kenaf bast fibers reinforced epoxy polymer matrix composites

¹Applied Mechanics Division, Mechanical Engineering School, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Applied Mechanics Division, Sharif University of Technology, Azadi Avenue, Tehran, Iran.
Postal Code: 1458889694
Phone: +98 (21) 66165516
Fax: +98 (21) 66000021
fallah@sharif.edu

Article History

Received: March 04, 2018
Accepted: September 14, 2018
ePublished: January 01, 2019

ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف طبیعی

شهرزاد ابوالحسنی MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

فمیدا فلاح PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چواد اکبری PhD

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

با بالا رفتن سطح آگاهی عمومی، از مواد بازیافت پذیر و طبیعی بیشتر استفاده می شود. هدف از این پژوهش ساخت کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی و بررسی تأثیر پارامترهای طول الیاف (۵ میلی متر و ۹ میلی متر)، درصد جرمی الیاف (۵٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۵٪) و اصلاح الیاف روی خواص کششی، خمشی و جذب آب کامپوزیت ساخته شده بود. طرح ریزی آزمایش ها با استفاده از آرایه تاگوچی انجام شده است. در این پژوهش از رزین اپوکسی، الیاف کتف و روش ساخت دستی استفاده شده است. آزمون های کشش، خمش و جذب آب روی نمونه های ساخته شده انجام گرفت و بیشترین استحکام کششی ۳۷/۶۷ MPa، بیشترین مدول کششی ۴/۹۴ GPa، بیشترین استحکام خمشی ۷۸/۳۱ MPa، بیشترین مدول خمشی ۶/۰۵ GPa و درصد جذب آب ۰/۳٪ بدست آمد. اصلاح الیاف به روش قلیایی خواص کششی، خمشی و جذب آب را بهبود بخشید. حالت بهینه برای درصد جرمی الیاف برای ماکزیم سازی استحکام کششی، مدول کششی و استحکام خمشی ۱۲/۵٪، به منظور ماکزیم سازی مدول خمشی ۱۰٪ و برای مینیم کردن میزان جذب آب ۵٪ به دست آمد. به جز در نتایج مدول کششی، طول الیاف نسبت به دو عامل دیگر تأثیر ناچیزی دارد. برای ماکزیم سازی مدول کششی، طول الیاف ۹ میلی متر بهتر است. در این پژوهش استحکام کششی و مدول الاستیسیته کششی بیشتری نسبت به کارهای پیشین به دست آمده است. در نهایت نیز استحکام و مدول کششی به دست آمده از آزمایش با نتایج حاصل از دو مدل میکرو مکانیکی قانون اصلاح شده مخلوط و هالپین-تسای اصلاح شده مقایسه شد.

کلیدواژه ها: کامپوزیت، خواص مکانیکی، الیاف کتف، اپوکسی، مدل های میکرو مکانیکی

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۲۳

* نویسنده مسئول: fallah@sharif.edu

۱- مقدمه

امروزه با توجه به بالا رفتن سطح آگاهی عمومی، از مواد بازیافت پذیر و مواد سبز بیشتر استفاده می شود. در ساخت کامپوزیت ها نیز این مساله مورد توجه قرار گرفته و صنایع گوناگون به استفاده از کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی روی آورده اند. مطالعات اخیر نشان می دهد که میزان مبادلات مواد کامپوزیتی با الیاف طبیعی در سال ۲۰۱۰ به مبلغ ۲۸۹/۳ میلیون دلار و در سال ۲۰۱۶ به ۵۳۱/۳ میلیون دلار افزایش یافته است. همچنین این مطالعات نشان می دهد که استفاده از کامپوزیت ها با الیاف طبیعی در صنایع خودروسازی در حال افزایش است. در سال ۲۰۱۶ صنعت خودروسازی بزرگترین صنعتی بوده که از این مواد استفاده نموده است [1]. در حال حاضر بسیاری از قطعات خودرو از جمله پنل در، پشتی صندلی و کاور سقف از کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی ساخته می شوند [2]. استفاده از الیاف طبیعی محدود به صنایع خودروسازی نیست و امروزه بسیاری از صنایع از این الیاف استفاده می کنند که از جمله آن می توان به ساخت پروفیل های در و پنجره اشاره کرد.

از مزایای الیاف طبیعی، قیمت کم (حدود کمتر از یک سوم قیمت الیاف شیشه)، چگالی کم، غیرساینده بودن، قابلیت کشت، مصرف انرژی پایین، خواص مخصوص بالا (به طور مثال نسبت استحکام به وزن بالا)، تجدیدپذیری، در دسترس بودن، فراوانی و تجزیه پذیری است [1]. برای آماده سازی الیاف طبیعی نیاز به صرف انرژی زیادی نیست و به دلیل گرمازا بودن می توان آنها را بعد از عمرشان سوزاند. در مقابل، الیاف طبیعی معایبی هم دارند که می توان به جذب رطوبت و پایداری حرارتی پایین اشاره کرد. با استفاده از روش های قلیایی می توان خواص الیاف طبیعی را بهبود بخشید. مهم ترین قسمت های تشکیل دهنده الیاف طبیعی عبارت از سلولز، همی سلولز، لیگنین و ترکیبات استخراجی هستند. هر کدام از این قسمت ها ویژگی های شیمیایی خاص خود را دارند که در تعیین ویژگی های شیمیایی الیاف نقش تعیین کننده ای دارند. سلولز اصلی ترین عضو این ترکیب بوده که استحکام، سفتی و پایداری ساختاری الیاف به آن وابسته است. سلولز شامل سه گروه هیدروکسیل (OH) بوده و همی سلولز دارای ۵ یا ۶ زنجیره کربن است. لیگنین نیز ساختار آمرف دارد. هر چه درصد سلولز، بیشتر و زاویه بین الیاف سلولز با راستای اصلی الیاف کمتر باشد، خواص استحکامی الیاف بهتر بوده و هر چه درصد لیگنین بیشتر باشد، تمایل الیاف به جذب آب بیشتر است [3]. خاصیت جذب رطوبت الیاف را می توان به کمک عملیات شیمیایی روی الیاف کاهش داد. وقتی محلول سدیم هیدروکسید روی الیاف عمل می کند، گروه هیدروکسیل الیاف را کاهش می دهد و در نتیجه مقاومت در برابر نفوذ رطوبت را افزایش می دهد. همچنین درصد همی سلولز و لیگنین را کاهش می دهد که در نتیجه، الیاف حاصل یکنواخت تر می شود. همچنین قطر الیاف کاهش و وجه منطقی افزایش می یابد [4]. در ادامه برخی از پژوهش های انجام شده در این زمینه بررسی می شود. زهاری و همکاران [5] روی خواص مکانیکی و خاصیت جذب آب در کامپوزیت زمینه پلی پروپیلن با الیاف تقویت کننده ایجوک کار کردند. ایجوک نوعی گیاه است که در اندونزی کشت می شود. در این پژوهش از الیاف با طول کوتاه استفاده شده است. الیاف ابتدا به طول ۲ میلی متر، خرد و سپس با استفاده از عملیات سیلان اصلاح شدند. در نهایت مشاهده شد که اصلاح الیاف سبب بهبود خواص مکانیکی شد. بالاکریشنا و همکاران [6] روی فاکتورهای ساخت و اندازه گیری استحکام کششی کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی کار کردند. در این پژوهش از الیاف نوعی نخل که در جنوب هند می روید استفاده شده و همچنین رزین مورد استفاده، اپوکسی است. الیاف به طول های ۳، ۵ و ۷ میلی متر خرد شدند. الیاف خرد شده به مدت ۲، ۴ و ۶ ساعت درون محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۵٪ غوطه ور شدند. پس از ساخت و تست گیری از نمونه ها مشاهده شد که اصلاح الیاف به روش قلیایی باعث بهبود خواص کششی کامپوزیت ساخته شده می شود. ماوریا و همکاران [7] خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف طبیعی سبزال را مطالعه کردند. الیاف سبزال به طول های ۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلی متر بریده شدند. تست کشش، خمش و ضربه روی نمونه ها انجام شد. نتایج تست کشش نشان داد که نمونه تقویت شده با الیاف به طول ۱۰ میلی متر، مدول و استحکام بالاتری دارد. در نتایج تست خمش نیز همانند تست کشش، کامپوزیت با طول الیاف ۱۰ میلی متر خواص بهتری از خود نشان داد. ولی در نتایج ضربه، نمونه با طول الیاف ۲۰ میلی متر خواص بالاتری نسبت به بقیه از خود نشان داد. گپیناس و همکاران [8] روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی جوت کار

