

طراحی و توسعه فناوری ساخت ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای یک رصدخانه فضایی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

سجاد سمیع پور^۱، علیرضا طلوعی^۲، ولادیمیر باتراکوف^۳

۱- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. s_samipour@sbu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده تولید سازه‌های هوافضایی، دانشگاه ملی تحقیقاتی فنی کازان، روسیه

چکیده

هدف از مقاله حاضر طراحی و توسعه فناوری ساخت ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای یک رصدخانه فضایی با استفاده از روش بافت دورانی الیاف کربن است. به این منظور یک الگوریتم برای به دست آوردن زاویه تقویت کننده و نوع الیاف و چسب، یک الگوریتم برای به دست آوردن پارامترهای تکنولوژی دستگاه بافت دورانی و یک الگوریتم برای تصحیح زاویه تقویت و سرعت محوری قالب درون دستگاه پیشنهاد شده است. با استفاده از این الگوریتم‌ها یک سازه نمونه طراحی و ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. مطالعات نرم افزاری و تجربی به منظور صحت‌سنجی الگوریتم‌ها انجام شده است. نتایج مطالعات تجربی و محاسباتی تطابق خوبی با الزامات سازه‌ی ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای یک رصدخانه فضایی نشان دادند و الگوریتم‌های پیشنهادی برای طراحی چنین سازه‌های مناسب تشخیص داده شده است.

واژه‌های کلیدی: طراحی اجسام پرنده، رصدخانه فضایی، سازه‌های کامپوزیتی، الیاف کربن، بافت دورانی الیاف

Design and development of technology for the construction of converging mirror retaining columns of a space observatory

Sadjad Samipour¹, Alireza Toloei², Vladimir Batrakov³

1- Assistant Professor, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, s_samipour@sbu.ac.ir

2- Associate Professor, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Kazan national technical research university, Kazan, Russian Federation.

Abstract

Ensuring the high level of operational characteristics of aerospace structures is one of the most important problems of modern production. This is especially true in the space industry, as spacecraft are complex and expensive equipment that must be used for a long time. At present, satellites have a fifteen-year life cycle, the production of their components requires a great deal of effort in the choice of materials and manufacturing technology. The solution to this problem is not possible without the use of the latest composite materials and advanced technologies. In the present paper, the fiber rotational texture technology is proposed for the production of aerospace composite structures with high strength and temperature stability. An algorithm for obtaining the reinforcement angle and the type of fibers and adhesives, an algorithm for obtaining the technology parameters of the rotating tissue machine and an algorithm for correcting the reinforcement angle and the axial speed of the mold within the machine are proposed. A sample structure has been constructed and tested. Software and experimental studies have been performed to validate the algorithms.

Keywords: aircraft design, space observatory, composite structures, carbon fibers, radial braiding

۱۹۹

سال ۱۳- شماره ۱

پهلو و تابستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



۱. مقدمه

اطمینان از بالا بودن سطح ویژگی های عملیاتی سازه های هوافضایی از مهمترین مشکلات تولید مدرن است [۱]. این امر به ویژه در مورد صنعت فضایی صادق است، زیرا فضاپیماها تجهیزات پیچیده و گران قیمت هستند که باید برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گیرند [۲]. در حال حاضر، ماهواره ها دارای یک چرخه فعالیت پانزده ساله هستند، که تولید اجزای آن ها مستلزم تلاش زیاد به منظور انتخاب مواد و فناوری ساخت است [۳]. راه حل این مسئله بدون استفاده از به روزترین مواد کامپوزیتی و فن آوری های پیشرفته میسر نیست. در مقاله حاضر تکنولوژی بافت دورانی الیاف (شکل ۱) برای تولید سازه های کامپوزیتی هوافضایی با مقاومت و پایداری دمایی بالا پیشنهاد شده است. سازه های ساخته شده از مواد کامپوزیت تولید شده به روش بافت دورانی با موفقیت در صنایع هوافضا، دریایی، خودرو و انرژی استفاده می شوند [۴]. از مزایای روش بافت دورانی می توان به سطح بالای اتوماسیون، یکپارچگی سازه های تولید شده، انعطاف پذیری در طراحی و همچنین هزینه کم تولید اشاره کرد [۵]. مزایای دیگر بافت دورانی امکان ایجاد پیش سازه های تقویت شده دو و سه محوری، امکان دستیابی به دقت بالا در زاویه تقویت و تکرارپذیری است [۶]. این ویژگی امکان تولید طیف گسترده ای از سازه های کامپوزیتی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد نظر را می دهد [۷]. با توجه به تنوع کاربردها و ویژگی های جدید، روش بافت دورانی در تولید سازه های هوافضایی چشم انداز بسیار خوبی دارد. پتانسیل عالی فن آوری مدرن، طیف گسترده الیاف تقویت کننده و چسب اجازه

