



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



تحلیل آماری - تجربی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری

احمد فدویان¹، علی داور^{2*}، محسن حیدری بنی³، جعفر اسکندری جم⁴

- 1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 2- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.
 4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، a_davar@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/04/15
 پذیرش: 1400/08/16
کلیدواژگان
 تحلیل آماری- تجربی، استوانه مشبک کامپوزیتی، بار محوری فشاری، پارامترهای ساخت

هدف از این پژوهش، دستیابی به حداکثر بار قابل تحمل در بارگذاری محوری فشاری برای یک سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با هندسه مشخص به روش تجربی- آماری است. پس از مطالعه‌ی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی فاکتورهای ساخت سازه‌های تولید شده با فرایند رشته پیچی و همچنین امکانات موجود، اثر چهار فاکتور کشش الیاف، سرعت پیچش، شرایط پخت و نوع الیاف بر کیفیت ساخت و استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی بررسی شد. برای این منظور، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، اثر فاکتورهای ساخت مذکور در سه سطح و بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها بر متغیر پاسخ، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس روش تاگوچی، 9 نمونه ساخته و تحت آزمون قرار داده شده‌اند و نتایج حاصل از آزمون‌ها، با استفاده از تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا میزان تأثیرگذاری فاکتورهای ساخت بر متغیرهای پاسخ، مشخص شود. دو متغیر پاسخ شامل حداکثر بار تحمل شده و ویژه و کارایی فشاری در نظر گرفته شده‌اند. فاکتورهای نوع الیاف با 88.23٪ و کشش الیاف 9.98٪ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده و ویژه داشته‌اند و اثر دو فاکتور سرعت پیچش با 0.70٪ و شرایط پخت با 0.30٪ قابل صرف‌نظر بوده است. فاکتورهای نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪، به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل بر روی متغیر پاسخ کارایی فشاری بوده‌اند و اثر فاکتور شرایط پخت با 1.85٪ قابل صرف‌نظر بوده است. بهینه‌سازی شرایط ساخت، بر اساس متغیر کارایی فشاری صورت گرفته است.

Statistical-experimental analysis of the effect of fabrication parameters on the strength of composite grid-stiffened cylinders under compressive axial load

Ahmad Fadavian¹, Ali Davar^{2*}, Mohsen Heydari Beni³, Jafar Eskandari Jam⁴

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
 2- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
 3- Faculty of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.
 4- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran.

* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir

Keywords

Statistical analysis, experimental analysis, composite lattice cylinder, compressive axial load

Abstract

The aim of this study is to attain the maximum carried-load under compressive axial loading for a composite lattice cylindrical structure with a specified geometry by an experimental-statistical method. For this purpose, after studying the research in the field of fabrication factors of structures manufactured by filament winding process and also available facilities, the influence of four fabrication factors including fiber (roving) tension, winding speed, cure cycle and fiber type on the product quality and strength of the composite lattice cylinders has been investigated. For this purpose, design of experiment (DOE) with Taguchi method has been applied to investigate the effect of fabrication factors on the response variables in three levels without considering their interactions. According to Taguchi method, nine structures have been manufactured and tested and the results of the test have been analyzed using analysis of variance to determine the influence of the fabrication factors on the response variables. Two response variables including specific maximum carried-load and compressive efficiency have been considered. The results have shown that fiber type with 88.23% and fiber tension with 9.98% have greater influence, respectively, on the specific maximum carried-load while the effect of winding speed with 0.7% and cure cycle with 0.3% are negligible. In addition, the results illustrated that fiber type with 54.20%, fiber tension with 23.54% and winding speed with 14.86% have greater influence, respectively, on the compressive efficiency while the effect of cure cycle with 1.85% is negligible.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

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", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1543-1555, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.531397.1729>

1- مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون رقابت در صنایع مختلف، مقوله‌ی کیفیت جزء لاینفک شاخصه‌های کلیدی در محصولات تولیدی به حساب می‌آید. یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت محصول، استفاده از موادی با قابلیت‌های بهبود یافته است. از این رو، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان جایگزینی برای مواد پیشین مطرح شده است. کاربرد کامپوزیت‌ها، به عنوان موادی نوین با ویژگی‌هایی برتر در خواص مکانیکی، فیزیکی، الکتریکی، وزن و هزینه به شدت افزایش یافته است. این مواد شامل دو قسمت اصلی می‌باشند: (الف) ماده زمینه که دارای انواع پلیمری، فلزی و سرامیکی هستند، (ب) ماده تقویت‌کننده که به صورت الیاف بلند، الیاف کوتاه و ذرات می‌باشند. اکثر کامپوزیت‌ها زمینه پلیمری هستند [1].

در سازه‌های کامپوزیتی، فرآیند ساخت و پارامترهای آن به شدت بر رفتار مکانیکی تأثیر می‌گذارد. برای مثال، کشش الیاف و یا سرعت پیچش در فرآیند پیچش تر، بر مقدار رزین و حفره¹ (حباب‌های هوا) تأثیر می‌گذارد و در نتیجه برای استحکام سازه‌های ساخته شده با این روش، عاملی تعیین‌کننده هستند.