تصادفی درون زمینه توزیع شده، بسیار مشکل است. بررسی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که عمدتاً از مدل اصلاح شده قانون مخلوط برای پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه استفاده می‌شود. در دو پژوهش [11, 12] از مدل اصلاح شده قانون مخلوط، در دو پژوهش دیگر [13, 14] از مدل‌های اصلاح شده قانون مخلوط، اصلاح شده هالپین- تسای و کلی- تیسون استفاده شده است و از نتایج ارایه شده می‌توان مشاهده نمود که مدل اصلاح شده هالپین- تسای و مدل اصلاح شده قانون مخلوط تطابق بهتری با نتایج تجربی نشان می‌دهند. در یک پژوهش [15] نیز مدل‌های مختلفی بررسی شد که در نهایت نتایج مدل اصلاح شده قانون مخلوط با نتایج تجربی، سازگاری بیشتری داشته است. در این پژوهش نیز تصمیم گرفته شد که از مدل اصلاح شده قانون مخلوط و مدل اصلاح شده هالپین- تسای استفاده شود. در ادامه این دو مدل بررسی می‌شوند.

۱-۲- مدل اصلاح شده قانون مخلوط

مدل قانون مخلوط برای کامپوزیت‌های تقویت شده در یک راستا است. این مدل برای پیش‌بینی مدول و استحکام کششی کامپوزیت روشی مرسوم است. در این مدل اثر جهت‌گیری الیاف و برهم‌کنش الیاف و ماتریس در نظر گرفته نمی‌شود. به نقل از یک مرجع [16]، کرتیس مدل قانون مخلوط را به منظور در نظر گرفتن پارامترهای فوق اصلاح کرد. مدول الاستیسیته و استحکام کششی کامپوزیت در این مدل با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند.

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$\sigma_c = \eta_3 \eta_4 \sigma_f V_f + \sigma_m^* V_m \quad (2)$$

که σ_m^* تنش ماتریس در کرنش شکست کامپوزیت است و پارامترهای η_1 و η_3 تاثیر جهت‌گیری الیاف را نشان می‌دهند که برای حالت جهت‌گیری تصادفی سه‌بعدی مقدار $\eta_1 = 0.65$ و $\eta_3 = 0.2$ در نظر گرفته می‌شود [12]. در این پژوهش نیز همین اعداد در نظر گرفته شده است. همچنین پارامترهای η_2 و η_4 تاثیر برهم‌کنش الیاف و ماتریس را نشان می‌دهند و با استفاده از روابط ۳-۷ به دست می‌آیند.

$$\eta_2 = 1 - \frac{\tanh(\beta s)}{\beta s} \quad (3)$$

که s نسبت طول به قطر الیاف است و β به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta^2 = \frac{E_m}{E_f(1 - \nu_m) \ln \sqrt{\frac{\pi}{0.004}}} \quad (4)$$

پارامتر l_c طول بحرانی الیاف است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$l_c = \frac{d \cdot \sigma_f}{2\tau} \quad (5)$$

اگر طول الیاف کوتاه‌تر از طول بحرانی الیاف باشد، مقدار η_4 از رابطه ۶ و اگر طول الیاف بزرگ‌تر از طول بحرانی الیاف باشد، مقدار η_4 از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$\eta_4 = \frac{l}{2l_c} \quad (6)$$

$$\eta_4 = 1 - \frac{l_c}{2l} \quad (7)$$

طول بحرانی الیاف، پارامتری است که میزان تنش منتقل شده از

کردند. در این پژوهش از دو رزین اپوکسی و پلی‌استر که هر دو ترموست هستند، استفاده شده است. الیاف به طول ۵ میلی‌متر، بریده و سپس در محلول سدیم هیدروکسید به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها تحت تست‌های کشش، خمش، ضربه، سختی‌سنجی و سطح‌سنجی قرار گرفتند. نتایج تست کشش نشان داد که کامپوزیت زمینه اپوکسی، استحکام و مدول کششی بهتری دارد. در نتایج تست خمش مشخص شد که استحکام خمشی، زمینه پلی‌استر بالاتر، ولی مدول خمشی زمینه اپوکسی بیشتری دارد. در تست ضربه نمونه، کامپوزیت زمینه پلی‌استر خواص مطلوب‌تری از خود نشان داد. سختی دو نمونه نزدیک به هم و تقریباً یکسان بود. در آزمایش سطح‌شناسی نیز مشخص شد که پیوند زمینه اپوکسی با الیاف جوت بهتر از پیوند بین پلی‌استر با آن الیاف است. همچنین در نمونه با زمینه اپوکسی فضای خالی کمتری مشاهده شد. در حالت کلی خواص بهتری در نمونه با زمینه اپوکسی به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری بهتر اپوکسی با الیاف جوت است. کومار و همکاران [9] روی خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف چوب مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش از خاک اره به عنوان الیاف تقویت‌کننده استفاده شده است. ذرات چوب بعد از بریده شدن در اندازه‌های ۲ میکرومتر جدا سازی شدند. در نهایت نتایج تست خمش و کشش نشان داد که درصد وزنی بهینه برای الیاف، ۱۰٪ است و با افزایش درصد الیاف از این مقدار، پیوند بین الیاف و زمینه ضعیف‌تر می‌شود. رملی و همکاران [10] کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف نارگیل را مطالعه کردند که نتایج نشان داد با افزایش درصد الیاف و افزایش زمان پخت، خواص کششی بهبود پیدا می‌کند.