می دهد تا طرح های فضاپیمایی با راندمان وزنی و ثبات ابعادی در طیف وسیعی از دما ایجاد شود. [۸]

۲. مروری بر تاریخچه

پژوهش های مفصلی در مورد سازه های ساخته شده از الیاف بافته شده به عمل آمده است. مطالعات نظری و تجربی شبیه سازی کامپوزیت های بافته شده در آثار بسیاری از نویسندگان از جمله لوموف [۹] انجام شده است. خصوصیات مکانیکی کامپوزیت های بافته شده به هندسه بافت الیاف بستگی زیادی دارد. انحنای الیاف بر مقاومت محوری، مقاومت در برابر ضربه و پایداری ابعادی سازه های بافته شده کامپوزیت تأثیر می گذارد [۱۰]. رابطه معنی داری بین هندسه الیاف، سختی، مقاومت و جذب انرژی در اثر ضربه وجود دارد که مدل سازی میکرومکانیکی را برای توصیف روند شکست ضروری می کند [۱۱]. در اولین مدل سازی رسمی سازه های بافته شده، پیرس [۱۲] یک مدل ساده ارائه داد که در آن رشته ها دارای مقطع دایره ای هستند. لازم به ذکر است که رشته عبارت است از مجموع تعداد مشخصی از الیاف. توصیف هندسی، که برای سازه های بافته شده مناسب تر است، توسط کری و همکاران [۱۳] تهیه شده است. لی و همکاران [۱۴] یک مدل هندسی از معماری الیاف را در کامپوزیت های پیشرفته ارائه داد و رفتارهای فشرده سازی، کشش و خمش را با یکدیگر مقایسه کرد. گیدئون و همکاران [۱۵] رفتار فشرده سازی محوری استوانه های کامپوزیتی بافته شده سه بعدی را با زوایای مختلف تقویت آزمایش کرد. تیان و همکاران [۱۶] از نظر تئوری مکانیسم خرابی کامپوزیت های سه بعدی بافته

۲۰۰

سال ۱۳ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۳

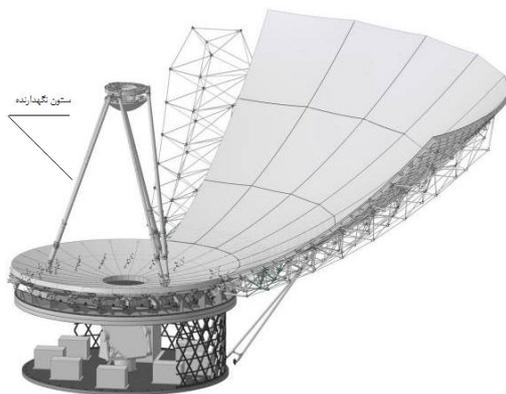
نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



۳. محاسبه‌ی پارامترهای ساخت

مسئله مورد بررسی در این مقاله عبارت است از طراحی و محاسبه پارامترهای ساخت ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای رصدخانه فضایی میلی‌متر (Millimtron) است (شکل ۲). ستون‌های نگهدارنده باید به طور همزمان مجموعه‌ای از الزامات دوام، سختی و پایداری حرارتی را برآورده سازند. برآوردن همزمان این سه شرط در یک ساختار واحد، چالش‌های خاصی را ایجاد می‌کند. راه حل این مسئله در تعیین دقیق زاویه تقویت و الگوی قرار دادن الیف نهفته است.



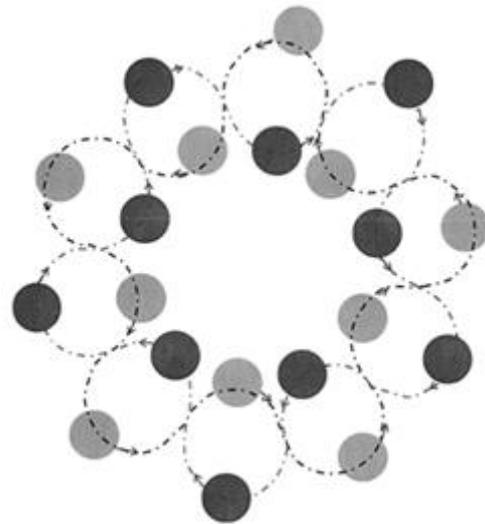
شکل ۲. عناصر ساختاری اصلی سیستم رصدخانه [۱۱] Millimtron فضایی میلی‌متر

