www.nm.iau-shahrood.ac.ir
نانومواد: ۱۱:۳۹ (۱۳۹۸) ۱۶۰-۱۵۳

مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی لایه‌ای کربن-آلومینیوم تحت بار خمشی با تقلید زیستی از ساختار الیاف بامبو

علی علیزاده[۱]، کاوه کلاه‌گر آذری*[۲]، جواد فهیم[۳] و افشین زهدی[٤]

۱- پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
۲- پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
۳- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۴- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش جوشکاری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵

چکیده

در این پژوهش با تکیه بر تقلید زیستی از ساختار کامپوزیت طبیعی بامبو، ارتقاء خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی لایه‌ای کربن-آلومینیوم، بررسی شده است. بدین منظور پس از بررسی ریز ساختار بامبو، به کمک روش نمونه سازی سریع، قطعاتی بامبو گونه با ابعاد مشابه ساخته شده و تحت آزمون خمش چهار نقطه‌ای قرارگرفته‌اند. مشاهده شده که تنها با تغییر چیدمان الیاف بر اساس تقلید زیستی از بامبو، مدول خمشی تا بیش از ۵۰ درصد دچار افزایش شده، فلذا امکان بهبود خواص با تقلید زیستی فراهم است و می‌توان صرفا با تغییر نحوه چینش الیاف، ضمن مصرف میزان الیاف کمتر به خواص مکانیکی بهتری دست یافت. ضمن آنکه با بهبود خواص کامپوزیت‌های حاوی الیاف ارزان قیمت شیشه به روش تقلید زیستی از کامپوزیت طبیعی بامبو، دستیابی به خواص سازه‌های گران‌تری نظیر آلیاژهای فلزی و کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن امکان‌پذیر خواهد بود. شایان ذکر است استفاده از تقلید زیستی می‌تواند هزینه‌ها را به طور چشمگیری کاهش دهد. همچنین، علاوه بر سبک‌سازی قطعات با طراحی بر اساس ساختار بامبو، به واسطه کاهش نیاز به مصرف الیاف، استفاده از نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای به جای آلیاژهای فولادی، با حجم مشابه، نیز موجب کاهش وزن سازه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: **نانوکامپوزیت، لایه‌ای، آلومینیوم، تقلید زیستی، بامبو، خمش ٤ نقطه‌ای، نمونه‌سازی.**

۱- مقدمه

انتخاب مواد و همچنین انتخاب روش‌ها و تکنیک‌های موجود برای ساخت، عامل اصلی و تعیین کننده هزینه تولید، زمان مصرفی و تاثیرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید است. به طوری‌که در دو دهه گرایش به طراحی نوآورانه مواد و روش‌های جدید برای توسعه مواد گسترش یافته است. یکی از مهمترین انواع موادی که در سال‌های اخیر بیشترین سهم

* **عهده‌دار مکاتبات:** کاوه کلاه‌گر آذری
نشانی: تهران، پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، کدپستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
تلفن و دورنگار: ۲۲۹۴۵۱۴۱-۰۲۱، **دورنگار:** ۲۲۹۳۵۳۴۱-۰۲۱، **پست الکترونیکی:** k.azari.kaveh@gmail.com

تحقیقات با محوریت طراحی و توسعه را به خود اختصاص داده‌اند، مواد نانوکامپوزیتی هستند [۱]. روند رو به رشد استفاده از مواد مرکب یا کامپوزیتی در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، خودروسازی، کشتی‌سازی، ساختمانی و ... حاکی از اهمیت این دسته از مواد و جایگاه ویژه آن‌ها در صنعت امروز دارد. در بسیاری از صنایع به خصوص صنایع حمل‌ونقل، صنایع هوایی و کاربردهای نظامی شاهد آن هستیم که سازه‌های فلزی با اهداف مختلفی از قبیل کاهش وزن، کاهش قیمت تولید، رفع مشکل خوردگی و برخی بهبودهای دیگر در کارایی و خواص، جای خود را به کامپوزیت‌ها داده‌اند [۲،۳].