همان طور که گفته شد کشورهای توسعه‌یافته در حال استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی هستند. در پژوهش‌هایی که بررسی شد از الیافی استفاده شده است که در آن منطقه به فراوانی وجود دارد. در این پژوهش نیز در ساخت کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی از الیاف کنف استفاده شده است که داخل کشور کشت می‌شود. همچنین در این پژوهش از رزین اپوکسی به عنوان زمینه استفاده می‌شود. سپس تاثیر پارامترهای طول الیاف، درصد جرمی الیاف و اصلاح الیاف روی خواص کششی، خمشی و جذب آب کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی بررسی می‌شود. عامل طول الیاف در دو سطح ۵ و ۹ میلی‌متر، عامل درصد جرمی الیاف در چهار سطح ۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵٪ و عامل اصلاح الیاف نیز در دو دسته الیاف اصلاح شده و اصلاح نشده هستند. به همین منظور نمونه‌هایی با طول و درصد وزنی مختلف الیاف ساخته شد که برخی از آنها اصلاح شده و برخی اصلاح نشده‌اند و تست‌های خمش، کشش و جذب آب روی آنها انجام شد. طرح‌ریزی آزمایش‌ها در نرم‌افزار MINITAB با استفاده از آرایه تاگوچی انجام گرفت. در نهایت، خواص کششی (استحکام و مدول الاستیسیته کششی) نمونه‌های ساخته شده، با استفاده از دو مدل میکرومکانیک اصلاح شده قانون مخلوط و اصلاح شده هالپین- تسای محاسبه و نتایج آن با نتایج به دست آمده از آزمایش مقایسه شد.

۲- مدل‌های میکرومکانیک

مدل‌های میکرومکانیک مختلفی برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت‌ها وجود دارند. عمدتاً این مدل‌ها برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بلند و پیوسته هستند. پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه که الیاف به‌طور

۳-۲- روش کار

پارامترهای مورد بررسی عبارت از طول الیاف، درصد جرمی الیاف و اصلاح الیاف هستند. طول الیاف شامل دو سطح است که در سطح اول الیاف با طول ۹ میلی‌متر (بازه ۷ تا ۱۰ میلی‌متر) و در سطح دوم الیاف با طول ۵ میلی‌متر (بازه ۳ تا ۶ میلی‌متر) بریده شدند. درصد جرمی الیاف شامل چهار سطح ۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵٪ بوده و به‌عنوان پارامتر آخر، ساخت کامپوزیت با دو نوع الیاف اصلاح‌شده و الیاف اصلاح‌نشده انجام شده است. آزمایش‌های مورد نیاز با استفاده از آرایه‌های تاگوچی طرح‌ریزی شده است. استفاده از آرایه L_8 تاگوچی نشان می‌دهد که با انجام ۸ آزمایش می‌توان نتایج را تحلیل و تاثیر پارامترها را بررسی نمود. این ۸ آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MINITAB طرح‌ریزی شده و نتایج آن در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱) نتایج طرح‌ریزی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه L_8 تاگوچی

شماره	درصد جرمی الیاف (%)	طول الیاف (mm)	نوع الیاف
۱	۵	۹	اصلاح‌نشده
۲	۵	۵	اصلاح‌شده
۳	۱۰	۹	اصلاح‌نشده
۴	۱۰	۵	اصلاح‌شده
۵	۱۲/۵	۹	اصلاح‌شده
۶	۱۲/۵	۵	اصلاح‌نشده
۷	۱۵	۹	اصلاح‌شده
۸	۱۵	۵	اصلاح‌نشده

برای جداسازی الیاف از درون ساقه گیاه کنف، ابتدا ساقه گیاه کنف به مدت ۴ روز در آب خیسانده شد. سپس الیاف مورد نظر از پوست ساقه جدا شدند. الیاف جداشده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 60°C درون آون خشک و پس از آن الیاف به طول‌های مورد نظر خرد می‌شوند. شکل ۱، الیاف خردشده کنف را نشان می‌دهد. به دلیل این که رطوبت موجود در الیاف باید به‌طور کامل خشک شود، الیاف پس از خردشدن به مدت ۳ ساعت در دمای 80°C درون آون قرار گرفتند تا آماده عملیات ساخت شود. اصلاح الیاف به روش قلیایی صورت گرفت. الیاف پس از خردشدن در محلول سدیم‌هیدروکسید به غلظت ۱۰٪ به مدت ۲ ساعت، غوطه‌ور و سپس به مدت ۴ ساعت درون آون در دمای 80°C خشک شدند.



شکل ۱) الیاف خردشده کنف

نمونه‌ها با استفاده از روش دستی ساخته شدند. برای این منظور قالبی ساخته شد که شامل دو صفحه آلومینیومی است که بین آن یک واشرلاستیکی قرار می‌گیرد. این واشر یک فضای خالی به ابعاد $17 \times 17 \times 2.5$ میلی‌متر ایجاد می‌کند. به‌منظور جداسازی راحت

زمینه به الیاف را مشخص می‌کند. اگر طول الیاف از طول بحرانی کوچک‌تر باشد، الیاف نمی‌توانند تمامی تنش برشی را تحمل کنند و از زمینه جدا می‌شوند. در صورتی که طول الیاف از طول بحرانی بیشتر باشد، کامپوزیت خواص مطلوبی نشان می‌دهد [15]. مقدار l_c را می‌توان از رابطه زیر نیز محاسبه کرد [17]:

$$l_c = 2.303d \left[\frac{E_f(1 + v_m)}{E_m} \right]^{0.5} \left[\ln \left(\frac{\pi}{0.004} \right) \right]^{0.5} \quad (8)$$

در این پژوهش، مقدار l_c از رابطه ۷ محاسبه شده است.

۳-۲- مدل هالپین-تسای

معادله هالپین-تسای معمولاً برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بلند و پیوسته به کار می‌رود. به نقل از یک مرجع [18]، نیلسون معادله هالپین-تسای را برای الیاف کوتاه با توزیع دلخواه اصلاح کرد که مدول الاستیسیته و استحکام کششی کامپوزیت در این مدل به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_c = E_m \left(\frac{1 + A\eta V_f}{1 - \eta\psi V_f} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_c = \sigma_m^* \left(\frac{1 + A\eta^* V_f}{1 - \eta^* \psi V_f} \right) \quad (10)$$

که

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - \Phi_{max}}{\Phi_{max}^2} \right) V_f \quad (11)$$

$$A = l/d \quad (12)$$

$$\eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + A} \quad (13)$$

$$\eta^* = \frac{\sigma_f/\sigma_m - 1}{\sigma_f/\sigma_m + A} \quad (14)$$

پارامتر σ_m^* تنش ماتریس در کرنش شکست کامپوزیت و پارامتر Φ_{max} نیز بیشترین کسر بسته‌بندی است که برای توزیع تصادفی الیاف معادل $\Phi_{max} = 0.82$ در نظر گرفته می‌شود [18].