هدف از پژوهش حاضر توسعه فن‌آوری تولید پیش‌سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هوافضایی با استفاده از روش بافت دورانی و چسب‌کاری انتقالی RTM است. به الیف بافته شده حول قالب پیش از فرایند چسب‌کاری، پیش‌سازه گفته می‌شود. مرحله اول، توسعه یک الگوریتم برای انتخاب الیف تقویت‌کننده، رزین و الگوی تقویت برای ساخت یک سازه استوانه‌ای با پارامترهای سختی مشخص است. مرحله دوم شامل توسعه یک الگوریتم برای تعیین پارامترهای تکنولوژیکی

شده تحت فشار کششی دو محوره و بار فشرده‌سازی را مطالعه کرد. وانگ و همکاران [۱۷] تأثیر دما و زاویه تقویت را بر خرابی فشاری طولی نشان داد. فانگ و همکاران [۱۸] برای مطالعه رفتار خرابی تدریجی کامپوزیت‌های سه بعدی بافته شده از یک روش اتصال چند مقیاسی استفاده کرد. چن و همکاران [۱۹] خواص الاستیک موثر کامپوزیت‌های بافته شده سه بعدی را با استفاده از روش المان محدود چند فازی محاسبه کرد.



الف



ب

شکل ۱. الف) دستگاه بافت دورانی؛ ب) مکانیسم حرکت قرقره‌ها در دستگاه بافت دورانی

۲۰۱

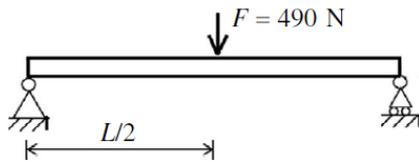
سال ۱۳ - شماره ۱

پیاو و تابستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا





شکل ۴. چیدمان تست

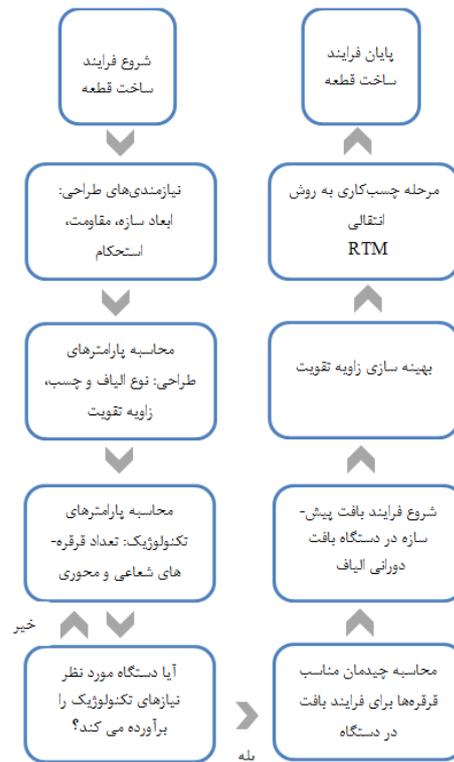
تغییر مکان مرکز استوانه تحت کنش نیروها با فرمول تعیین می‌شود، که براساس آن نابرابری باید ارضا شود.

$$\delta_{max} = \frac{F_y l^3}{48EI} \quad (1)$$

$$E \geq \frac{Pl^3}{48\delta_{max}I}$$

با توجه به فرمول (۱)، مدول الاستیک سازه استوانه‌ای در امتداد محور آن باید حداقل ۲۱۰ گیگا پاسکال باشد. محاسبات به منظور یافتن الیاف مناسب برای تولید سازه استوانه‌ای بافته شده با استفاده از اطلاعات مربوط به خواص بهترین الیاف موجود در بازار که توسط شرکت-های شناخته شده Toray (ژاپن) و Toho Tenax (آلمان) تولید می‌شوند، انجام شده است. همان طور که از نتایج [۲۰] مشخص است، مدول الاستیک به نسبت حجمی الیاف، زاویه قرارگیری الیاف نسبت به هم و همچنین به خواص الیاف و رزین بستگی دارد یعنی $E = f(\alpha, v_f)$. لازم به ذکر است که نسبت حجمی الیاف در مواد کامپوزیت نسبت حجم الیاف به حجم کل سازه است. تابع $E = f(\alpha, v_f) = 210 \text{ GPa}$ برای فیبر M46J و رزین RTM-6 رسم شده است. شکل ۵ مناطق بالا و پایین منحنی را نشان می‌دهد. مطابق با محدودیت‌های فنی، زاویه تقویت باید بیشتر از ۱۵ درجه و نسبت حجمی الیاف باید کم‌تر از ۶۰٪ باشد. از این نمودار نتیجه می‌شود که مقادیر زاویه تقویت ماده کامپوزیتی

حرکات قطعات عملیاتی دستگاه بافت دورانی است. مرحله سوم توسعه یک مدل ریاضی برای سازه‌های استوانه‌ای بافته شده برای تصحیح زاویه تقویت کننده است. در شکل ۳ الگوریتم فرایند طراحی و ساخت ستون نگهدارنده آینه همگرایی رصدخانه فضایی آورده شده است.

