ماهنامه علمی پژوهشی
مهندسی ساخت و تولید ایران
www.smeir.org
10.22034/ijme.2025.512023.2062

ساخت دستگاه رشته پیچی با چهار درجه آزادی برای تولید ساختارهای مشبک کامپوزیتی

رضا محمدزاده قشلاقی[۱و۲*]، سعید غفارزاده[۳]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، هادی‌شهر، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آتاتورک، ارزروم، ترکیه
۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: reza.mohammadzadeh@iau.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
دریافت: ۹ فروردین ۱۴۰۴
پذیرش: ۲۸ فروردین ۱۴۰۴

کلیدواژگان:
ساختارهای مشبک کامپوزیتی
رشته پیچی
دستگاه کنترل‌شده کامپیوتری
ساختارهای سبک وزن
طراحی کامپوزیت

چکیده

سازه‌های کامپوزیتی به دلیل وزن کم، استحکام بالا و دلایل اقتصادی در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه به توسعه یک دستگاه پیشرفته رشته پیچی فیلامنتی با چهار درجه آزادی برای تولید نمونه‌های آزمایشی می‌پردازد. این دستگاه برای ساخت ساختارهای مشبک روی سطوح استوانه‌ای، مخروطی و سطوح پیچیده طراحی شده است. نرم‌افزار کنترل سفارشی که با ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی یکپارچه شده، امکان قرارگیری خودکار و کارآمد فیبرها را فراهم کرده است. نمونه‌های آزمایشی با استفاده از فیبرهای کربنی آغشته به رزین اپوکسی و پیچیده شده بر روی قالب‌های سیلیکونی سفارشی تولید شده‌اند. روش رشته پیچی به دلیل توانایی دستیابی به حجم بالای فیبر، کاهش حفره‌ها و کارایی هزینه انتخاب شده است. برای تأیید نتایج بهینه‌سازی، ساختارهای مشبک با الگوی ورونای تحت آزمایش‌های تجربی قرار گرفتند. آزمایش‌های کمانش که با استفاده از یک دستگاه آزمون یونیورسال انجام شد، بارهای بحرانی کمانش و خواص مکانیکی نمونه‌های بهینه‌سازی شده را ارزیابی کردند. با توجه به داده‌های آزمون کمانش فشاری نسبت بار بحرانی کمانش به وزن سازه معادل ۲۴۰۰۰ نیوتن بر کیلوگرم می‌باشد. همچنین، استفاده از دستگاه رشته پیچی توسعه‌یافته موجب دستیابی به کاهش قابل‌توجهی در هزینه‌های تولید نسبت به روش‌های مرسوم شده است. به‌علاوه، امکان تولید ساختارهایی با هندسه پیچیده و پروفیل‌های غیر دورانی مانند بال هواپیما و هیدروفویل‌ها فراهم گردیده است. این قابلیت‌ها موجب افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی و استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته در پروژه‌های مهندسی گردیده است. نتایج نشان دهنده قابلیت دستگاه و روش‌های توسعه‌یافته در تولید ساختارهای کامپوزیتی با عملکرد بالا در عین کاهش هزینه‌های تولید است.

Development of a four-degree-of-freedom filament winding machine for manufacturing composite grid structures

Reza Mohammadzadeh Gheshlaghi[1,2*], Saeid Ghaffarzadeh[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Hadishahr, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Atatürk University, Erzurum, Turkey
3- Department of Mechanical Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
* Corresponding Author's Email: reza.mohammadzadeh@iau.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 29 March 2025
Accepted: 17 April 2025

Keywords:
Composite Grid Structures
Filament Winding
Computer-Controlled Machine
Lightweight Structures
Composite Design

