

مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های 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^۴

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 نانو کامپوزیت‌های هیبریدی لایه‌ای کربن-آلومینیوم، بررسی شده است. بدین منظور پس از بررسی ریز ساختار بامبو، به کمک روش نمونه‌سازی سریع، قطعاتی بامبو گونه با ابعاد مشابه ساخته شده و تحت آزمون خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. 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 صرفاً 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 نانو کامپوزیت‌های لایه‌ای به جای آلیاژهای فولادی، با حجم مشابه، نیز موجب کاهش وزن سازه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت، لایه‌ای، آلومینیوم، تقلید زیستی، بامبو، خمش ۴ نقطه‌ای، نمونه‌سازی.

۱- مقدمه

مصرفی و تاثیرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید است. به طوری که 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

انتخاب مواد و همچنین انتخاب روش‌ها و تکنیک‌های موجود برای ساخت، عامل اصلی و تعیین کننده هزینه تولید، زمان

* **مهدده‌دار مکاتبات:** کاوه کلاه‌گر آذری

نشانی: تهران، پژوهشکده مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، کدپستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

تلفن و دورنگار: ۰۲۱-۲۲۹۴۵۱۴۱، دورنگار: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۳۴۱، پست الکترونیکی: k.azari.kaveh@gmail.com

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

تقلید زیستی، حوزه پژوهشی نسبتاً 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 گنجانده 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 عمدتاً 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 صورتی که 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 میان‌گره‌ی ساقه بامبو است.

تحقیقات با محوریت طراحی و توسعه را به خود اختصاص داده‌اند، مواد نانو کامپوزیتی 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 نانو کامپوزیتی لایه‌ای به دلیل خواص منحصر بفردی که دارند از جمله 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 نانو کامپوزیت‌ها که مصرف آن‌ها طی سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته، نانو کامپوزیت‌های لایه‌ای کربنی است. در این نانو کامپوزیت‌ها جزء تقویت‌کننده الیاف کربن و ورق آلومینیوم است در زمینه نانوذرات 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]. نانو کامپوزیت‌های 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 قرار گرفته 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 نانو کامپوزیت و کامپوزیت)، که گاهی تا ۴۰ برابر، هزینه‌ها را دچار تغییر می‌کند، می‌تواند تصمیم‌گیری در انتخاب مواد اولیه را شدیداً تحت تاثیر قرار دهد.

۲- فعالیت‌های تجربی

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

دو ماده کاملاً 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.

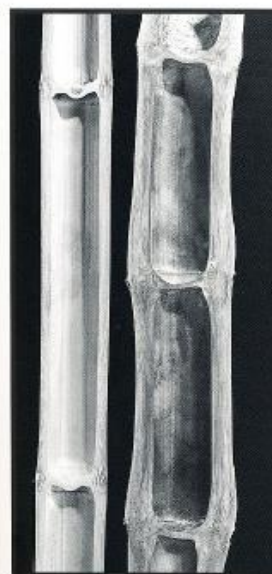
آزمون‌های کشش مطابق استاندارد ASTM D638-08 انجام و برای هر ماده دو نمونه تهیه شد. آزمون‌های کشش با دستگاه Instron با یک load-cell که نیروی 10 کیلو نیوتنی اعمال نموده، انجام شد. از یک اکستنسومتر برای اندازه‌گیری کرنش نمونه ضمن آزمون کشش بهره گرفته شد که طول gauge آن 10 mm است.

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 solidw، توسط روش نمونه‌سازی سریع ساخته شده‌اند. دستگاه نمونه‌سازی سریع مورد استفاده نیز Connex350TM 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].



شکل ۱: برش بامبو با نمایش اجزاء درون گوهی 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 می‌شوند و بدین ترتیب خواص کلی آنها دستخوش تغییر می‌شود. مواد هدفمند به طور گسترده در سامانه‌های ترمومکانیکی، به منظور کاهش تنش‌های ترمومکانیکی، دیده می‌شوند. البته این ساختارها می‌تواند به کاهش تمرکز تنش در شرایط بارگذاری‌های 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 سرتا سری الیاف نیز حدوداً ۴۰٪ است. البته شکل و سطح مقطع الیاف هم در ضخامت دیواره ساقه دچار تغییر می‌شوند [۱۲، ۱۵]. از آنجا که حجم و شکل الیاف در جهت عرضی مقطع ساقه بامبو، روندی گرادیانی دارد و سلول‌های ساقه بامبو شدیداً 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].

جدول ۱: خواص مواد بدست آمده 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 غلطک‌های 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.