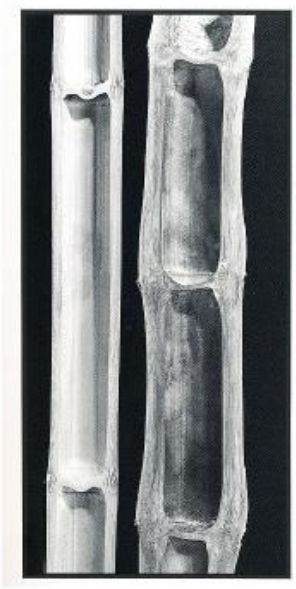
سازه‌های نانوکامپوزیتی لایه‌ای به دلیل خواص منحصربفردی که دارند ازجمله استحکام و مدول ویژه بالا، فرآیندپذیری خوب و پایداری شیمیایی در شرایط اتمسفری خوب و روش تولید ساده کاربردهای گوناگونی را در زمینه‌های مختلف دارند [۴،۵]. دسته‌ای از نانوکامپوزیت‌ها که مصرف آن‌ها طی سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته، نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای کربنی است. در این نانوکامپوزیت‌ها جزء تقویت‌کننده الیاف کربن و ورق آلومینیوم است در زمینه نانوذارت اپوکسی که منجر به خواص مکانیکی فوق‌العاده می‌شود. میزان تقاضای جهانی برای این الیاف در سال ۲۰۱۵ بالغ بر ۱۵/۷۵ میلیارد دلار تخمین زده شده است [۶]. نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) به علت نسبت بالای استحکام به وزن، نسبت بالای مدول کششی به وزن و استحکام بالای خستگی امروزه مورد توجه بسیاری قرارگرفته است [۷]. گرچه مدول الاستیک کامپوزیت‌های کربنی (با درصد الیاف برابر) می‌تواند تا بیش از ۴ برابر و استحکام آن‌ها تا بیش از دو برابر کامپوزیت‌های حاوی الیاف شیشه باشد [۸،۹]، اما اختلاف قیمت این دو ماده (یعنی نانوکامپوزیت و کامپوزیت)، که گاهی تا ۴۰ برابر، هزینه‌ها را دچار تغییر می‌کند، می‌تواند تصمیم‌گیری در انتخاب مواد اولیه را شدیدا تحت تاثیر قرار دهد.

با این اوصاف، اگر کامپوزیتی با کمک الیاف کربن و ورق فلزی ساخته شود که خواص آن تا حد مناسبی به نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات اپوکسی نزدیک باشد، ضمن حفظ مزیت سبک‌سازی قطعات و سازه‌ها در مقایسه با مشابه فلزی آن‌ها، صرفه اقتصادی بسیار قابل‌توجهی را به ارمغان خواهد آورد. بدین منظور روش تقلید زیستی مورد توجه قرارگرفته است.

تقلید زیستی، حوزه پژوهشی نسبتا جدیدی در علم مواد است، که طبیعت را به فناوری پیوند می‌دهد. به طور خلاصه می‌توان تقلید زیستی را طراحی مواد بر اساس ساختارهای زیستی تعریف کرد. هرگونه الهام گرفتن از طبیعت را می‌توان در حوزه تقلید زیستی گنجاند و هر ابزار، فرآیند یا سامانه‌ای را که توسط بشر بدین روش ساخته و پرداخته شود، می‌توان یک "زیست- تقلید" نامید [۱۰،۱۱].

ساختارهای زیستی عمدتا وابسته به محیط و شرایط بارگذاری دارای ویژگی‌های مطلوبی هستند [۱۱]. لذا تقلید از آن‌ها، پتانسیل زیادی برای طراحی سازه‌های سبک و با کارایی بالا دارد.

با توجه به خواص مکانیکی فوق‌العاده و جذابیت خاصی که در ریزساختار بامبو وجود دارد، در این پژوهش تمرکز بر تقلید زیستی بر اساس این گیاه صورت گرفته است. جهت رسیدن به این هدف با تقلید زیستی از بامبو و اخذ ویژگی‌های ریزساختاری آن، که مهمترین آن‌ها نحوه چینش الیاف است، به روش نمونه‌سازی سریع قطعاتی ساخته شده و میزان بهینه‌سازی خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. در صورتی‌که بتوان به طراحی تقلید زیستی با خواصی بهبود یافته رسید، امکان پیاده‌سازی آن در ابعاد وسیع‌تر نیز وجود خواهد داشت. ساختار آناتومی ساقه بامبو، خواص آن را تعیین می‌کند. در شکل ۱ برش ساقه بامبو، ساختار رایج گرهی بامبو و حفره‌ها را نشان می‌دهد [۱۲]. لازم بذکر است که تمرکز ما در طراحی تقلید زیستی بر ریزساختار بخش میان گرهی ساقه بامبو است.