Abstract

Composite grid structures have garnered significant attention across various industries due to their low weight, high strength, and economic advantages. This study focuses on developing of an advanced filament winding machine with four degrees of freedom to produce experimental specimens. The machine is designed to fabricate grid structures on cylindrical, conical, and complex surface. Integrated with three-dimensional modeling tools, custom control software enables the automated and efficient placement of fibers. Experimental specimens were manufactured using carbon fibers impregnated with epoxy resin and wound onto custom silicone molds. The filament winding technique was selected for its ability to achieve high fiber volume fractions, minimize voids, and enhance cost-efficiency. To validate the optimization results, grid structures featuring a Voronoi pattern were subjected to experimental testing. Buckling tests, conducted using a universal testing machine, evaluated the critical buckling loads and mechanical properties of the optimized specimens. According to the compressive buckling test data, the ratio of the critical buckling load to the weight of the structure is equal to 24,000 N/kg. Furthermore, the developed filament winding machine significantly reduced production costs compared to conventional methods. It also enabled the fabrication of structures with complex geometries and non-circular profiles, such as aircraft wings and hydrofoils. These capabilities enhance design flexibility and the application of advanced composite materials in engineering projects. The results demonstrate the efficacy of the developed machine and methodologies in producing high-performance composite grid structures while lowering manufacturing costs.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammadzadeh Gheshlaghi R, Ghaffarzadeh S. Development of a four-degree-of-freedom filament winding machine for manufacturing composite grid structures. 2025 May 22;12(3):38-44. doi: 10.22034/ijme.2025.512023.2062 [In Persian]

۱- مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی به دلیل وزن کم، استحکام بالا و مزایای اقتصادی در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. سازه‌های کامپوزیتی با الگوهای مشبک نقش حیاتی در طراحی سازه‌های کارآمد در کاربردهای هوافضا و فضایی ایفا می‌کنند [۱]. این سازه‌های کامپوزیتی از فازهای تقویت‌کننده و ماتریس[1] تشکیل شده‌اند. استحکام سازه‌های سبک به تقویت‌کننده‌هایی که در طول طراحی استفاده می‌شوند بستگی دارد. به طور معمول، اشکال مختلف تقویتی مانند مقاطع I و T برای دستیابی به سازه‌های سبک با توانایی حمل بار استفاده می‌شوند [۲]. در مقایسه با پانل‌های تقویت شده و ساندویچی، سازه‌های مشبک از لحاظ وزن، تولید و اقتصاد مزایای بیشتری دارند. ویژگی‌ها و سفتی سازه‌های شبکه‌ای توسط شبکه‌های ریب[2] قفل‌شده در هم تعریف می‌شوند که می‌توانند در الگوهای مختلفی مرتب شوند.

ریب‌های این سازه‌ها معمولاً به صورت محوری، مارپیچ و دایره‌ای مرتب می‌شوند. بر اساس مطالعات انجام شده، سازه‌هایی با آرایش ریب در یک جهت دارای تحمل بالایی در برابر آسیب‌های ضربه‌ای هستند و مقاومت بالایی در برابر جدا شدن و پیشروی ترک دارند [۳]. با توجه به اینکه سازه‌های مشبک کامپوزیتی معمولاً در معرض بارهای محوری قرار دارند، الیاف در امتداد محور ریب‌ها جهت‌دهی می‌شوند. مزایای اصلی سازه‌های مشبک شامل پیکربندی‌های پایدار، کارایی بالای سازه‌ای و هزینه‌های پایین است [۴]. بللینی و همکاران [۵] به بررسی و مقایسه عملکرد سازه‌های استوانه‌ای مشبک از جنس کامپوزیت فیبر کربن و آلیاژ تیتانیوم پرداخته‌اند که برای کاربردهای هوانوردی طراحی شده‌اند و باید قوی، سخت و سبک باشند. با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و تولید از طریق رشته پیچشی رباتیک، مشخص شد که هر دو ماده از نظر استحکام و سختی عملکرد مشابهی دارند، اما سازه کامپوزیتی به دلیل وزن کمتر و عملکرد ویژه بالاتر، برتری قابل‌توجهی دارد و گزینه بهینه‌تری برای این کاربردها محسوب می‌شود.

فرهادی و همکاران [۶] پارامترهای ساخت مؤثر بر استحکام خمشی پانل‌های مشبک کامپوزیتی را در یک مطالعه تجربی و آماری بررسی و بهینه‌سازی نمودند. در این مطالعه پارامتر سیکل پخت، فشار حین پخت، دمای رزین و کشش الیاف، به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ساخت پانل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌ها از قالب‌های سیلیکونی و رشته پیچی تر (خیس) استفاده گردید. عطایی و همکاران [۷] استحکام کمانشی پس از ضربه پانل‌های مشبک کامپوزیتی را به‌صورت تجربی مورد بررسی قراردادند. برای این منظور از پانل‌های مشبک کامپوزیتی تقویت شده با ریبهای مثلثی با سه ضخامت متفاوت استفاده نمودند. مواد مورد استفاده برای ساخت پانل‌ها عبارت بود از الیاف شیشه E و رزین اپوکسی. برای ساخت نمونه‌ها که به‌صورت الگوهای مثلث ایزوگرید بودند از قالب سیلیکونی و رشته پیچی دستی استفاده شده بود. نمونه‌ها ابتدا تحت ضربه و سپس آزمون کمانش قرار گرفتند. در این مطالعه اثرات ضخامت رویه و ضربه بر استحکام کمانشی پانل‌ها مورد بررسی قرارگرفته است.