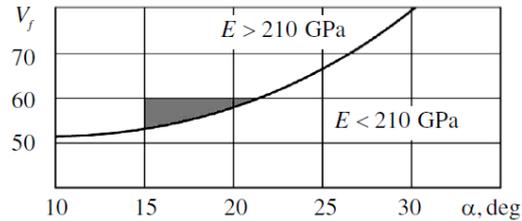


شکل ۳. الگوریتم فرایند طراحی و ساخت

در مرحله اول، الگوریتمی برای انتخاب الیاف و رزین تقویت کننده و همچنین الگوی تقویت برای ساخت یک استوانه با پارامترهای سختی مشخص توسعه داده شده است. با توجه به الزامات طراحی برای یک استوانه با طول ۱.۸۲۶ متر، قطر داخلی ۰.۰۳۸ متر و قطر خارجی ۰.۰۴۵ متر، با توجه به الزامات سازه مورد نظر جابجایی مرکز استوانه تحت بارگذاری نشان داده شده در شکل ۴ نباید از ۰.۰۰۶ متر تجاوز کند.



سه محوری با مدول الاستیک بالاتر از ۲۱۰ گیگا پاسکال در نواحی سایه‌دار قرار دارد.



شکل ۵. نمودار گرافیکی مدول الاستیک بر حسب زاویه تقویت و نسبت حجمی الیاف

در مرحله دوم، یک الگوریتم برای تعیین پارامترهایی مانند عرض رشته، که تعیین کننده تعداد الیاف در هر رشته است، تعداد رشته‌های شعاعی و محوری، تعداد لایه‌ها و تعداد قرقره‌های نصب شده درون دستگاه برای بافت پیش‌سازه استوانه‌ای توسعه داده شده است. لازم به ذکر است که رشته عبارت است از مجموع تعداد مشخصی از الیاف. در ابتدا، مدل ریاضی برای بافت پیش‌سازه استوانه‌ای توسعه داده شده است. اگر L و r به ترتیب طول و شعاع سازه استوانه‌ای، زاویه تقویت کننده و b عرض رشته باشد، آنگاه مسیر الیاف روی سطح قالب را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\left(\frac{t}{r \cdot \cot(\alpha)}\right), \\ y &= r \cdot \sin\left(\frac{t}{r \cdot \cot(\alpha)}\right) \\ z &= t \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن t مختصات جاری است. با استفاده از معادله (۲) می‌توان طول رشته L_f مورد نیاز برای پوشش سطح قالب و ضریب پوشش k را پیدا کرد. ضریب پوشش سطح اشغال شده توسط الیاف به سطح کل سازه استوانه‌ای شکل است.

$$\begin{aligned} L_f &= \int_0^L \sqrt{\frac{dx^2}{dt} + \frac{dy^2}{dt} + \frac{dz^2}{dt}} dt \\ &= \frac{L}{\cos \alpha} \\ k &= \frac{L}{2\pi r L} \frac{nb}{\cos \alpha} = \frac{nb}{2\pi r \cos \alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن n تعداد رشته‌های شعاعی در یک جهت است. اگر فرض شود که شکل رشته‌های شعاعی به موج سینوسی نزدیک‌تر است، خط محوری آن‌ها را می‌توان با معادلات زیر توصیف کرد (باید توجه داشت که رشته‌های محوری، تقریباً دارای شکل مستقیم هستند و از انحنای آن‌ها صرف نظر می‌شود):

$$\begin{aligned} Y_{Biaxial} &= \frac{A}{4} \sin\left(\frac{\pi}{B} x\right), Y_{Triaxial} \\ &= \frac{A}{3} \sin\left(\frac{\pi}{B} x\right) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن A ضخامت یک لایه و B فاصله بین مراکز رشته‌ها است. از آنجایی که ما یک سلول واحد را در نظر می‌گیریم، اگر فرض شود که سلول واحد فقط از رشته الیاف و رزین تشکیل شده‌است، (ینی ناخالصی و هوا درون سلول واحد وجود ندارد) و کل رشته فقط از الیاف تشکیل شده باشد، آنگاه نسبت حجمی الیاف برابر است با نسبت حجم رشته در سلول واحد به حجم کل سلول واحد. با استفاده از معادله (۵)، بدست آوردن یک عبارت برای تعیین حجم الیاف بافت دو محوری و سه محوری امکان پذیر است:

$$\begin{aligned} v_{fBiaxial} &= \frac{4b_1}{\pi b_f} \xi \left(\frac{\pi}{b_f} \left| \frac{1}{\beta} \right| \right) \sqrt{a_1^2 + \gamma^2} \\ v_{fTriaxial} &= \frac{8a_1 b_1}{\pi b_f} \xi \left(\frac{\pi}{b_f} \left| \frac{1}{\beta} \right| \right) \sqrt{(2a_1)^2 + \gamma^2} \\ &+ \frac{4a_2 b_2}{\pi b_{axial}} \end{aligned} \quad (5)$$



که در آن $\beta = 1 + \left(\frac{b_f}{\pi a_1 \cos \alpha}\right)^2$ ، $y = \frac{b_f}{\pi \cos \alpha}$ و ξ انتگرال بیضوی نوع دوم است. b_f ، b_{axial} فواصل بین مراکز رشته‌های شعاعی و محوری؛ a_1 ، b_1 به ترتیب شعاع‌های کوچک و بزرگ رشته‌های شعاعی؛ a_2 ، b_2 به ترتیب شعاع‌های کوچک و بزرگ رشته‌های محوری هستند.

بر اساس معیارهای ترکیبی از ویژگی‌هایی که سختی و دوام مطلوب را فراهم می‌کنند، پارامترهای زیر انتخاب شدند: فیبر M46J، رزین RTM - 6، حجم الیاف ۵۵٪، زاویه تقویت ۱۵ درجه و بافت سه محوری به عنوان الگوی تقویت. شعاع پیش‌سازه ۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۳.۵ میلی‌متر است. در جدول ۱ پارامترهای لازم برای بافت پیش‌سازه آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای لازم برای بافت پیش‌سازه

نوع الیاف	M46J	روش بافت	تعداد لایه‌ها
چگالی، گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱.۸۴	قطر بیرونی، میلی‌متر	۴۵
زاویه تقویت	۱۵	قطر داخلی، میلی‌متر	۳۸
نسبت حجمی الیاف	۵۵	تعداد دوران دستگاه در دقیقه	۸۰

به منظور تعیین پهنای رشته یا به عبارت دیگر تعداد الیاف در یک رشته، یک رشته با تعداد مشخص الیاف برای مثال M46J-12K انتخاب می‌شود. سطح مقطع رشته به صورت $S = \frac{l_f}{\rho_f}$ محاسبه می‌شود، که در آن l_f چگالی خطی و ρ_f چگالی الیاف است. سطح مقطع رشته برابر با $S = \frac{8}{\pi} a_1 b_1$ است. سطح مقطع رشته ثابت است، یعنی $a_1 = f(b_1)$ اگر فرض شود که ضریب پوشش ۱ است، آنگاه برای بافت دو محوری $b_f = 2b_1$ و برای بافت سه

محوری $b_f = 2b_1$ و $b_f = 2(a_1 + b_2)$ بنابراین رابطه $V_f = f(b_1)$ برقرار است. بنابراین عرض رشته را می‌توان تعیین کرد. تعداد رشته‌های محوری به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$n_{axial} = \frac{\pi r}{a_1 + b_2} \quad (۶)$$

تعداد لایه‌ها نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

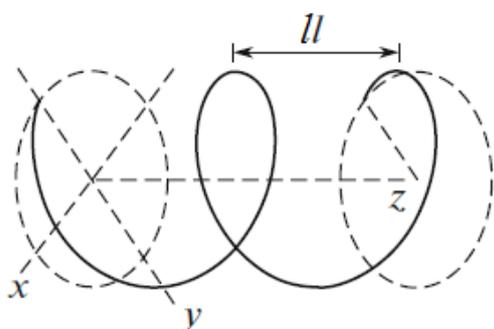
$$n_{axial} = \frac{\pi r}{a_1 + b_2} \quad (۷)$$

که در آن D_{out} قطر بیرونی و D_{in} قطر داخلی است. بعد از اینکه عرض رشته تعیین شد، تعداد قرقره‌های لازم برای نصب درون دستگاه بافت با استفاده از معادله‌ی (۳) محاسبه می‌شود. برای تنظیم دوک‌ها در ماشین بافت دورانی به طور متقارن، تعداد لازم دوک‌ها باید به ۷۲ تقسیم شود، که تعداد کل دوک‌ها در ماشین بافت دورانی مورد استفاده در پژوهش حاضر (HERZOG 1/144-100 ساخت کشور آلمان) واقع در مرکز تکنولوژی‌های کامپوزیتی دانشگاه ملی تحقیقاتی فنی کازان روسیه) در یک جهت است. پس از ساده‌سازی کسر، قرقره‌ها به این صورت جای‌گذاری می‌شوند که برای مثال، اگر برای بافت پیش‌سازه‌ای فرضی هشت قرقره در هر جهت مورد نیاز باشد، آنگاه $1/9 = 8/72$ ؛ یعنی برای حفظ تقارن باید از هر ۹ عدد دوک یکی توسط یک قرقره پر شده با الیاف بارگذاری شود.