۲-۴- 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 بامبو گونه اثر بگذارد. این ویژگی‌ها در قالب مدل‌هایی در عبارات زیر بیان شده است:

الف. اثر تغییر کسر حجمی الیاف در ضخامت ساقه

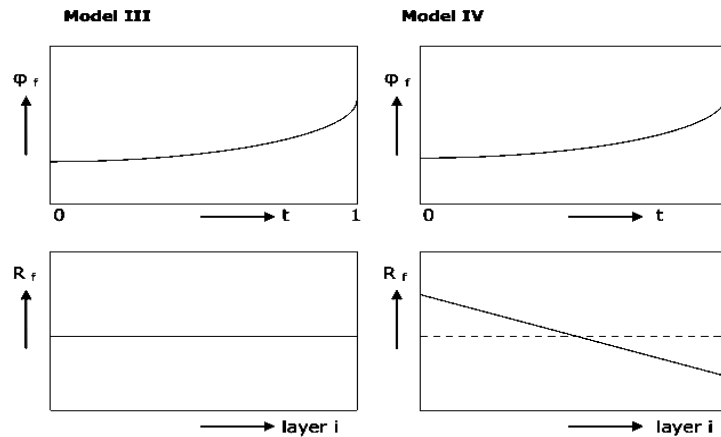
۱- مدل ماده یا مخلوط همگن که در آن گرادیان کسر حجمی الیاف را نمی‌بینیم.

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

ب. اثر الیاف

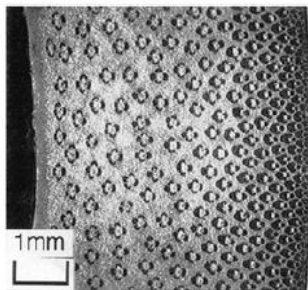
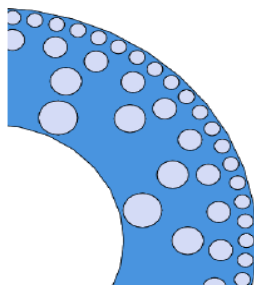
۳- مدلی با الیاف دارای شعاع برابر که توزیعی مطابق مدل ۲ در ضخامت ساقه دارند.

ج. اثر قطر الیاف



شکل ۲: توزیع کسر حجمی (ϕ_r) به صورت تابعی از ضخامت بی بعد (t) و نمایش شعاع لیف (R_f) به صورت تابعی از شماره لایه برای مدل های ۳ و ۴.

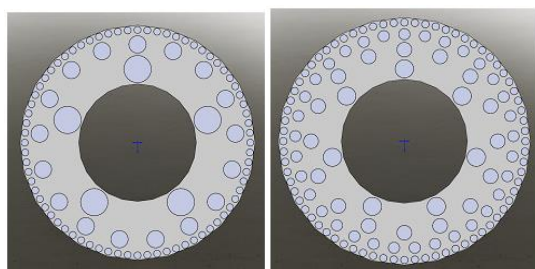
برای مدل ۳ شعاع همه الیاف برابر است اما برای مدل ۴ توزیعی از سایز الیاف را داریم. در این توزیع رابطه‌ای خطی بین شعاع الیاف و شماره‌ی لایه وجود دارد. طراحی انجام شده در نرم افزار solidworks در شکل ۳ (تصویر پایین) نشان داده شده است. برای مقایسه، یک مقطع از ساقه بامبو نیز در این شکل (تصویر بالا) نمایش داده شده است.



شکل ۳: مقطع عرضی مدل ۴ در solid works (چپ) و نمای مقطع واقعی بامبو (راست).

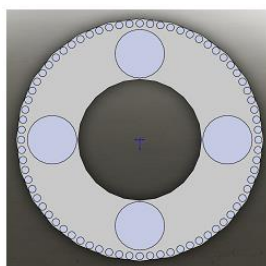
۴- مدلی با الیاف غیر هم اندازه که توزیعی گراد یانی مطابق مدل ۲ دارند. توزیع سایز الیاف نیز تابعی خطی از شماره لایه است به طوری که مشابه آنچه در بامبو هست، کوچک ترین لیف ها در بیرونی ترین لایه و بزرگ ترین آن ها در داخلی ترین لایه قرار دارند.

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 به تبع آن دیده نمی شود. در مدل ۲ تغییرات کسر حجمی الیاف را در نظر می گیریم که مطابق توزیع آن ها در گیاه بامبو است و با استفاده از لایه های بیشتر می توان ساختار طبقه بندی شده را بهتر تخمین زد. این مدل به یک ماده با ساختار طبقه بندی شده نزدیک تر است. به هر نحو، با روش ساخت نمونه سازی سریع امکان تهیه نمونه ای پیوسته به طوری که توزیع الیاف تابع ضخامت باشد وجود ندارد و تنها می توان آن را در لایه های گسسته چاپ نمود. در طراحی ب، الیاف شعاع برابر دارند و در لایه هایی هم مرکز (با ضخامت یکسان) قرار گرفته اند. مدل ج برای درک امکان استفاده از الیاف با قطر نابرابر ارائه شده است. در این مدل به جز تغییر سایز یا قطر لیف، تغییرات دیگر را در نظر نمی گیریم و مقطع الیاف را استوانه ای در نظر می گیریم.