وارگاس رویاس و همکاران [۸] یک مدل ریاضی جامع را برای بهبود فرایند رشته پیچی در ساخت سازه‌های کامپوزیتی با هندسه‌های پیچیده ارائه داده‌اند. این مدل با استفاده از یک رویکرد یکپارچه، محدودیت‌های تولید مانند نیاز به انحراف از مسیرهای ژئودزیک را برطرف کرده و با تحلیل هندسه قالب و انحناهای محلی، معادله‌ای برای مسیر فیبر تدوین کرده است که پایداری دسته فیبر را تضمین می‌کند. ابزار عددی توسعه‌یافته، زاویه پیچش فیبر را برای دو شکل محدب و مقعر پیش‌بینی کرده و نتایج آن با ساخت تجربی این اشکال توسط دستگاه چهار محوری اعتبارسنجی شده است، که نشان‌دهنده توانایی مدل در غلبه بر چالش‌های ساخت است. ژانگ و همکاران [۹] به بررسی تأثیر الگوهای پیچش فیبر بر عملکرد سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای با کاربرد هوافضایی پرداختند که به دلیل سختی و استحکام ویژه بالا برجسته هستند، اما در فرایند تولید با مشکلاتی مانند چین‌وچروک و حفره در تقاطع‌ها مواجه می‌شوند. مدل‌های ریاضی برای هدایت فیبرها و پیچش موازی ریب‌ها نشان‌دهنده وجود پل‌ها و انباشتگی فیبر در تقاطع‌هاست و با مقایسه مسیرهای مختلف فیبر و استفاده از تحلیل المان محدود، تأثیر این مسیرها بر استحکام تقاطع‌ها بررسی شده است؛ همچنین یک نمونه ساخته و با آزمون فشاری تک‌محوری ارزیابی شده تا عملکرد واقعی آن تأیید شود.

فرایند رشته پیچی به طور گسترده‌ای برای ساخت محصولاتی مانند قاب موتورهای موشک، مخازن تحت فشار، لوله‌ها و شفت‌های انتقال نیرو استفاده می‌شود. به طور معمول، نوارهای پیش‌آغشته[3] با استفاده از روش رشته پیچی تولید می‌شوند و قبل از سخت شدن

[1] Matrix
[2] Ribe
[3] Pre-preg

نوار از قالب ماندرل جدا می‌شوند. پیشرفت‌های قابل‌توجهی در فرایند رشته پیچی انجام شده که امکان تولید انواع قطعات مانند فنرهای برگ برای خودروها را فراهم کرده است. برنامه‌های آزمایشی برای تولید سازه‌های بزرگ و پیچیده مانند بدنه‌های هواپیما و خودرو با استفاده از رشته پیچی در حال انجام است. برای چنین سازه‌هایی، ماشین‌های رشته پیچی نیاز به استفاده از کنترل کامپیوتری و فناوری روباتیک دارند. فرایند رشته پیچی شامل پیچیدن الیاف آغشته به رزین بر روی یک قالب استوانه‌ای برای تولید یک لوله کامپوزیتی یا بدنه استوانه‌ای است [۱۰].