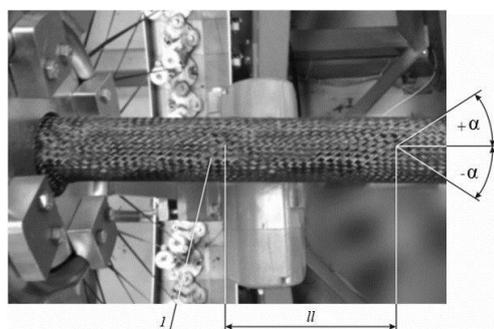
جدول ۲ داده‌های خروجی برای تولید پیش-سازه یک سازه استوانه‌ای کامپوزیتی توسط بافت دورانی با استفاده از فیبر M46J با نسبت حجمی الیاف ۵۵٪، زاویه تقویت ۱۵ و بافت سه محوری به عنوان الگوی تقویت است که شعاع پیش‌سازه ۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۳.۵ میلی‌متر است.

یا به عبارت دیگر:

$$V_0 = \frac{P}{2\pi} \frac{\omega}{\tan(\alpha)} \quad (11)$$



الف



ب

شکل ۶ الف) مسیر حرکت رشته حول قالب؛ ب) روش تعیین زاویه تقویت برای پیش‌سازه بافته شده

که P محیط سطح مقطع قالب است. پس از اندازه‌گیری گام بر روی محور (شکل ۵ ب)، زاویه تقویت با استفاده از معادله (۶) تعیین می‌شود. که به کمک آن می‌توان دقت زاویه تقویت را بررسی کرد. اگر اختلاف بین زاویه تقویت مورد نظر و زاویه به دست آمده پس از فرایند بافت پیش-سازه، از انحراف مجاز تجاوز کند، سرعت محوری قالب درون دستگاه باید با استفاده از رابطه زیر اصلاح شود.

$$V_k = V_0 + \frac{P\omega}{2\pi} \left(\frac{1}{\tan(\alpha_0)} - \frac{1}{\tan(\alpha)} \right) \quad (12)$$

جدول ۲. داده‌های خروجی برای تولید پیش‌سازه

K	b_1 میلی‌متر	عرض، میلی‌متر	فرقره‌های شعاعی	فرقره‌های محوری	تعداد لایه‌ها
1	0,6126	0,078	94*	95	45
6	1,5005	0,190	38	39	18
12	2,1220	0,269	27	28	13
24	3,0010	0,380	19	19	9

* تعداد فرقره‌های لازم بیشتر از تعداد دوک‌های دستگاه

از جدول ۲ نتیجه می‌شود که فیبر M46J - 12K می‌تواند برای بافت پیش‌سازه استوانه مورد نظر استفاده شود. برای دستیابی به این هدف به ۱۳ لایه بافته شده از ۲۸ رشته شعاعی در جهت - ، ۲۸ رشته شعاعی در جهت + و ۲۷ رشته محوری در جهت $\alpha = 0$ نیاز است.

در مرحله سوم، روشی برای بهینه‌سازی زاویه تقویت ارائه شده است. در شکل ۶ الف مسیر حرکت الیاف بر روی محور استوانه‌ای نشان داده شده است. زاویه تقویت با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$n_{axial} = \frac{\pi r}{a_1 + b_2} \quad (8)$$

که در آن l گام نشان داده شده در شکل ۶ است. در فرآیند تولید پیش‌سازه در دستگاه بافت دورانی، زاویه تقویت به سرعت زاویه‌ای، سرعت محوری قالب درون دستگاه و شعاع قالب بستگی دارد.