شکل ۱: برش بامبو با نمایش اجزاء درون گرهی دیواره ساقه گیاه [۱۲].

بامبو در واقع یک ماده هدفمند (یا ماده‌ای با ساختار طبقه‌بندی شده) طبیعی است. این مواد با تغییر تدریجی ترکیب و ساختار در گستره حجم شان شناخته می شوند و بدین ترتیب خواص کلی آن‌ها دستخوش تغییر می‌شود. مواد هدفمند به طور گسترده در سامانه های ترمومکانیکی، به‌منظور کاهش تنش‌های ترمومکانیکی، دیده می‌شوند. البته این ساختارها می‌تواند به کاهش تمرکز تنش در شرایط بارگذاری های مکانیکی خاص نیز کمک نمایند [۱۳،۱۴].

کسر حجمی الیاف در حاشیه درونی‌ترین قسمت ساقه حدود ۲۰٪ و در بیرونی‌ترین قسمت آن حدود ۶۰٪ است. درصد حجمی سرتاسری الیاف نیز حدودا ۴۰٪ است. البته شکل و سطح مقطع الیاف هم در ضخامت دیواره ساقه دچار تغییر می‌شوند [۱۲،۱۵]. ازآنجاکه حجم و شکل الیاف در جهت عرضی مقطع ساقه بامبو، روندی گرادیانی دارد و سلول‌های ساقه بامبو شدیدا در جهت محوری آرایش یافته‌اند، خواص مکانیکی بسیار ناهمسانگرد است. برای مثال، سفتی در جهت محوری بسیار بیشتر از جهت شعاعی است [۱۲،۱۵،۱۶].

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه، خواص کششی و آزمون کشش

دو ماده کاملا پخت شونده، تحت عنوان VeroWhite و TangoPlus از کمپانی Stratasys تامین شد و مورد استفاده قرار گرفت. از این دو ماده، موادی دوجزئی را می‌توان ایجاد نمود. خواص نانومواد پلیمری که از آن‌ها استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمون‌های کشش مطابق استاندارد ASTM D638-08 انجام و برای هر ماده دو نمونه تهیه شد. آزمون‌های کشش با دستگاه Instron با یک load-cell که نیروی 10 کیلو نیوتنی اعمال نموده، انجام شد. از یک اکستنسومتر برای اندازه‌گیری کرنش نمونه ضمن آزمون کشش بهره گرفته شد که طول gauge آن mm ۱۰ است.

از گستره کلیه مخلوط‌های ممکنه، یک ماده باید به عنوان جزء لیفی و یکی دیگر به عنوان الیاف انتخاب گردید. برای ماده نماینده الیاف، DM8410 انتخاب شد چرا که در قیاس با سایر مواد موجود (در کنار VeroWhite) بالاترین سفتی را دارد. به علاوه، نتایج آزمون کشش آن انحراف معیار کمتری از VeroWhite دارد و قابل اعتمادتر از آن است. همچنین چون در بامبو، جزء ماتریس بسیار چقرمه‌تر از الیاف است، DM8430 را به عنوان ماتریس انتخاب شد.

۲-۲- نمونه‌سازی سریع

نمونه‌های آزمون کشش پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار solidworks، توسط روش نمونه‌سازی سریع ساخته شده‌اند. دستگاه نمونه سازی سریع مورد استفاده نیز Connex350^{TM} بوده است.

اصول کاری یک فرآیند نمونه‌سازی سریع را می‌توان همچون یک چاپگر سه‌بعدی دانست. جهت کسب اطلاعات بیشتر در مورد این روش می‌توانید به سایت‌ها و نشریات مربوطه رجوع نمایید [۱۷].

جدول ۱: خواص مواد بدست‌آمده از آزمون‌های کشش.

ویژگی	VeroWhite (full cure830)	DM 8410	DM 8420	DM 8430	DM 9795
مدول یانگ E (MPa)	1281.18	1501.59	119.09	832.61	407.17
انحراف معیار E	96.78	128.09	10.08	47.25	19.96
خطای نسبی E	0.076	0.085	0.008	0.057	0.049
تنش تسلیم، σ_y (MPa)	25.73	26.96	24.67	18.21	14.01
انحراف معیار σ_y	1.882	0.017	0.384	0.308	0.035
خطای نسبی σ_y	0.073	0.001	0.016	0.017	0.003

۲-۳- آزمون خمش

برای اجرای آزمون‌های خمش، از روش خمش ۴ نقطه‌ای (مطابق با استاندارد D79010) استفاده شده است.