اگرچه روش رشته پیچی روشی مرسوم در ساخت سازه‌های کامپوزیتی به شمار می‌رود اما عمدتاً قطعات ساخته شده به این روش دارای هندسه استوانه‌ای بوده و زاویه پیچش الیاف ثابت است و بعضاً در درپوش‌های انتهایی مخزن تغییر می‌کند. این مطالعه به توسعه یک دستگاه پیشرفته رشته پیچی فیلامنتی با چهار درجه آزادی برای تولید سازه‌های مشبک کامپوزیتی می‌پردازد. این دستگاه برای ساخت روی سطوح استوانه‌ای، مخروطی و سطوح پیچیده با دقت بالا طراحی شده است. نرم‌افزار کنترل اختصاصی که با ابزارهای مدل‌سازی سه بعدی یکپارچه شده، امکان قرارگیری خودکار و کارآمد فیبرها را فراهم کرده است. دستگاه رشته‌پیچی ساخته‌شده در این مطالعه با توجه به نرم‌افزار اختصاصی‌شده منحصربفرد، علاوه بر توانایی تولید قطعات معمولی با زوایای پیچشی ثابت، توانایی تولید نمونه‌های پیچیده‌تر با زوایای دلخواه مطابق الگوی سازه مشبک طراحی شده را نیز دارا می‌باشد. نمونه‌های آزمایشی با استفاده از فیبرهای کربنی آغشته به رزین اپوکسی و پیچیده شده بر روی قالب‌های سیلیکونی خاص تولید شده‌اند. روش رشته پیچی به دلیل توانایی دستیابی به حجم بالای فیبر، کاهش حفره‌ها و کارایی هزینه انتخاب شده است.

۲- مواد و روش‌ها

ساختارهای مشبک کامپوزیتی به طور معمول به صورت پوسته‌های استوانه‌ای یا مخروطی ساخته می‌شوند که از ریب‌های کامپوزیتی یک جهتی که به صورت مارپیچی و دایره‌ای پیچیده شده‌اند تشکیل شده‌اند. مراحل زیر در فرایند تولید دنبال می‌شوند:

۱- قالب ماندرل با یک پوشش الاستیک ساخته شده از لاستیک سیلیکون که دارای شیارهایی برای ریب‌ها است پوشانده می‌شود.

۲- الیاف کربنی آغشته به رزین به‌صورت مارپیچی، دایره‌ای و در برخی موارد محوری پیچیده می‌شوند تا سیستم ریب‌ها ایجاد شود و گاهی اوقات با پوسته‌های کامپوزیتی نازک پوشانده می‌شوند.

۳- پس از سخت شدن، قالب ماندرل و پوشش الاستیک برداشته می‌شود.

در این مطالعه، یک دستگاه رشته پیچی با چهار درجه آزادی طراحی و ساخته شده است تا سازه‌های مشبک کامپوزیتی تولید شوند. این دستگاه قادر به انجام عملیات پیچش دلخواه بر روی سطوح استوانه‌ای، مخروطی، کروی، سهمی‌وار و سایر سطوح است. علاوه بر این، سطوح بدون تقارن محوری، مانند پروفیل‌های بال یا هیدروفویل‌ها، می‌توانند به صورت تک و دو تکه با این دستگاه تولید شوند. چهار محور حرکتی دستگاه به این شرح است (شکل ۱): ۱- محور طولی X، ۲- محور عرضی Y، ۳- محور چرخشی ماندرل A و ۴- محور چرخشی هد رشته‌پیچی B.

سیستم شامل اجزای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری است که به طور خاص برای تولید سازه‌های مشبک طراحی شده‌اند. بخش نرم‌افزار که از برنامه‌های کنترل تجاری استفاده نمی‌کند، به گونه‌ای کدگذاری شده است که با فرایند رشته پیچی سازگار باشد. این نرم‌افزار مختصات حرکتی را از یک مدل سه‌بعدی به دست می‌آورد و دستورات را به یک میکروکنترلر ارسال می‌کند تا موتورها به صورت طراحی شده حرکت کنند. برنامه در محیط گراس هاپر سه‌بعدی[1] توسعه داده شده است (شکل ۲).

اجزای سخت‌افزار شامل قسمت‌های مکانیکی، الکتریکی و الکترونیکی هستند. بخش مکانیکی شامل موارد زیر است:

۱- شاسی ثابت: تمام قطعات متحرک و ثابت، همراه با مجموعه‌های قدرت و کنترل، بر روی این بلوک که با پروفیل‌های آلومینیومی سیگما ساخته شده و به صورت ثابت نصب شده است. شیارهای موجود بر روی پروفیل‌های طولی جهت حرکت در محور X را نشان می‌دهند.