۳- مواد، روش کار و تست‌ها

۳-۱- مواد

ترموست‌ها عمدتاً در دمای اتاق به‌صورت مایع هستند و برای شروع فرایند ساخت نیاز به پیش‌عملیات ندارند. همچنین روش‌های ساخت این مواد ساده‌تر است و حتی می‌توان آنها را به‌صورت دستی نیز ساخت. بین ترموست‌ها نیز استفاده از رزین اپوکسی نسبت به بقیه متداول‌تر است. همچنین مطالعات پیشین نشان داده است که این رزین با الیاف طبیعی، سازگاری بهتری دارد [8]. بنابراین در این پژوهش از رزین اپوکسی به‌عنوان زمینه استفاده شد. نام رزین اپوکسی استفاده‌شده ای‌پی‌آر ۱۰۸۰ (شرکت کامپوزیت پخش لیوارد) است. رنگ این رزین، زرد و هاردنر متناسب آن نیز ای‌پی‌اچ ۱۰۸۰ بوده که به رنگ آبی روشن است. نسبت ترکیب رزین به هاردنر ۱۰۰ به ۱۵ است. ویسکوزیته ترکیب ۷۰۰ سانتی‌پوز و چگالی آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. الیاف مورد استفاده در این پژوهش الیاف کنف بوده که از داخل ایران و ساقه گیاه کنف از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران واقع در شهرستان ورامین تهیه شده است.

توسط دستگاه کشش مدل Z100 (شرکت زوویکرول؛ آلمان) انجام شد. ظرفیت این دستگاه ۱۰۰kN بوده و سرعت انجام این تست ۳/۷۵ میلی‌متر در دقیقه و طول گیج ۵۰ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری استحکام خمشی نمونه‌های ساخته شده، تست خمشی سه نقطه مطابق استاندارد ASTM 790 توسط دستگاه هانسفیلد به مدل H10KS انجام شد. سرعت انجام تست خمشی ۱/۲ میلی‌متر در دقیقه و فاصله دو تکیه‌گاه ۴۸ میلی‌متر است. تست جذب آب کامپوزیت مطابق استاندارد ASTM 570 انجام شد. نمونه‌های برش زده شده ابتدا به مدت ۴ ساعت در دمای ۷۰°C درون آن قرار داده شدند. سپس به کمک ترازو، وزن آنها با دقت ۰/۰۰۱g اندازه‌گیری شد. پس از آن به مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از آب مقطر، خارج و توسط پارچه خشک شدند و مجدداً وزن آنها اندازه‌گیری شد. با استفاده از رابطه ۱۵ میزان درصد جذب آب توسط نمونه‌ها محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100 \quad (15)$$

۴- نتایج

نتایج تست الیاف در جدول ۲ ارایه شده است. مشاهده الیاف کف زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد که قطر الیاف در بازه بین ۵۸ تا ۸۸ میکرون قرار دارد. از میانگین‌گیری نتایج ۹ نمونه، قطر میانگین الیاف، ۷۴/۴ میکرون به دست آمد. نتایج تست کشش الیاف نشان می‌دهد که بیشترین استحکام کششی آنها ۴۰۳MPa، کمترین استحکام کششی ۱۸۰MPa و مدول الاستیسیته الیاف تست شده بین ۱۵/۳ تا ۲۳/۲GPa است. از میانگین‌گیری نتایج به دست آمده از تست کشش الیاف، استحکام الیاف ۳۰۲/۱MPa و مدول الاستیسیته الیاف ۱۸/۲GPa در نظر گرفته شد. با بررسی مراجع مشاهده می‌شود که استحکام الیاف کف بین ۲۴۵ تا ۷۳۵MPa، الیاف پنبه بین ۲۸۷ تا ۸۰۰MPa و الیاف نارگیل بین ۱۳۱ تا ۱۷۵MPa گزارش شده است^[15]، بنابراین الیاف انتخاب شده استحکام مطلوبی دارند.

نتایج تست کشش روی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در جدول ۳ ارایه شده است. مشاهده می‌شود که استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده بین ۳۰/۲۵ تا ۳۷/۶۷MPa و مدول الاستیسیته کششی آنها بین ۳/۵۱ تا ۴/۹۴ GPa است. نمونه ۷ بیشترین استحکام کششی و نمونه ۵ بیشترین مدول الاستیسیته را دارد. مقایسه نمونه‌های ساخته شده با نمونه بدون الیاف (نمونه ساخته شده از رزین اپوکسی) نشان می‌دهد که در اثر افزودن الیاف به پلیمر، استحکام کششی کاهش یافته و در پژوهش‌های پیشین نیز این امر مشاهده شده است. الیاف خرد و کوتاه شده که درون رزین پخش شده‌اند، باعث ایجاد تمرکز تنش شده و استحکام کششی به این دلیل کاهش یافته است. بررسی نتایج مدول الاستیسیته کششی نشان می‌دهد که تقویت کامپوزیت باعث بهبود و افزایش مدول الاستیسیته الیاف شده است. در کارهای پیشین انجام شده با زمینه اپوکسی و الیاف طبیعی کوتاه (الیاف خرما^[6]، سیزال^[7]، جوت^[8]، خاک اره^[9]، نارگیل^[10, 19])، استحکام کششی کامپوزیت‌های ساخته شده بین ۱۳ تا ۳۵MPa و مدول الاستیسیته کششی آنها بین ۰/۴ تا ۲/۵ GPa گزارش شده است. در پژوهش دیگری که از الیاف کوتاه کف و رزین اپوکسی استفاده شده، استحکام کششی نمونه ساخته شده ۲۵MPa گزارش شده است^[20]. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که

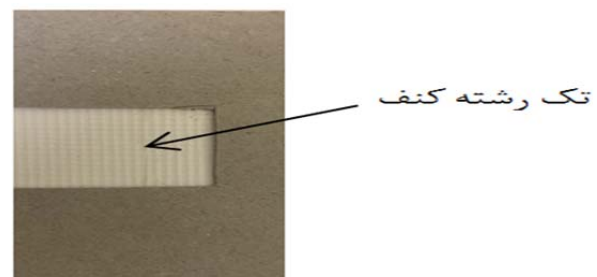
نمونه‌های ساخته شده از کف قالب، روی سطح قالب، واکس جداکننده زده شد. الیاف خرد شده به صورت دستی درون قالب پخش شدند، به طوری که توزیع متناسب و یکنواخت داشته باشند. پس از پخش الیاف درون قالب، رزین و هاردنر به نسبت ۱۰۰ به ۱۵ درون بشر مخلوط شد. به منظور جدا کردن حباب‌های درون رزین، بشر حاوی مخلوط رزین و هاردنر در یک فضای بسته قرار داده شد. این محفظه به یک پمپ خلا متصل است که هوای داخل آن را خالی می‌کند. پس از ۱۵ دقیقه بشر از فضای خلا، خارج و مخلوط رزین و هاردنر روی الیاف درون قالب ریخته شد. سپس صفحه بالایی قالب با استفاده از پیچ روی صفحه پایینی بسته شد. نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت و سپس به مدت ۴ ساعت در دمای ۶۰°C درون آن پخته شد. شکل ۲ ورق کامپوزیتی ساخته شده را نشان می‌دهد. پس از آن که ورق کامپوزیتی پخته و از قالب خارج شد، با توجه به توصیه شرکت فروشنده رزین، باید مدت ۷ روز از عملیات ساخت بگذرد تا ورق ساخته شده به استحکام نهایی برسد. پس از گذشت ۷ روز ورق کامپوزیتی برش داده شد. مطابق استاندارد نمونه‌های تست کشش و خمش توسط لیزر و نمونه‌های تست جذب آب توسط اهر برش داده شدند.