طول نمونه‌های لوله‌ای ۲۰۰ mm بوده است. همچنین عرض دهانه بین غلطک‌های انتهایی، در این آزمون‌ها برابر با ۱۵۰ mm است. عرض دهانه بین غلطک های بالایی نیز ۵۰ mm بوده است. این آزمون‌ها با دستگاه Instron و با ۱۰ کیلو نیوتن load-cell انجام شده است. استاندارد آزمون برای خمش ۴ نقطه‌ای D79010 هست. آزمون‌های خمش با کنترل جابجایی و با یک سرعت ثابت غلطک برابر با ۱ mm/min انجام شده است. بیشینه جابجایی قابل اعمال، ۵۰ mm است.

۲-٤- ارائه مدل تقلید زیستی

ابتدا شرایط مرزی بیان می‌شود:

۱- کسر حجمی کلی ماده مشابه الیاف (DM8410) برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

۲- شعاع داخلی مدل برابر ۱۰ mm و شعاع بیرونی ۱۰ mm در نظر گرفته شده است.

حال به بررسی ویژگی‌های مختلفی می‌پردازیم که می‌تواند بر رفتار سازه‌های بامبوگونه اثر بگذارد. این ویژگی‌ها در قالب مدل‌هایی در عبارات زیر بیان شده است:

الف. اثر تغییر کسر حجمی الیاف در ضخامت ساقه

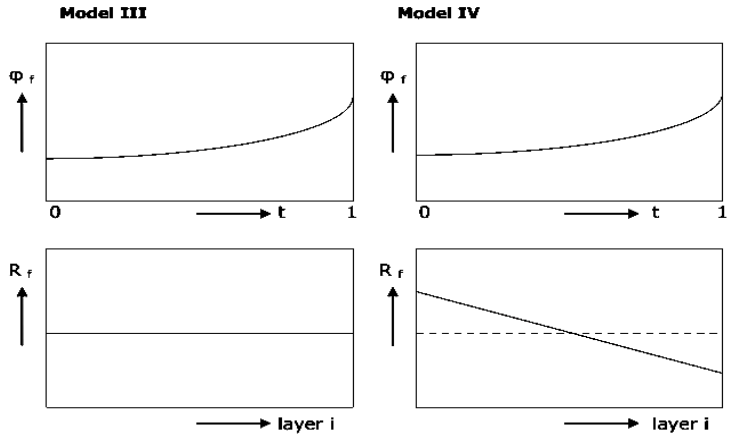
۱- مدل ماده یا مخلوط همگن که در آن گرادیان کسر حجمی الیاف را نمی‌بینیم.

۲- مدل لایه‌های گسسته با گرادیان کسر حجمی الیاف بدین معنا که ساختار طبقه‌بندی شده را در این مدل می‌بینیم.

ب. اثر الیاف

۳- مدلی با الیاف دارای شعاع برابر که توزیعی مطابق مدل ۲ در ضخامت ساقه دارند.

ج. اثر قطر الیاف



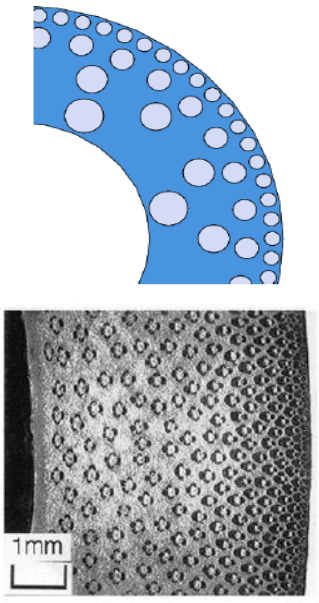
شکل ۲: توزیع کسر حجمی (φ_f) به‌صورت تابعی از ضخامت بی‌بعد (t) و نمایش شعاع لیف (R_f) به صورت تابعی از شماره لایه برای مدل‌های ۳ و ٤.