[1] 3D Grasshopper

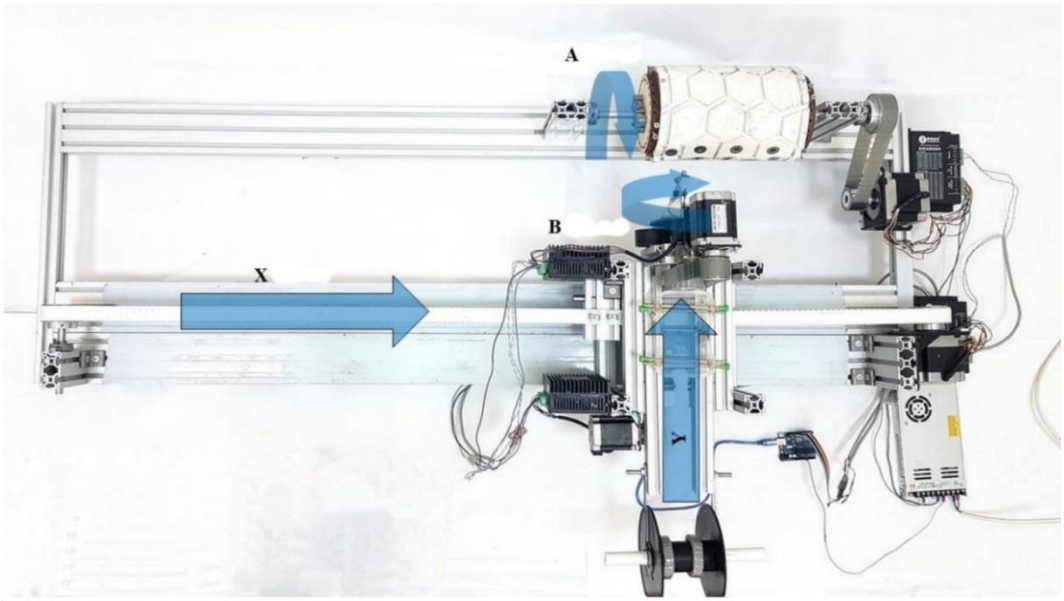
۲- شاسی متحرک طولی: این قسمت می‌تواند با استفاده از شیارهای موجود بر روی شاسی در امتداد محور X حرکت کند. این شاسی با استفاده از پروفیل‌های دقیق سیگما ساخته شده و با سخت‌افزار خاصی مونتاژ شده است. چرخ‌های پلاستیکی به پروفیل‌ها متصل شده‌اند تا حرکت را تسهیل کنند.

۳- شاسی متحرک عرضی: این بلوک که هد رشته پیچی فیبر را حمل می‌کند، با کمک ریل‌های آلومینیومی به صورت عمودی نسبت به محور شاسی ثابت حرکت می‌کند. شاسی‌های ثابت و متحرک دستگاه در شکل ۳ نمایش داده‌شده است.

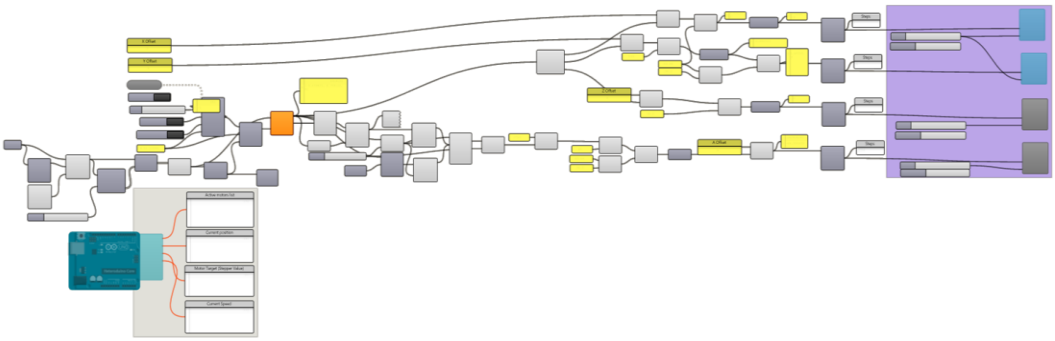
۴- چرخاننده و نگه‌دارنده قالب: این بلوک ماندرل را حمل کرده و چرخش آن را امکان‌پذیر می‌کند. چرخش قالب توسط یک موتور پله‌ای، تسمه دنده و سیستم پولی انجام می‌شود. ماندرل به صورت افقی و موازی با محور Z نصب شده است. الیاف آغشته به رزین توسط هد رشته پیچی در شیارهای قالب قرار می‌گیرند و موتور پله‌ای نیروی کشش را فراهم می‌کند.

۵- هد رشته پیچی فیبر: این بلوک به درست قرار دادن الیاف در شیارهای ماندرل کمک می‌کند. چرخش بلوک با کمک موتور پله‌ای، پولی و تسمه دنده انجام می‌شود. الیاف آغشته به رزین از لوله هد عبور کرده و بر روی ماندرل پیچیده می‌شوند. شکل ۴ ماندرل و هد رشته پیچی را نمایش می‌دهد.