شکل ۲) ورق کامپوزیتی ساخته شده

۳-۳- تست‌ها

برای تعیین قطر الیاف، ۹ نمونه از الیاف در زیر میکروسکوپ نوری کامفوکال مشاهده شدند. این میکروسکوپ، نوری (لیکامیکروسیستم؛ آلمان) بود و برای تحلیل عکس‌های گرفته شده و تعیین قطر الیاف از نرم افزار لیکاپلیکیشن سویت ایکس استفاده شد. هر یک از الیاف پس از تعیین قطر، تحت آزمون کشش قرار گرفتند. این آزمون توسط دستگاه کشش مدل H10KS (شرکت هانسفیلد) انجام شد. ظرفیت این دستگاه ۱۰kN است. بدین منظور، هر یک از الیاف پس از تعیین سطح مقطع مطابق شکل ۳ روی مقوا چسبانده شدند. دو قسمت بالا و پایین مقوا در داخل گیره دستگاه قرار داده می‌شود. سپس قسمت سمت راست مقوا با قیچی بریده و تست شروع می‌شود. سرعت انجام تست ۱mm/min و طول گیج ۲۵mm است.



شکل ۳) نمونه تست کشش تک رشته کف

تست کشش نمونه‌های کامپوزیتی مطابق استاندارد ASTM 638

نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده خواص مطلوب‌تری نسبت به کارهای پیشین دارند.

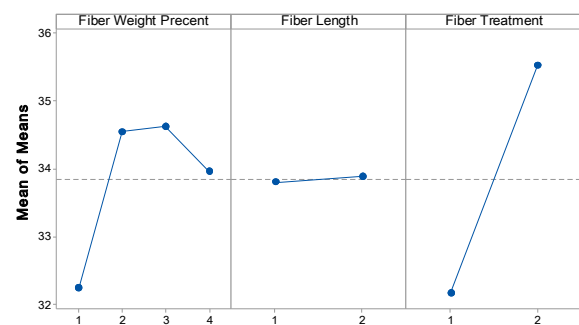
جدول ۲) نتایج تست الیاف

شماره نمونه	قطر الیاف (μm)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
۱	۶۸	۲۶۸	۱۶/۴
۲	۵۸	۲۲۹	۱۵/۳
۳	۷۰	۳۳۲	۲۱/۷
۴	۸۲	۳۲۲	۱۷/۵
۵	۷۳	۱۸۰	۲۳/۲
۶	۶۵	۴۰۳	۱۶/۴
۷	۸۴	۲۴۶	۱۹/۱
۸	۸۸	۳۸۷	۱۷/۹
۹	۸۲	۳۵۵	۱۶/۹
میانگین	۷۴/۴	۳۰۲/۱	۱۸/۲

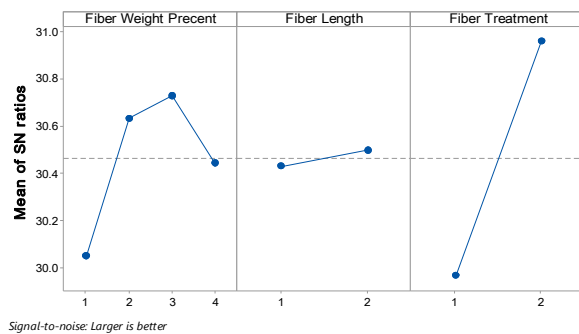
جدول ۳) نتایج تست کشش نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده

شماره نمونه	استحکام (MPa)	مدول (GPa)
۱	۳۱/۳۷	۳/۵۱
۲	۳۳/۱۰	۳/۹۴
۳	۳۱/۹۷	۴/۳۸
۴	۳۷/۱۲	۴/۰۱
۵	۳۴/۱۹	۴/۹۴
۶	۳۵/۰۵	۴/۰۶
۷	۳۷/۶۷	۴/۳۰
۸	۳۰/۲۵	۳/۶۷
نمونه بدون الیاف	۵۹/۳۰	۳/۳۰

به‌منظور بررسی اثر پارامترهای طراحی روی خواص کششی کامپوزیت ساخته‌شده، نتایج حاصل از تست کشش به روش تاگوچی در نرم‌افزار MINITAB تحلیل شد. نمودارهای ۱ و ۲، نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای استحکام کششی نمونه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد. با افزایش درصد الیاف تا ۱۲/۵٪، استحکام کششی کامپوزیت نیز افزایش می‌یابد، ولی بعد از ۱۲/۵٪ استحکام کششی کامپوزیت روند نزولی پیدا می‌کند. بنابراین درصد بهینه جرمی الیاف به‌منظور ماکزیمم‌سازی استحکام کششی کامپوزیت، ۱۲/۵٪ است. همان‌طور که انتظار می‌رود اصلاح الیاف باعث بهبود استحکام کششی کامپوزیت ساخته‌شده می‌شود. مهم‌ترین مساله برای بهبود استحکام کامپوزیت، چسبندگی خوب بین الیاف و زمینه است. هنگامی که الیاف اصلاح می‌شود، درصد لیگنین آن کاهش و چسبندگی الیاف با زمینه بهبود می‌یابد. با توجه به شیب نمودارها مشخص می‌شود که اصلاح الیاف بیشترین تاثیر را در استحکام کششی کامپوزیت دارد. دومین عامل موثر درصد جرمی الیاف بوده و عامل طول الیاف تاثیر ناچیزی در نتایج استحکام کششی الیاف داشته است.