۴- مدلی با الیاف غیر هم‌اندازه که توزیعی گرادیانی مطابق مدل ۲ دارند. توزیع سایز الیاف نیز تابعی خطی از شماره لایه است به‌طوری‌که مشابه آنچه در بامبو هست، کوچک‌ترین لیف‌ها در بیرونی‌ترین لایه و بزرگ‌ترین آن‌ها در داخلی‌ترین لایه قرار دارند.

در مدل های نوع الف در واقع لیفی وجود ندارد. در مدل ۱ تنها یک ماده استفاده می شود و تغییر کسر حجمی الیاف هم به‌تبع آن دیده نمی‌شود. در مدل ۲ تغییرات کسر حجمی الیاف را در نظر می‌گیریم که مطابق توزیع آن‌ها در گیاه بامبو است و با استفاده از لایه های بیشتر می‌توان ساختار طبقه‌بندی‌شده را بهتر تخمین زد. این مدل به یک ماده با ساختار طبقه‌بندی‌شده نزدیک‌تر است. به هر نحو، با روش ساخت نمونه‌سازی سریع امکان تهیه نمونه‌ای پیوسته به‌طوری‌که توزیع الیاف تابع ضخامت باشد وجود ندارد و تنها می‌توان آن را در لایه‌های گسسته چاپ نمود. در طراحی ب، الیاف شعاع برابر دارند و در لایه‌هایی هم‌مرکز (با ضخامت یکسان) قرارگرفته‌اند. مدل ج برای درک امکان استفاده از الیاف با قطر نابرابر ارائه شده است. در این مدل به‌جز تغییر سایز یا قطر لیف، تغییرات دیگر را در نظر نمی‌گیریم و مقطع الیاف را استوانه‌ای در نظر می‌گیریم.

برای مدل ۳ شعاع همه الیاف برابر است اما برای مدل ۴ توزیعی از سایز الیاف را داریم. در این توزیع رابطه‌ای خطی بین شعاع الیاف و شماره‌ی لایه وجود دارد.

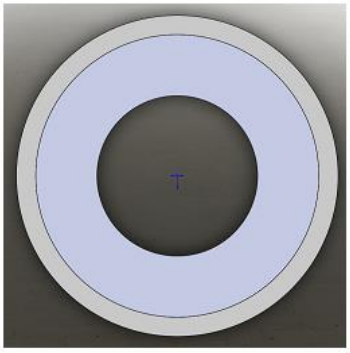
طراحی انجام‌شده در نرم‌افزار solidworks در شکل ۳ (تصویر پایین) نشان داده شده است. برای مقایسه، یک مقطع از ساقه بامبو نیز در این شکل (تصویر بالا) نمایش داده شده است.



شکل ۳: مقطع عرضی مدل ٤ در solid works (چپ) و نمای مقطع واقعی بامبو (راست).

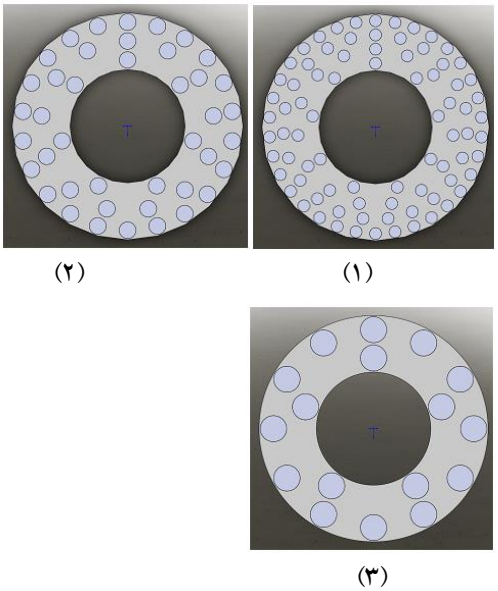
مدل‌هایی که با نمونه‌سازی سریع ساخته شده‌اند به عبارت زیر هستند:

- مدل ۲: دولایه هم‌مرکز با ماده الیاف در حلقه خارجی و ماده ماتریس در حلقه داخلی است (شکل ۴).



شکل ٤: سطح مقطع مدل ۲ در نرم‌افزار solidworks.

- مدل ۳: الیاف هم شعاع در ضخامت دیواره با گرادیان کسر حجمی مشابه بامبو (شکل ۵).