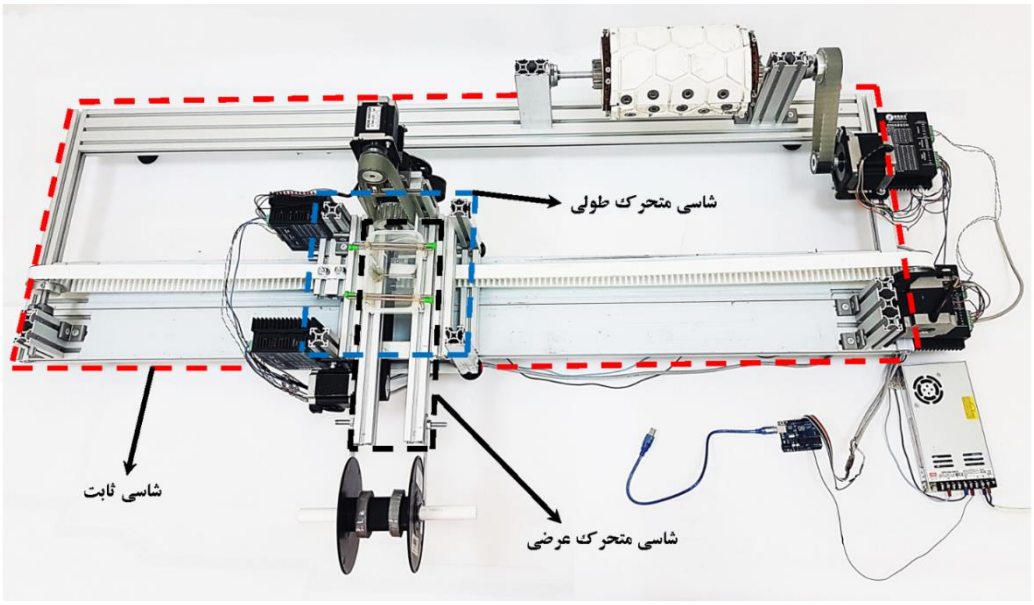
۶- بلوک الکتریک و کنترل: این بلوک شامل موتورهای پله‌ای، درایورهای موتور، کارت کنترل و منبع تغذیه مستقیم است. چهار نوع موتور پله‌ای برای محورهای X Y Z و چرخش، حرکت را در چهار محور فراهم می‌کنند.



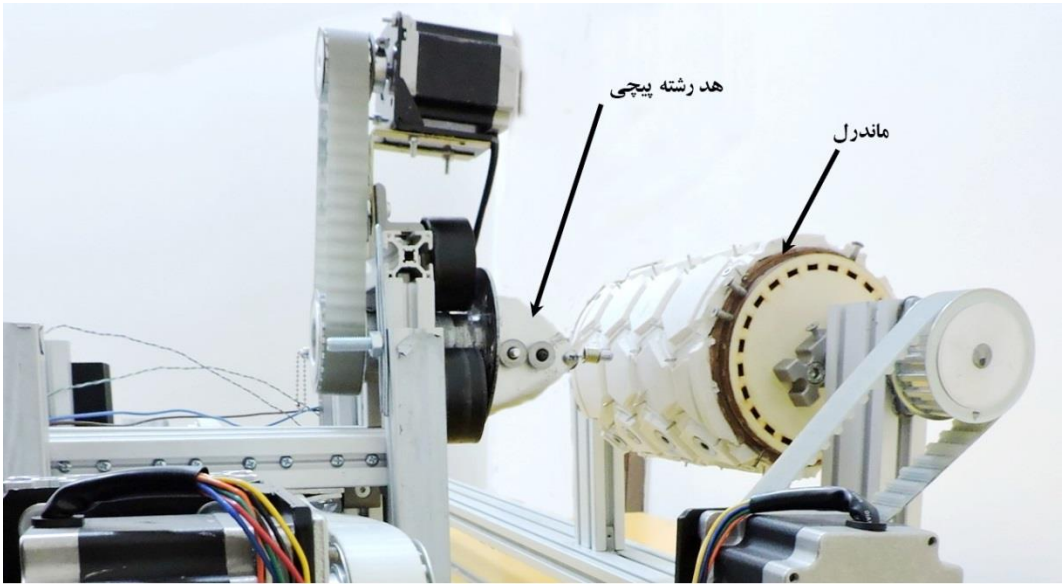
شکل ۱ شمای کلی دستگاه و محورهای حرکتی، X: محور طولی، Y: محور عرضی، A: محور چرخشی ماندرل و B: محور چرخش هد