توتارو و دی نیکولا² [2] در پژوهشی به طراحی بهینه استوانه مشبک کامپوزیتی برای جرم کمینه تحت قیود استحکام و سفتی پرداخته‌اند. برای ساخت این سازه، از روش جایگذاری الیاف با بازوی روباتیک روی قالب سیلیکونی بهره گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌ی ساخته شده در مقایسه با نمونه‌ی معیار آلومینیومی، حدود 40 درصد کاهش وزن داشته است.

مازومدار و هوا³ [3] برای انجام حداقل آزمایش‌ها به منظور بررسی شرایط فرآیند ساخت (نوارپیچی) حلقه‌های کامپوزیتی از جنس کربن- پلی‌اترترکتون⁴، از روش کنترل کیفیت تاگوچی بهره برده‌اند. در این آزمایش‌ها، تأثیر سه عامل توان لیزر، سرعت پیچش و فشار مستحکم شدن⁵ بر استحکام اتصال بین لایه‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری به روش تحلیل واریانس نشان‌دهنده‌ی این است که توان لیزر بیشترین تأثیر را بر استحکام اتصال بین لایه‌ها داشته و فشار مستحکم شدن نیز قابل صرف نظر کردن بوده است. همچنین مشخص شد که سرعت پیچش رابطه‌ی غیرخطی با متغیر پاسخ (استحکام اتصال بین لایه‌ای) دارد.

کوهن⁶ و همکاران [4] با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل جزئی⁷ به بررسی اثر متغیرهای فرایند پیچش تر بر کیفیت، استحکام و سفتی مخازن کامپوزیتی تحت فشار پرداخته‌اند.

لوسی⁸ و همکاران [5] در پژوهشی با استفاده از رویکرد طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی، به بررسی اثر پارامترهای ساخت که در چهار گروه الیاف، رزین، فرآیند و طراحی دسته‌بندی شده‌اند، بر آغشته‌سازی دسته الیاف و کیفیت نهایی لوله‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. 19 متغیر قابل کنترل و 10 متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است که سه متغیر پاسخ کسر حجمی الیاف، حفره‌ها و استحکام برشی بین لایه‌ای از بقیه‌ی مهم‌تر هستند. استحکام برشی بین لایه‌ای شاخصی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند بین زمینه و الیاف است. سه عامل شامل تنظیم‌کننده‌ی میزان رزین⁹، دمای حمام رزین و مقدار

7 Fractional Factorial

8 Lossie

9 Doctor Blade Gap

10 Dobrzanski

11 Gunasegaran

12 Kopecki

1 Void

2 Totaro and De Nicola

3 Mazumdar and Hoa

4 Polyether ether ketone

5 Consolidation

6 Cohen

جدول 1 مشخصات الیاف و رزین

Table 1 Specifications of fibers and resins

مشخصه	سازنده	پارامتر
Araldite LY556 (100)	Huntsman	رزین
Aradur HY917 (90)	Huntsman	هاردنر
DY070 (1)	Huntsman	شتاب‌دهنده
Carbon Fabric T300 50K	Interglas	الیاف کربن
S Glass tex 2400	Silenka	الیاف شیشه
Aramid 805 tex	Twaron	الیاف آرامید

جدول 2 خواص مکانیکی الیاف و رزین

Table 2 Mechanical properties of fibers and resin

مواد	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام کششی (MPa)
آرامید	1400	99	2930
شیشه	2400	52	1204
کربن	1700	230	3500
اپوکسی	1100	3.1	83

2-1-2- مدل سازی قالب سازه

ابتدا سازه استوانه‌ای با ارتفاع و قطر مورد نظر طراحی شده است. سپس پارامترهای هندسی شبکه شامل زاویه‌ی ریب‌های مارپیچ، تعداد جفت ریب‌های مارپیچ، تعداد ریب‌های محیطی، فواصل بین ریب‌ها و عرض و ارتفاع ریب‌ها محاسبه شده‌اند. در نهایت، مدل سازی قالب نری سازه انجام شده است. در جدول 3 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه آورده شده است.

جدول 3 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه

Table 3 Structural dimensions and geometric parameters of the grid

H	b _c	b _n	a _c	a _n	φ	D	L
4mm	5mm	5mm	60mm	52.78mm	26°	280mm	300mm

برای مدل سازی از نرم‌افزار طراحی - مهندسی کتیا⁶ استفاده شده است. در محیط پارت دیزاین⁷ (مدل سازی احجام توپر⁸) و محیط جنریتوو شیپ دیزاین⁹ (مدل سازی سطوح¹⁰) سازه به دو صورت سه بعدی و گسترش یافته مدل شده‌اند. در این حالت مدل سازی فقط در محیط پارت دیزاین انجام شده است.

برای ساخت قالب نری، از ورق پلکسی گلس⁹ استفاده شده است که با دستگاه برش لیزری، طرح شبکه‌ی مذکور در آن ایجاد شده است. برای این کار، فرمت فایل نقشه کتیا به فرمت نرم‌افزار کرل دراو¹⁰ تبدیل شده است تا برای دستگاه برش قابل خواندن باشد. در شکل 1، نمایی از ورق پلکسی گلس در حال برش نشان داده شده است.