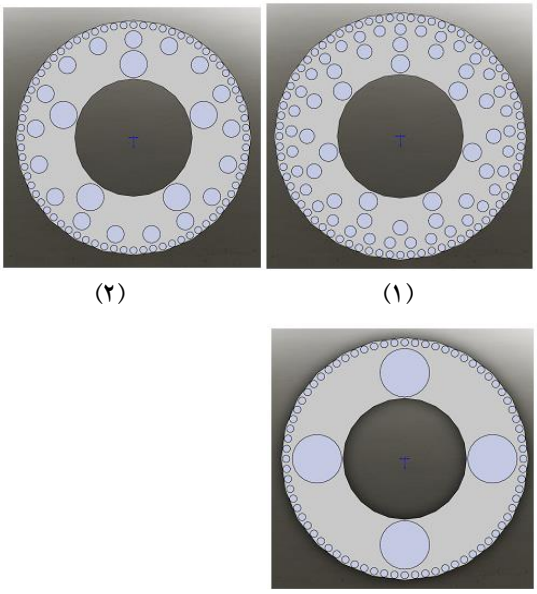


(۲) (۱)

(۳)

شکل ۵: سطح مقطع مدل ۳ در solidworks (به ترتیب از ۱، ۲ و ۳) با ۲، ۳ و ٤ لایه الیاف.

- مدل 4: شامل الیاف غیر هم سایز در ضخامت دیواره و گرادیان کسر حجمی مشابه بامبو (شکل ۶).



(۲) (۱)

(۳)

شکل ٦: سطح مقطع مدل ٤ در نرم‌افزار solidworks (به ترتیب از ۱، ۲ و ۳) با ۲، ۳ و ٤ لایه الیاف.

۳- نتایج و بحث

گرچه تفاوت خواص مواد الیاف و زمینه به بزرگی آنچه در بامبو داریم نیست، اما امکان ایجاد ساختاری ناهمسانگرد مانند بامبو وجود دارد. درواقع سفتی مدل تقلید زیستی در سطح مقطع دچار تغییر می‌شود اما نسبت ناهمسانگردی در مقایسه با بامبو کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که نسبت سفتی الیاف به ماتریس در مدل فعلی ۱/۸ است در حالی‌که این نسبت برای بامبو، حدودا ۲۳ است. با مقایسه نتایج آزمون‌های خمش مدل ۳ و ۴، اثر سایز الیاف را می‌توان دید. حال به بررسی نتایج بد ست آمده برای طراحی‌های تقلید زیستی می‌پردازیم تا دریابیم که میزان بهبود خواص چقدر بوده و آیا ارزش آن را دارد که یک چنین طراحی را مجددا با رزین اپوکسی و الیاف شیشه تکرار کنیم یا خیر. بدین منظور گام به گام طبق مراحل زیر پیش می‌رویم:

الف- مشخصه‌ای که متناسب با سفتی است، عبارت است از: شیب منحنی رسم شده بر اساس داده‌های خروجی آزمون خمش برحسب N/mm. این مشخصه را برای نمونه‌های

خودمان (در جدول ۲) و نمونه‌ای فرضی که کاملا از ماده لیفی (یعنی DM8410) ساخته شده باشد باهم مقایسه می‌کنیم. از بین داده‌های ذکر شده در جدول ۲ تنها داده‌های مربوط به مدل ۴ (با ۳ و ۴ لایه الیاف) را برای مقایسه انتخاب می‌کنیم. چرا که انحراف داده‌های این دو به نسبت بقیه کمتر است و اعتماد به تکرارپذیری نتایج آن نیز بیشتر از نتایج سایر مدل‌هاست.

جدول ۲: سفتی و بیشینه نیرو برای هر مدل، بدست آمده از آزمون‌های خمش ٤ نقطه‌ای.

ویژگی	مدل ۲	مدل ۳ (۳ لایه الیاف)	مدل ۳ (۳ لایه الیاف)	مدل ۳ (۳ لایه الیاف)	مدل ٤ (٤ لایه الیاف)
سفتی (N/mm)	62.38 ±12.70	49.04 ±2.71	51.87 ±4.37	53.19 ±1.97	57.01 ±0.91
بیشینه نیرو (N)	358.88 ±6.64	344.52 ±6.47	333.16 ±9.77	373.43 ±10.69	367.49 ±13.44

قابل ذکر است که مدل ۲ گرچه نتایج خوبی را نشان داده اما عملا کارآمد نیست چراکه لایه خارجی در آن به‌طور کامل از جنس الیاف در نظر گرفته شده و نیز طبیعی است که تحت اعمال بار خمشی به دلیل استحکام بالای لایه‌ی بیرونی چنین رفتاری را نشان دهد.