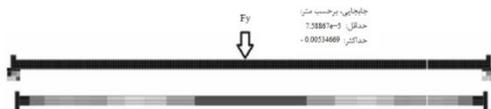
$$\tan \alpha = \frac{r\omega}{V_0} \quad (9)$$

با استفاده از این معادله، سرعت محوری قالب درون دستگاه را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$\tan(\alpha) = \frac{P}{2\pi} \frac{\omega}{V_0} \quad (10)$$

۵. محاسبات نرم افزاری

پس از ساخت، سازه استوانه‌ای مطابق با طرح نمایش داده شده در شکل ۸ مورد آزمایش قرار گرفت. برای تأیید این روش، تحلیل محاسباتی در نرم افزار SYS-PLY (گروه ESI، کشور فرانسه) انجام شد. نرم افزار SYS-PLY امکان تحلیل سازه‌های کامپوزیتی بافته شده را فراهم می‌کند. برای شبیه‌سازی محاسباتی در SYS-PLY، لازم است خواص رزین و فیبر، زاویه جهت‌گیری فیبر، شرایط مرزی و بارها تنظیم شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. شبیه‌سازی یک قطعه در نرم افزار SYS-PLY

۶. بحث و بررسی

برای ساخت المان‌های ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای یک رصدخانه فضایی، سازه‌ای بافته شده با روش بافت دورانی پیشنهاد شده است. این سازه متشکل از مسیرهایی با زوایای مثبت و منفی است که این مسیرهها عمود بر هم بوده و از قرار گرفتن الیاف کربن کنار هم ایجاد و در محل‌های تقاطع در هم تنیده هستند. برای طراحی این سازه‌ها پارامترهای هندسی، ساختاری و تکنولوژی تعیین می‌گردند. به این صورت که با استفاده از پارامترهای هندسی و ساختاری مدل سازه مورد نظر ایجاد و در نرم افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که الزامات طراحی سازه برآورده شوند، پارامترهای تکنولوژی که مربوط به دستگاه بافت دورانی است، تعیین و نمونه‌ی آزمایشگاهی برای

که در آن V_k تصحیح تغییر نرخ، α_0 زاویه تقویت مورد نظر و α زاویه تقویت حاصل بر روی محور پس از مرحله بافت است. لازم به ذکر است که سرعت زاویه‌ای این نوع دستگاه بافندگی شعاعی ۰.۲۳۲۷ رادیان بر ثانیه است.

۴. ساخت نمونه آزمایشگاهی

برای انجام تست نمونه، پیش‌سازه توسط دستگاه بافت دورانی HERZOG 144 ساخت کشور آلمان بافته و به روش RTM چسب‌کاری شد. در شکل ۷ مراحل ساخت نمونه آورده شده است.



الف



ب



ج

شکل ۷. الف. بافت پیش‌سازه توسط دستگاه بافت، ب. چسب‌کاری پیش‌سازه، ج. نمونه آماده تست

پارامترهای تکنولوژیک برای تولید پیش‌سازه‌های استوانه‌ای از الیاف که شامل تعداد و سرعت چرخش قرقره‌ها و همچنین سرعت محوری قالب درون دستگاه برای بافت دو یا سه محوری که الگوی تقویت و ضریب پوشش را فراهم می‌کند، محاسبه کرد. همچنین روش تعیین زاویه تقویت‌کننده امکان محاسبه انحراف از زاویه تقویت‌کننده مورد نظر و تصحیح زاویه تقویت را فراهم می‌آورد.

۸. مآخذ

- [1] S. Minapoor, S. Ajeli, Salmani, M. Tehrani, Investigation into tensile strength of noncrimp three-dimensional orthogonal woven structure, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 49, No. 2, pp. 200-218, 2019.
- [2] F Nasiri, S. Ajeli, D. Semnani, M. Jahanshahi, R. Emadi, Design, fabrication and structural optimization of tubular carbon/Kevlar®/PMMA/graphene nanoplate composite for bone fixation prosthesis, *Biomedical Materials*, Vol. 13, No. 4, pp. 45-55, 2018.
- [3] MP. Wilkinson, MB. Ruggles-Wrenn, Fatigue of a 3D orthogonal non-crimp woven polymer matrix composite at elevated temperature, *Applied Composite Materials*, Vol. 24, pp. 1405-1424, 2017.
- [4] A. Fattahi, H. Ramezani, MM. Shokrieh, S. Kazemirad, Detection and characterization of matrix cracking in fiber-metal laminates using Lamb wave propagation, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 29, No. 10, pp. 30-39, 2022.
- [5] AH. Mirzaei, MM. Shokrieh, A. Saedi, Fatigue behavior of laminated composites with embedded SMA wires, *Composite Structures*, Vol. 293, pp. 115-123, 2022.
- [6] MB. Tofighi, H. Biglari, MM. Shokrieh, An Experimental and Numerical Investigation on the Low-Velocity Impact Response of Nanoreinforced Polypropylene Core Sandwich Structures, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 58, pp. 1-18, 2022.
- [7] HR. Aghaei, M. Varsei, S. Ajeli, MK.