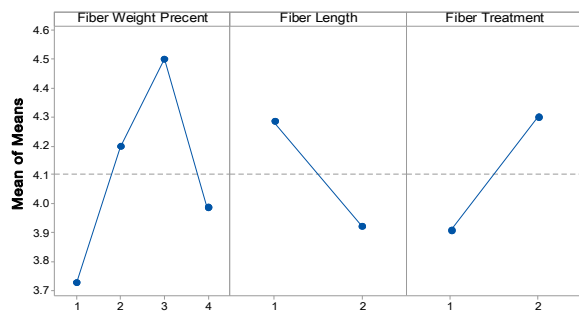
نمودار ۱) نمودار میانگین‌های استحکام کششی کامپوزیت



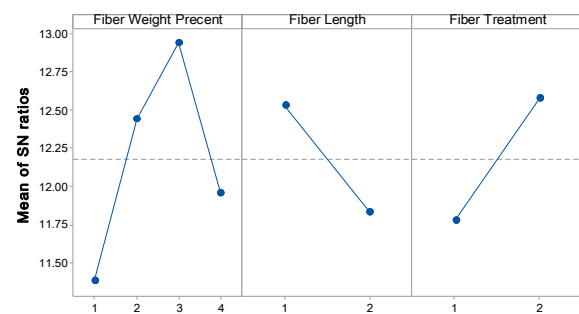
Signal-to-noise: Larger is better

نمودار ۲) نمودار سیگنال به نویز برای استحکام کششی کامپوزیت

نمودارهای ۳ و ۴، نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای مدول کششی نمونه‌های کامپوزیت ساخته‌شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد جرمی الیاف، مدول الاستیسیته بهبود می‌یابد و در ۱۲/۵٪ به حالت ماکزیمم می‌رسد و سپس روند نزولی دارد. اصلاح الیاف نیز مدول کامپوزیت را بهبود بخشیده است. طول الیاف همانند دو عامل دیگر در مقدار مدول الاستیسیته کششی کامپوزیت تاثیرگذار است. کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف به طول ۹mm، مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف به طول ۵mm را دارد.



نمودار ۳) نمودار میانگین‌های مدول الاستیسیته کششی کامپوزیت

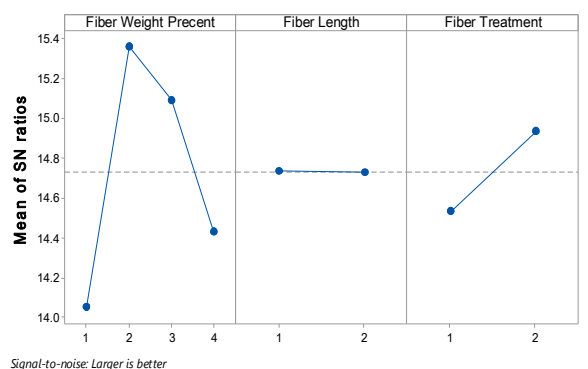
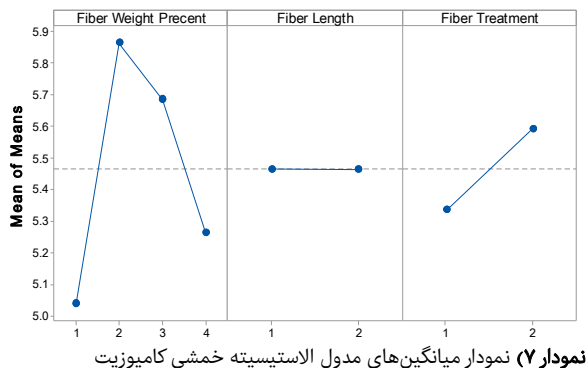


Signal-to-noise: Larger is better

نمودار ۴) نمودار سیگنال به نویز برای مدول الاستیسیته کششی کامپوزیت

نتایج تست خمش نمونه‌های ساخته‌شده در جدول ۴ ارایه شده است. مشاهده می‌شود استحکام خمشی نمونه‌های ساخته‌شده بین ۶۵/۸۲ تا ۷۸/۳۱MPa است. همچنین مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها بین ۴/۱۴ تا ۶/۰۵GPa است. بیشترین استحکام خمشی را نمونه ۵ و بیشترین مدول خمشی را نمونه ۴ دارد. مقایسه نتایج تست خمش نمونه‌های کامپوزیتی با نمونه بدون الیاف نشان می‌دهد که در اثر تقویت کامپوزیت، در تمامی نمونه‌ها به‌جز نمونه ۲ (درصد جرمی الیاف ۵٪) استحکام خمشی افزایش یافته است. در مورد مدول خمشی، تقویت کامپوزیت باعث افزایش

خمشی نمونه‌های ساخته شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود بر خلاف دیگر خواص مکانیکی بررسی شده، بیشترین مقدار مدول الاستیسیته خمشی در درصد جرمی الیاف ۱۰٪ است. اصلاح الیاف، مدول الاستیسیته خمشی را افزایش داده است و طول الیاف تاثیر ناچیزی در مدول الاستیسیته خمشی دارد.



نتایج تست جذب آب نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در جدول ۵ ارایه شده است. مشاهده می‌شود درصد جذب آب نمونه‌های ساخته شده بین ۰/۳ تا ۱/۱٪ است. کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه ۲ است که اختلاف کمی با نمونه بدون الیاف تقویت شده دارد. نمودارهای ۹ و ۱۰، نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای جذب آب نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده نشان می‌دهد. درصد الیاف و اصلاح الیاف تاثیر زیادی روی میزان جذب آب می‌گذارند. هر چه درصد الیاف، کمتر و الیاف اصلاح شده باشند، نمونه کامپوزیتی، آب کمتری جذب می‌کند. در مورد تاثیر طول الیاف نمی‌توان نظری داد.

جدول ۵) نتایج تست جذب آب نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده

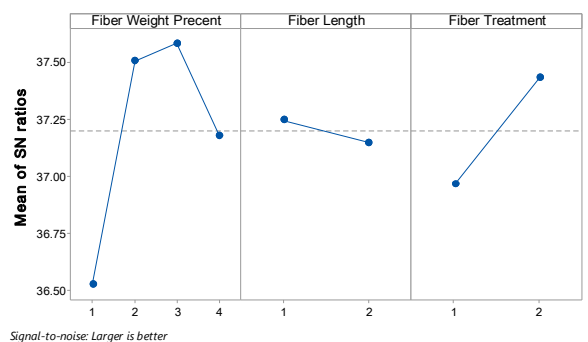
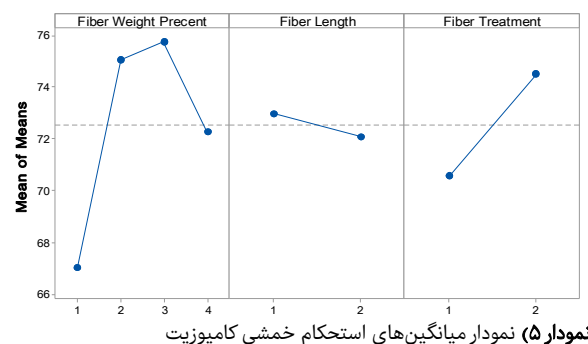
درصد جذب آب	شماره نمونه
۰/۴	۱
۰/۳	۲
۰/۸۶	۳
۰/۳۵	۴
۰/۵۱	۵
۰/۹۴	۶
۰/۵۶	۷
۱/۱	۸
۰/۱۵	بدون الیاف

آن در همه نمونه‌ها شده است. در کارهای پیشین صورت گرفته با زمینه اپوکسی و الیاف طبیعی کوتاه استحکام خمشی کامپوزیت‌ها بین ۱۰ تا ۹۰ MPa و مدول الاستیسیته خمشی بین ۰/۵ تا ۸ GPa گزارش شده است [7-9]. همچنین در پژوهشی که از الیاف کوتاه کف (درصد جرمی الیاف ۱۰٪) و رزین اپوکسی استفاده شده، استحکام خمشی کامپوزیت ساخته شده، ۳۰ MPa گزارش شده که حدود نصف استحکام خمشی به دست آمده در این پژوهش است [20]. از مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش مشخص می‌شود که خواص خمشی نمونه‌های ساخته شده مطلوب است.