سفتی VeroWhite در مراجع و توسط تولیدکنندگان، بر اساس استاندارد ASTM به شماره D-790-04، برابر با ۲۱۳۷ MPa گزارش شده است [۱۸]. طبق این استاندارد ابعاد نمونه (برحسب میلی‌متر) عبارت است از: 3.2*12.7*125 به طوری‌که نسبت عرض دهانه به عمق آن برابر با ۱۶ است. همچنین طبق فرمول ذکرشده در استاندارد مذکور داریم:

$$E_B = L^3m/4bd^3 \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، E مدول الاستیک خمشی بر حسب MPa است. L طول عرض دهانه‌ی گیره‌های ساپورت برحسب mm است. m شیب بخش ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی برحسب N/mm است. b و d نیز عرض و عمق نمونه برحسب mm می‌باشند. از طرفی همان‌طور که گفته شد نسبت L/d برابر با ۱۶ است.

ب- ازآنجاکه طبق استاندارد، نمونه تحت آزمون قرارگرفته، یک جسم توپر با سطح مقطع مستطیلی است که نسبت طول به عرض آن ۱ به ۴ است ولی آزمون‌های انجام شده توسط ما با نمونه‌های استوانه‌ای توخالی (بامبو-گونه) انجام شده، لذا ما یک مقطع مستطیلی معادل با آن را در نظر می‌گیریم:

$$4x^2L = \pi (R_o^2 - R_i^2) L \qquad (۲)$$

$R_o = 10$ mm
$R_i = 5$ mm

با توجه به روابط بالا و بر اساس استاندارد ذکر شده، مقدار عمق (d) حدودا برابر با ۶/۶۷۵ mm و عرض حدودا برابر با ۳۰/۷۰۰ mm بدست می‌آید.

پ- پارامتری که ما مورد مقایسه قرار داده‌ایم m است (رجوع شود به معادله (1)). لذا اگر L/d را برابر با ۱۶ در نظر بگیریم و مدول خمشی را نیز با توجه به آنکه یک تابع موادی است برابر ۲۱۳۷ بگیریم، مقدار m برای VeroWhite برابر با ۶۴/۰۷ بدست می‌آید (m = ۶۴/۰۷).

برای کم کردن میزان خطا و مقایسه‌ای منطبق با واقعیت، مطابق جدول ۱ نسبت مدول الاستیک را برای جزء لیفی (DM8410) به VeroWhite برابر با $\frac{1501.59}{1281.18}$ و نسبت مدول الاستیک را برای جزء ماتریس (DM8430) به VeroWhite برابر با $\frac{832.61}{1281.18}$ در نظر می‌گیریم.

بدین ترتیب m برای جزء ماتریس، به‌تنهایی، برابر است با:

$$\frac{832.61}{1281.18} \times 64.067 = 41.64$$

و m برای جزء لیفی، به تنهایی، برابر است با:

$$\frac{1501.59}{1281.18} \times 64.067 = 75.09$$

ت- حال به محاسبه میزان بهبود خواص برای داده‌های مربوط

به مدل ۴ (با ۳ و ۴ لایه الیاف) بر اساس پارامتر سفتی m می‌پردازیم.

لازم به ذکر است که درصد الیاف در همه نمونه‌ها برابر ۰/۳ بوده است. از طرفی برای محاسبه درصد الیاف در مدل ۴ با ۳ لایه الیاف طبق قاعده مخلوط‌ها داریم:

$$\frac{53.19-41.64}{75.09-41.64}=34.54$$

به عبارت دیگر گرچه ۳۰ درصد ساختار، عملکرد مکانیکی همچون سازه‌ای با ۳۴/۵۴٪ لیف هست. در نتیجه میزان بهبود خواص طبق رابطه مقابل حدودا برابر است با ۱۵/۱۳٪.

$$\frac{34.54-30}{30}=15.13$$

همچنین برای مدل ۴ با ۴ لایه الیاف داریم:

$$\frac{57.01-41.64}{75.09-41.64}=45.96$$

درنتیجه میزان بهبود خواص طبق رابطه‌ی زیر حدودا برابر است با ۵۳/۲۰٪.