شکل ۲ شمای کلی برنامه کنترل نرم‌افزاری دستگاه رشته پیچی



شکل ۳ شاسی ثابت، شاسی متحرک طولی و شاسی متحرک عرضی



شکل ۴ ماندرل و هد رشته پیچی فیبر

۳- نتایج و بحث

برای بررسی تجربی رفتار کمانشی ساختار مشبک، نمونه‌های آزمایشی تولید شده‌اند. درساخت نمونه‌های آزمایشی از الیاف کربن به عنوان تقویت کننده و رزین اپوکسی به عنوان ماتریس استفاده شده است. مشخصات نمونه‌های ساخته شده مطابق جدول ۱ می‌باشد. روش رشته پیچی برای خودکارسازی فرایند تولید و کاهش هزینه‌های تولید انتخاب شده است. مزایای اصلی روش رشته پیچی، عدم نیاز به اتوکلاو، پیچیدن پیوسته الیاف که به حجم بالای الیاف در محصول نهایی منجر می‌شود و همچنین کاهش تخلخل است.

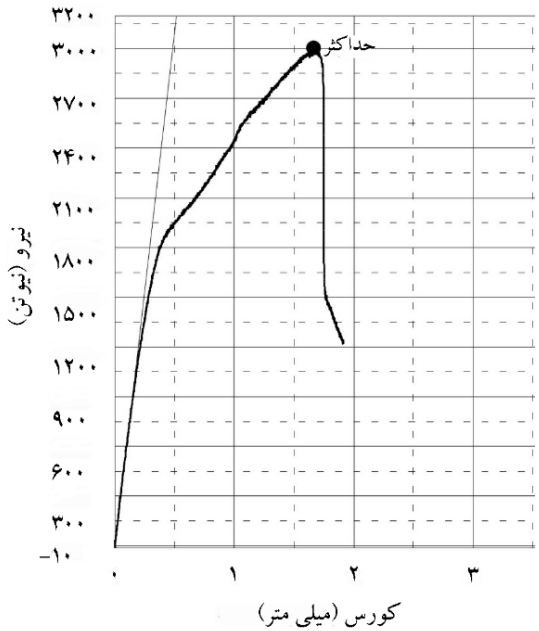
جدول ۱ مشخصات ابعادی نمونه‌های سازه‌های مشبک کامپوزیتی

قطرخارجی [میلی‌متر]	ارتفاع [میلی‌متر]	ضخامت ریب‌ها [میلی‌متر]	عرض ریب‌ها [میلی‌متر]	وزن قطعه [گرم]
۱۴۰	۲۰۴	۴	۵	۱۲۰

دو نمونه مختلف از سازه‌های مشبک کامپوزیتی با الگوی بهینه‌سازی شده با استفاده از روش رشته پیچی تولید شده‌اند (شکل ۵).

شکل ۵ هد رشته پیچی فیبر

این نمونه‌ها تحت آزمایش‌های فشاری محوری قرار گرفتند تا بارهای بحرانی کمانش تعیین شوند. آزمایش‌های فشاری با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال شیمادزو[1] انجام شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت نیروی فشاری، لایه‌ای نازک از لاستیک بر روی فلنج‌های بالایی و پایینی نمونه‌ها قرار داده شد. سرعت فشاری ۰,۳ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد تا نمونه بتواند به بار اعمالی انطباق یابد. در طول آزمایش، مقادیر تغییر شکل در مقابل نیروی فشاری ثبت شد و بارهای بحرانی کمانش تعیین گردید (شکل ۶).



شکل ۶ دیاگرام نیرو – کورس نمونه تحت بار فشاری

[1] Shimadzu

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تجربی نشان داد که ساختار مشبک کامپوزیت با الگوی بهینه‌سازی شده عملکرد بالایی در برابر بارهای فشاری محوری از خود نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های آزمون کمانش فشاری صورت گرفته باربحرانی کمانش معادل ۳۰۰۰ نیوتن می‌باشد. وزن نمونه آزمایش ۱۲۵ گرم و نسبت بار بحرانی کمانش به وزن سازه معادل ۲۴۰۰۰ نیوتن بر کیلوگرم می‌باشد. روش رشته پیچی در تولید نمونه‌هایی با حجم بالای الیاف و تخلخل کم مؤثر بوده و به استحکام مکانیکی سازه‌ها کمک کرده است.