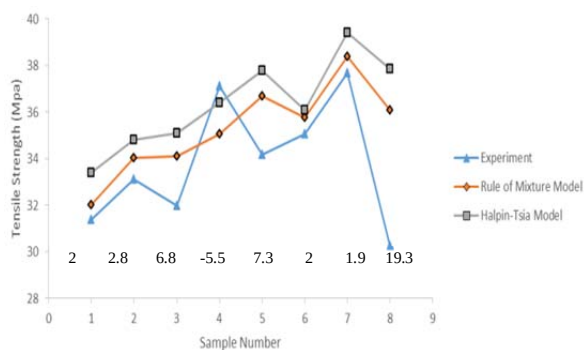
جدول ۴) نتایج تست خمشی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده

شماره نمونه	استحکام (MPa)	مدول (GPa)
۱	۶۵/۸۲	۴/۹۷
۲	۶۸/۲۴	۵/۱۱
۳	۷۳/۲۴	۵/۶۸
۴	۷۶/۸۹	۶/۰۵
۵	۷۸/۳۱	۵/۸۹
۶	۷۳/۲۱	۵/۴۸
۷	۷۴/۵۷	۵/۳۲
۸	۷۰/۰۱	۵/۲۱
بدون الیاف	۶۸/۷۶	۴/۱۴

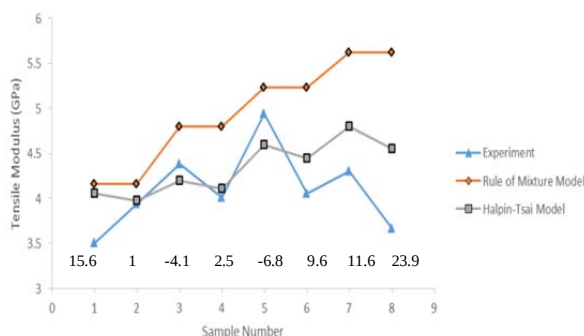
نمودارهای ۵ و ۶، نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده نشان می‌دهد. با افزایش درصد الیاف، استحکام خمشی افزایش می‌یابد و در ۱۲/۵٪ ماکزیمم می‌شود و پس از آن روند نزولی پیدا می‌کند. اصلاح الیاف نیز به دلیل بهبود خواص چسبندگی و سطح الیاف، استحکام خمشی را افزایش می‌دهد. طول الیاف نسبت به دو عامل دیگر تاثیر کمتری در استحکام خمشی دارد.



نمودارهای ۷ و ۸، نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی را برای مدول



نمودار ۱۱) نتایج مدل‌های میکرومکانیک برای استحکام کششی نمونه‌ها و درصد خطای مدل اصلاح‌شده قانون مخلوط نسبت به نتایج تجربی

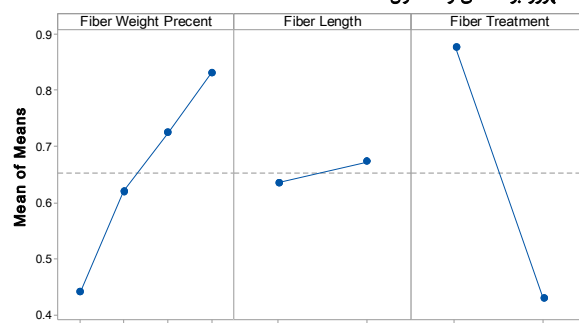


نمودار ۱۲) نتایج مدل‌های میکرومکانیک برای مدول الاستیسیته کششی نمونه‌ها و درصد خطای مدل اصلاح‌شده هالپین-تسای نسبت به نتایج تجربی

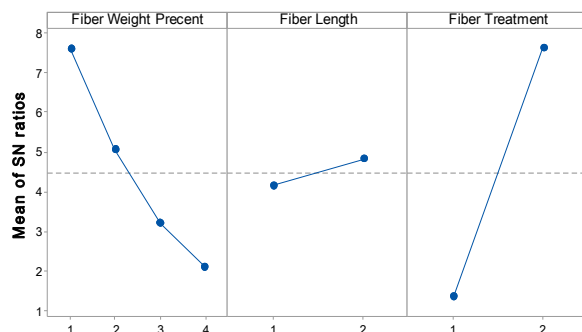
۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کف ساخته شد. ساقه گیاه کف از ایران تهیه و سپس الیاف مورد نظر از آن خارج و آماده‌سازی شد و در اندازه‌های مورد نظر خرد شدند. نتایج تست کشش الیاف نشان داد که الیاف استفاده‌شده، استحکام کششی مطلوبی دارد. تقویت زمینه با استفاده از الیاف خردشده کف موجب بهبود استحکام و مدول الاستیسیته خمشی و بهبود مدول الاستیسیته کششی شد. در این پژوهش استحکام کششی و مدول الاستیسیته کششی بیشتری نسبت به کارهای پیشین در ساخت کامپوزیت‌ها با الیاف طبیعی (حتی الیاف کف) به دست آمد، در حالی که نتایج استحکام خمشی و مدول الاستیسیته خمشی در محدوده کارهای پیشین است. همچنین تاثیر پارامترهای درصد جرمی الیاف، طول الیاف و اصلاح الیاف بر خواص کششی، خمشی و جذب آب کامپوزیت ساخته‌شده بررسی و مشخص شد که استحکام و مدول کششی و استحکام خمشی در ۱۲/۵٪ جرمی الیاف، مدول خمشی در ۱۰٪ جرمی الیاف و مقاومت در برابر جذب آب در ۵٪ جرمی الیاف، حالت بهینه دارد. اصلاح الیاف، خواص خمشی، کششی و مقاومت در برابر جذب آب را بهبود می‌بخشد. طول الیاف فقط روی مدول کششی تاثیرگذار بوده و در حالت ۹mm بهتر است. نشان داده شد که دو مدل میکرومکانیک به کارگرفته‌شده، استحکام کششی بیشتری نسبت به واقعیت پیش‌بینی می‌کنند و پیش‌بینی استحکام کششی با استفاده از مدل اصلاح‌شده قانون مخلوط، سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارد، در حالی که در پیش‌بینی مدول الاستیسیته کششی، مدل اصلاح‌شده هالپین-تسای سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارد.