$$\frac{45.64-30}{30}=53.20$$

٤- نتیجه‌گیری

تقلید زیستی از ساختار بامبو با تمرکز بر نحوه آرایش و چینش الیاف صورت گرفت و نمونه‌هایی به کمک روش نمونه سازی سریع تهیه شد تا ضمن آزمون خمش ۴ نقطه‌ای میزان بهبود خواص مکانیکی بررسی شود. مزایای این پژوهش را می‌توان در قالب موارد زیر بیان نمود:

- سبک‌سازی و کاهش وزن قطعه‌ی طراحی‌شده نسبت به آلیاژهای آلومینیومی. به طوری‌که با مقایسه حدودی چگالی آلیاژ و نانو کامپوزیت، می‌توان کاهش وزن بین ۲۰ تا ۴۰ درصدی را برای قطعات با حجم مشابه متصور بود.
- بهبود خواص مکانیکی، تحت بار خمشی
- امکان بهبود خواص مکانیکی، تحت بار خمشی چنانچه مشاهده شد تا بیش از ۵۰ درصد قابل حصول است.
- امکان تهیه یک قطعه یا سازه کامپوزیتی با استفاده از مواد رایجی نظیر رزین اپوکسی و الیاف پیش آغشته (طبق رویه‌ای مشابه آنچه در مقاله ذکر شد) با هدف دستیابی به خواص منحصربفرد مواد ویژه و گران‌تر نظیر آلیاژهای آلومینیوم.
- کاهش هزینه بسیار (در بعضی موارد تا ۴۰ برابر) در صورت جایگزینی سازه‌های فلزی و نانو کامپوزیت‌های کربنی با کامپوزیت‌های تهیه‌شده بر اساس روش تقلید زیستی.

مراجع

[1] E. Kazemi, M.H. Siadati, R. Eslami-Farsani, *Journal of Science and Technology of Composites*, **5**, 2018, 109.
[2] A.P. Mouritz, "*Introduction to Aerospace Materials*", Elsevier, 2012.
[3] W.G. Roeseler, B. Sarh, M.U. Kismarton, J. Quinlivan, J. Sutter, D. Roberts, "Composite Structures: The First 100 Years" Proceeding, 2007, 41.
[4] M.A. Mohammadi M.R. Babolhavaeji, R. Eslami-Farsani, M.R. Zamani, *Journal of Science and Technology of Composites*, 15, 2018, 125.
[5] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, *Journal of Science and Technology of Composites*, **3**, 2016, 11.
[6] D.A.S. Sujit, Global carbon fiber composites supply chain competitiveness analysis. Oak Ridge National Laboratory; The University of Tennessee, Knoxville, 2016.
[7] E. Hakimi, S. Amini, *Journal of Science and Technology of Composites*, **2**, 2016, 51.
[8] R.F. Gibson, "*Principles of Composite Material Mechanics*", *Second Edition*, Taylor & Francis, 2007.
[9] M. Zmindak, M. Dudinsky, "Computational modelling of composite materials reinforced by glass fibers", *Procedia Eng.*, **48**, 2012, 701.
[10] J.F.Vincent, O.A. Bogatyreva, N.R. Bogatyrev, A. Bowyer, A.K. Pahl, *J. R. Soc. Interface*, **3**, 2006, 471.
[11] Y. Bar-Cohen, "*Biomimetics: Nature-Based Innovation*", CRC Press, 2016.
[12] W. Liese, "*The Anatomy of Bamboo Culms*", International Network for Bamboo and Rattan, 1998.
[13] E.C.N. Silva, M.C. Walters, G.H. Paulino, *J. Mater. Sci.*, **41**, 2006, 6991.
[14] A.K. Ray, S. Mondal, S.K. Das, P. Ramachandrarao, *J. Mater. Sci.*, **40**, 2005, 5249.
[15] S. Amada, S. Untao, *Compos. Part B Engineering*, **32**, 2001, 451.
[16] T. Tan, T. Xia, H.O. Folan, J. Dao, Z. Basch, K. Johanson, M. Ozeki, M. Smith, "Sustainability in Beauty: A Review and Extension of Bamboo Inspired Materials, **1**, 2014, 1.
[17] C. Chee-Kai, K. Fai-Leong, 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping Fourth Edition. World Scientific Publishing Company, 2014.
[18] K. Rashid, Abu; R. Rowshan, *Advanced Materials Technologies*, **2**, 2017, 160023545.