استفاده از دستگاه رشته پیچی توسعه‌یافته که دارای نرم‌افزار کنترل سفارشی و ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی است، قرارگیری دقیق و کارآمد الیاف را تسهیل کرده است. این قابلیت بویژه برای تولید هندسه‌های پیچیده و پروفیل‌های غیر دورانی مانند پروفیل‌های بال و هیدروفویل‌ها مفید است. علاوه بر این، توانایی دستگاه در خودکارسازی فرایند رشته پیچی منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها نسبت به روش‌های مرسوم شده است.

بارهای بحرانی کمانش مشاهده شده در آزمایش‌ها فرایند بهینه‌سازی را تأیید کرده و نشان داده‌اند که ساختارهای مشبک کامپوزیتی می‌توانند به کارایی سازه‌ای بالا دست یابند و درعین‌حال پایداری تحت بار را حفظ کنند. تنوع پذیری دستگاه رشته پیچی امکان طراحی و کاربرد مواد کامپوزیتی پیشرفته در صنایع هوافضا و سایر زمینه‌های مهندسی را فراهم می‌کند.

پژوهش‌های آینده می‌توانند به بهینه‌سازی بیشتر فرایند رشته پیچی، انتخاب مواد و کاربرد دستگاه توسعه‌یافته در صنایع مختلف بپردازند. بهبود الگوریتم‌های کنترل و ادغام با ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته نیز می‌تواند دقت و عملکرد سازه‌های تولیدشده را افزایش دهد.

تقدیر و تشکر

این مطالعه در چارچوب پروژه‌های BAP به شماره 2015/378 پشتیبانی شده است. بدین‌وسیله تقدیر و تشکر خود را از پروفسور دکتر هامیت آکبولوت و دانشگاه آتاتورک به دلیل کمک‌های مادی و معنوی ایشان ابراز می‌دارم.

References

[1] Mangas C, Vilanova J, Diaz V, Samartin CR, Kiryenko S, Katajisto H, Perez-Alvarez J. Anisogrid payload adaptor structure for Vega launcher. InProceedings of the 14th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET) 2016.

[2] Totaro G, Spena P, Giusto G, De Nicola F, Kiryenko S, Das S. Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance. Composite Structures. 2021 Feb 15;258:113368. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113368

[3] Fadavian A, Davar A, Heydari Beni M, Eskandari Jam J. Statistical-experimental analysis of the effect of fabrication parameters on the strength of composite grid-stiffened cylinders under compressive axial load. Journal of Science and Technology of Composites. 2021 Aug 23;8(2):1543-55. doi: 10.22068/JSTC.2021.531397.1729

[4] Mathew T, Chacko V, Thomas T. Parametric study of lattice conical adaptor. International Journal of Scientific and Engineering Research. 2013;4(8).

[5] Bellini C, Di Cocco V, Iacoviello F, Sorrentino L. Performance index of isogrid structures: Robotic filament winding carbon fiber reinforced polymer vs. titanium alloy. Materials and Manufacturing Processes. 2022 Apr 4;37(5):559-67. doi: 10.1080/10426914.2021.1926489

[6] Farhadi M, Davar A, Heydari Beni M, Eskandari Jam J. Experimental study and statistical optimization of fabrication parameters affecting the flexural strength of composite grid-stiffened panels. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Jan 21;8(11):1-5. [In Persian]

[7] Ataei A, Ahmadi H, Farrokhabadi A. Experimental investigation of Buckling after impact strength of grid stiffened composite panels. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Jan 20;7(11):34-41. [In Persian]

[8] Rojas EV, Chapelle D, Perreux D, Delobelle B, Thiebaud F. Unified approach of filament winding applied to complex shape mandrels. Composite structures. 2014 Sep 1;116:805-13. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.06.00

[9] Zhang P, Han Z, Gu J, Sun S, Fu H. A strategy of parallel winding of circumferential ribs and helical ribs for composite cylindrical grid structures. Composite Structures. 2021 Nov 1;275:114351. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114351

[10] Gibson RF. Principles of composite material mechanics. CRC press; 2007 May 30.