تشکر و قدردانی: بدینوسیله از حمایت دانشگاه صنعتی شریف در



نمودار ۹) نمودار میانگین‌های درصد جذب آب کامپوزیت



Signal-to-noise: Smaller is better

نمودار ۱۰) نمودار سیگنال به نویز برای درصد جذب آب کامپوزیت

در نهایت در این پژوهش، از مدل اصلاح‌شده قانون مخلوط و مدل اصلاح‌شده هالپین-تسای (روابط ارائه‌شده در بخش ۲) برای پیش‌بینی استحکام کششی و مدول الاستیسیته کامپوزیت ساخته‌شده استفاده و نتایج به‌دست‌آمده از این دو مدل میکرومکانیک با نتایج حاصل از تست کشش مقایسه شد. برای استفاده از مدل‌های میکرومکانیک به درصد حجمی الیاف نیاز است. رابطه ۱۶، درصد جرمی را به درصد حجمی تبدیل می‌کند^[11].

$$V_f = \frac{m_f \rho_m}{\rho_f + m_f(\rho_m - \rho_f)} \quad (16)$$

نمودار ۱۱ استحکام کششی پیش‌بینی‌شده نمونه‌ها و نمودار ۱۲ مدول الاستیسیته کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در خصوص استحکام کششی، به‌جز برای شماره نمونه ۴ (الیاف اصلاح‌شده ۵ میلی‌متری با درصد جرمی ۱۰٪) مدل‌های میکرومکانیک، استحکام کششی بیشتری نسبت به واقعیت پیش‌بینی می‌کنند و مدل اصلاح‌شده قانون مخلوط پیش‌بینی بهتری برای استحکام کامپوزیت دارد و نسبت به مدل هالپین-تسای به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. به‌جز برای نمونه ۸ (الیاف اصلاح‌شده ۵ میلی‌متری با درصد جرمی ۱۵٪) که خطای پیش‌بینی مدل اصلاح‌شده مخلوط برای آن زیاد (۱۹/۳٪) است، برای ۷ نمونه دیگر خطاها قابل قبول هستند (ماکزیمم خطای این مدل ۷/۳۴٪ برای نمونه ۵ و مینیمم خطای آن ۱/۹۳٪ برای نمونه ۷ است). درصد خطای مدل اصلاح‌شده مخلوط نسبت به نتایج تجربی برای هر یک از نمونه‌ها در نمودار ۱۱ ذکر شده است. در مورد مدول الاستیسیته کششی (نمودار ۱۲)، مدل اصلاح‌شده قانون مخلوط مقادیر بالاتری را پیش‌بینی کرده است، در حالی که مدل هالپین-تسای تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد. درصد خطای مدل هالپین-تسای نسبت به نتایج تجربی برای هر یک از نمونه‌ها در نمودار ۱۲ ذکر شده است.

behavior of polypropylene/ijuk fiber composite by using silane treatment. *Procedia Manufacturing*. 2015;2:573-578.

6- Balakrishna A, Nageswara Rao D, Rakesh AS. Characterization and modeling of process parameters on tensile strength of short and randomly oriented Borassus Flabellifer (Asian Palmyra) fiber reinforced composite. *Composites Part B: Engineering*. 2013;55:479-485.

7- Maurya HO, Gupta M, Srivastava R, Singh H. Study on the mechanical properties of epoxy composite using short sisal fibre. *Materials Today Proceedings*. 2015;2(4-5):1347-1355.

8- Gopinath A, Kumar MS, Elayaperumal A. Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices. *Procedia Engineering*. 2014;97:2052-2063.

9- Kumar R, Kumar K, Sahoo P, Bhowmik S. Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite. *Procedia Materials Science*. 2014;6:551-556.

10- Romli FI, Alias AN, Rafie ASM, Abdul Majid DLA. Factorial study on the tensile strength of a coir fiber-reinforced epoxy composite. *AASRI Procedia*. 2012;3:242-247.

11- Beckermann G, Pickering KL. Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: Micro-mechanics and strength prediction modelling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009;40(2):210-217.

12- Vilaseca F, Valadez-Gonzalez A, Herrera-Franco PJ, Pèlach MÀ, López JP, Mutjé P. Biocomposites from abaca strands and polypropylene, Part I: Evaluation tensile properties. *Bioresource Technology*. 2010;101(1):387-395.

13- Facca AG, Kortschot MT, Yan N. Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006;37(10):1660-1671.

14- Facca AG, Kortschot MT, Yan N. Predicting the tensile strength of natural fibre reinforced thermoplastics. *Composites Science and Technology*. 2007;67(11-12):2454-2466.

15- Al-Bahadly EAO. The mechanical properties of natural fiber composites [Dissertation]. Melbourne: Swinburne University of Technology; 2013.

16- Espinach FX, Delgado-Aguilar M, Puig J, Julian F, Boufi S, Mutjé p. Flexural properties of fully biodegradable alpha-grass fibers reinforced starch-based thermoplastics. *Composites Part B: Engineering*. 2015;81:98-106.

17- Xu X. Cellulose fiber reinforced nylon 6 or nylon 66 composites [Dissertation]. Georgia: Georgia Institute of Technology; 2008.

18- Lu Y. Mechanical properties of random discontinuous fiber composites manufactured from wetlay process [Dissertation]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University; 2002.

19- Das G, Biswas S. Effect of fiber parameters on physical, mechanical and water absorption behaviour of coir fiber-epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016;35(8):644-653.

20- Vijayakumar S, Nilavarasan T, Usharani R, Karunamoorthy L. mechanical and microstructure characterization of Coconut spathe fibers and Kenaf bast fibers reinforced epoxy polymer matrix composites. *Procedia Materials Science*. 2014;5:2330-2337.

استفاده از آزمایشگاه‌ها و کارگاه‌ها و همچنین از حمایت مالی شرکت نفت خزر تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل و یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: بدینوسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل از یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

سهم نویسندگان: شهروز ابوالحسنی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۵٪)، فمیدا فلاح (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۳۵٪)، جواد اکبری (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

منابع مالی: بدینوسیله از حمایت مالی شرکت نفت خزر در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- پی‌نوشت

علام	
علام اختصاری	
d	قطر الیاف (mm)
E	مدول الاستیسیته کششی (GPa)
l	طول الیاف (mm)
M	درصد جرمی
P	درصد جذب آب
s	نسبت طول به قطر الیاف
V	درصد حجمی
w	وزن (g)
علام یونانی	
ρ	چگالی (g/cm^3)
σ	استحکام کششی (MPa)
τ	تنش برشی بین الیاف و زمینه (MPa)
ν	ضریب پواسون
زیرنویس‌ها	
0	اولیه
1	ثانویه
c	کامپوزیت
f	الیاف
m	زمینه

منابع

- 1- Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2014;299(1):9-26.
- 2- Omrani E, Menezes PL, Rohatgi PK. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016;19(2):717-736.
- 3- Thakur VK, Thakur MK. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*. 2014;109:102-117.
- 4- Ku H, Wang H, Pattarachaiyakop N, Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(4):856-873.
- 5- Zahari WZW, Badri RNRL, Ardyananta H, Kurniawan D, Nor FM. Mechanical properties and water absorption