صحت‌سنجی محاسبات نرم‌افزاری تولید می‌شود و در نهایت با انجام مطالعات آزمایشگاهی فرایند طراحی سازه‌ی بافته شده از الیاف کربن تکمیل می‌گردد. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری در SYS-PLY، نتیجه تحلیل محاسباتی و داده‌های تجربی با الزامات طراحی مقایسه شده است. در جدول ۳ نتیجه این مقایسه آورده شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج

پارامتر	داده‌های تجربی	روش عددی
جابجایی، میلی‌متر	۶.۱۳	۵.۳۵
درصد خطا	۲.۱۶	۱۰.۸۳

۷. نتیجه گیری

فضایماها تجهیزات پیچیده و گران قیمت هستند که باید برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گیرند، در نتیجه اطمینان از بالا بودن سطح ویژگی‌های عملیاتی این سازه‌ها از مهمترین مشکلات تولید مدرن است. به همین منظور استفاده از مواد پیشرفته و تکنولوژی‌های مدرن برای تولید این اجسام پرنده دارای اهمیت است. برای طراحی و تعیین پارامترهای ستون‌های نگهدارنده آینه همگرای یک رصدخانه فضایی الگوریتم‌های پیشنهاد شده است. با توجه به تایید الگوریتم‌های پیشنهادی توسط روش نرم‌افزاری و آزمایشات تجربی، این الگوریتم‌ها برای انتخاب الیاف تقویت‌کننده، رزین و الگوی بافت و زاویه تقویت می‌تواند در طراحی سازه‌های استوانه‌ای هوافضایی مورد استفاده قرار گیرد تا چنین سازه‌هایی به وسیله روش بافت دورانی و چسب‌کاری انتقالی RTM ساخته شود. همچنین این الگوریتم‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا

- via Radial Braiding, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol. 46, No. 3, pp. 302-308, 2017.
- [17] S. A. Samipour, Ya. S. Danilov Development and verification of an analytic technique to determine the stiffness parameters of braided tubular parts, *Russian Aeronautics*, Vol. 59, No. 4, pp. 460-465, 2016.
- [18] S. Ajeli, A.A. Asgharian Jeddi Geometrically poisson's ratio of the polyester double-bar warp-knitted structures on the jamming point, *Journal of Textiles and Polymers*, Vol. 2, pp. 26-30, 2014.
- [19] H. Hasani, S. Ajeli, R.Hessami, A. Zadhoush, Investigation into energy absorption capacity of composites reinforced by three-dimensional-weft knitted fabrics, *Journal of Industrial Textile*, Vol. 43, pp. 536-548, 2014.
- [20] V. Pouyafar, H. Bolandi, R. Meshkabadi Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham failure criteria, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, pp. 1-12, 2022.
- Dolatabadi, ME. Yazdanshenas, Torsional behavior of non-crimp orthogonal woven composite using experimental and numerical methods, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 51, pp. 8960-8982, 2022.
- [8] V. V. Vasil'ev, V. A. Bunakov, Design axially compressed lattice composite cylindrical shells, *Composite Structures*, No. 2, pp. 68-77, 2000.
- [9] V.V. Vasil'ev, V.A. Barynin, A.F. Razin, Anisogrid lattice composite structures – design and application in aerospace technology, *Composites and nanostructures*, No. 3, pp. 38–50, 2009.
- [10] S.V. Lomov, A. Nakai, R.S. Parnas, S. Bandyopadhyay Ghosh, I. Verpoest, Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two– and three–axial braids, *Textile Research Journal*, Vol. 72, No. 1, pp. 706-712, 2002.
- [11] J. Carey, A. Fahim, M. Munro, Predicting elastic constants of 2D–braided fiber rigid and elastomeric–polymeric matrix composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 23, pp. 1845-1857, 2004.
- [12] C. Ayranci, J.P. Carey, Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit–cell geometry, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, pp. 229-235, 2010.
- [13] J. Carey, M. Munro, A. Fahim, Regression–based model for elastic constants of 2D braided/woven open mesh angle–ply composites, *Polymer Composites*, Vol. 26, pp. 152-164, 2005.
- [14] J.L. Li, Y.N. Jiao, Y. Sun, L.M. Wei, Experimental investigation of cut-edge effect on mechanical properties of three-dimensional braided composites, *Material Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 2417-2424, 2007.
- [15] S.A.Samipour, V.I. Khaliulin, V.V. Batrakov, Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol. 47, No. 3, pp. 284-289, 2018.
- [16] S.A. Samipour, V.I. Khaliulin, V.V. Batrakov, A Method for Calculating the Parameters for Manufacturing Preforms