(۲)

(۱)

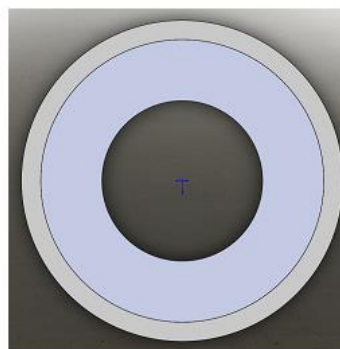


(۳)

شکل ۶: سطح مقطع مدل ۴ در نرم افزار solidworks (به ترتیب از ۱، ۲ و ۳ با ۲، ۳ و ۴ لایه الیاف).

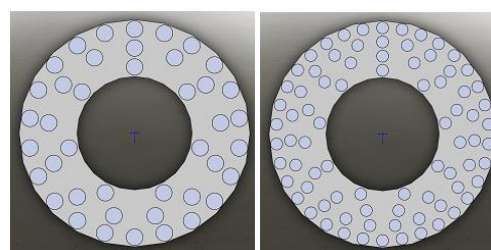
مدل هایی که با نمونه سازی سریع ساخته شده اند به عبارت زیر هستند:

- مدل ۲: دولا یه هم مرکز با ماده الیاف در حلقه خارجی و ماده ماتریس در حلقه داخلی است (شکل ۴).



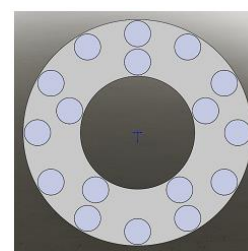
شکل ۴: سطح مقطع مدل ۲ در نرم افزار solidworks.

- 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 ۴ لایه الیاف).

- مدل ۴: شامل الیاف غیر هم سایز در ضخامت دیواره و گرادیان کسر حجمی مشابه بامبو (شکل ۶).

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. در واقع سفتی مدل تقلید زیستی در سطح مقطع دچار تغییر می شود اما نسبت ناهمسانگردی در مقایسه با بامبو کاهش می یابد. لازم به ذکر است که نسبت سفتی الیاف به ماتریس در مدل فعلی ۱/۸ است در حالی که این نسبت برای بامبو، حدوداً ۲۳ است. با مقایسه نتایج آزمون های خمش مدل ۳ و ۴، اثر سایز الیاف را می توان دید. حال به بررسی نتایج بدست آمده برای طراحی های تقلید زیستی می پردازیم تا دریابیم که میزان بهبود خواص چقدر بوده و آیا ارزش آن را دارد که یک چنین طراحی را مجدداً با رزین اپوکسی و الیاف شیشه تکرار کنیم یا خیر. بدین منظور گام به گام طبق مراحل زیر پیش می رویم:

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

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- از آنجاکه طبق استاندارد، نمونه تحت آزمون قرار گرفته، 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:

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

$$R_o = 10 \text{ mm}$$

$$R_i = 5 \text{ mm}$$

با توجه به روابط بالا و بر اساس استاندارد ذکر شده، مقدار عمق (d) حدوداً برابر با ۶/۶۷۵ mm و عرض حدوداً 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 مقایسه‌های 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، به‌تنهایی، برابر است با:

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

ت- حال به محاسبه میزان بهبود خواص برای داده‌های مربوط

خودمان (در جدول ۲) و نمونه‌ای فرضی که کاملاً 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 لیاف) را برای مقایسه انتخاب می‌کنیم. چرا که انحراف داده‌های این دو به نسبت بقیه کمتر است و اعتماد به تکرار پذیری نتایج آن نیز بیشتر از نتایج سایر مدل‌هاست.

جدول ۲: سفتی و بیشینه نیرو برای هر مدل، بدست

آمده از آزمون‌های خمشی ۴ نقطه‌ای.

ویژگی	مدل ۲	مدل ۳ (۳ لایه)	مدل ۳ (۳ لایه)	مدل ۳ (۳ لایه)	مدل ۴ (۴ لایه)
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 عملاً کارآمد نیست چراکه لایه خارجی در آن به‌طور کامل از جنس لیاف در نظر گرفته شده و نیز طبیعی است که تحت اعمال بار خمشی به دلیل استحکام بالای لایه 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: ۱۲.۷*۳.۲*۱۲.۵ به طوری که نسبت عرض دهانه به عمق آن برابر با ۱۶ است. همچنین طبق فرمول ذکر شده در استاندارد مذکور داریم:

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (1)$$

در رابطه بالا، E مدول الاستیک خمشی برحسب MPa است. L طول عرض دهانه‌ی گیره‌های ساپورت برحسب mm است. m شیب بخش ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی برحسب N/mm

- 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 گران تر نظیر آلیاژهای آلومینیوم.
- کاهش هزینه بسیار (در بعضی موارد تا ۴۰ برابر) در صورت جایگزینی سازه‌های فلزی و نانو کامپوزیت های کربنی با کامپوزیت های تهیه شده 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.

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:

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

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

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

۴- نتیجه گیری

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 طراحی شده نسبت به آلیاژهای آلومینیومی. به طوری که با مقایسه حدودی چگالی آلیاژ و نانو کامپوزیت، می‌توان کاهش وزن بین ۲۰ تا ۴۰ درصدی را برای قطعات با حجم مشابه متصور بود.