کمانش استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری پرداخته شده است.

در این پژوهش، هدف بر این است تا با روش طراحی آزمایش‌ها که یکی از ابزارهای کنترل کیفیت است، عوامل مهم ساخت که بر استحکام کمانشی سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی تأثیرگذار هستند، شناسایی شوند. همچنین با تحلیل آماری، شدت تأثیر آن‌ها مشخص و مقادیر بهینه تعیین شوند. در واقع دستاورد این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند ساخت برای بالا بردن ظرفیت باربری این نوع از سازه‌های کامپوزیتی است.

2- روش پژوهش

روش تحقیق در این پژوهش، روش طراحی آزمایش‌ها و طراحی و ساخت سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی است. ابتدا اصول تحلیل آماری روش طراحی آزمایش‌ها تبیین شده است. در بخش بعدی، مراحل ساخت سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی شامل مدل سازی و تهیه نقشه ساخت برای قالب، نحوه‌ی رشته پیچی و پخت سازه تشریح شده است. در بخش آخر تحلیل فاکتورهای ساخت در نظر گرفته شده در این پژوهش بررسی شده است.

2-1- طراحی و ساخت سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی

معمولاً سازه‌های مشبک، شکلی به صورت پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی دارند که شامل ریب‌های مارپیچ و محیطی هستند. چنین سیستمی از ریب‌ها باعث ایجاد مقاومت بالای سازه‌های مشبک در برابر کمانش تحت بار محوری فشاری می‌شود. مقادیر بار کمانش تجربی برای اکثر پوسته‌های استوانه‌ای معمولاً خیلی کمتر از مقادیر تئوری هستند. دلیل آن نیز وجود عیوب شکلی¹ پوسته است که اندازه‌گیری و کنترل آن‌ها مشکل است [11]. در مقابل پوسته‌های تقویت شده، سازه‌های مشبک پایداری شکلی² (خود پایداری) تحت بارگذاری از خود نشان می‌دهند. فشار محوری ریب‌های مارپیچ سبب ایجاد کشش در ریب‌های محیطی می‌شود و سطح مقطع پوسته حتی اگر دارای عیوب اولیه باشد، دایروی باقی می‌ماند، بنابراین بار کمانش تجربی نزدیک به نتایج تئوری می‌شود و نیازی به ضرایب کاهش دهنده³ (تصحیح کننده) برای استفاده در طراحی و تحلیل سازه‌های مشبک نیست [11].

مراحل ساخت سازه‌ی مورد نظر بدین ترتیب است که ابتدا طرح دوبعدی سازه مشبک از برنامه استخراج شده و به کمک دستگاه برش لیزر یک قالب نری از جنس پلکسی گلس ساخته شد، سپس به وسیله قالب نری قالب سیلیکونی ساخته شده است. قالب سیلیکونی بر روی مندرل استوانه‌ای نصب گردیده و با استفاده از دستگاه رشته پیچی تمام خودکار، الیاف درون شیارهای قالب سیلیکونی رشته پیچی شده تا سازه مشبک شکل بگیرد.

2-1-1- مواد و ترکیبات

برای ساخت استوانه مشبک از سه نوع الیاف شیشه، کربن و آرامید استفاده شده است. رزین مورد استفاده معادل رزین اپوکسی و سخت کننده و شتاب‌دهنده می‌باشد و به نسبت 100، 90، 1 طبق دستور سازنده مخلوط شده‌اند. در جدول 1 نوع الیاف و رزین به کار رفته ارائه شده است. در جدول 2 خواص مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده نشان داده شده است.

⁶ Solid⁷ Generative Shape Design⁸ Surface⁹ Plaxiglass¹⁰ Corel Draw¹ Shape Imperfections² Stiffened Shell³ Knock-Down⁴ CATIA⁵ Part Design

پخت) استفاده گردید. بعد از رشته‌پیچی استوانه‌ی مشبک کامپوزیتی روی مندرل فومی، برای پخت، سازه درون اتوکلاو قرار گرفته است. در شکل 4 نمایی از اتوکلاو نشان داده شده است. برای پخت سازه در اتوکلاو یک مکانیزم چرخان (برای جلوگیری از شره کردن رزین در حین پخت به دلیل کاهش میزان گرانشی) طراحی و ساخته شد، بدین ترتیب کل سیستم در حین پخت دوران می‌کند تا از تجمع رزین در قسمت پایینی سازه و کم رزین شدن بخش‌های بالایی تا حد ممکن جلوگیری شود. در شکل 5 سازه پخت شده از جنس شیشه-اپوکسی به همراه قالب سیلیکونی نشان داده شده است. در شکل 6 سه نوع سازه درون قالب سیلیکونی ارائه گردید. در شکل 7 تصاویر نمونه‌های ساخته شده آمده است.



Fig. 4 View of the mandrel on the rotating system and ready to cure
شکل 4 نمایی از نحوه‌ی قرارگیری مندرل روی چهارپایه‌ها و آماده شدن برای پخت



Fig. 5 Composite lattice cylinder (glass-epoxy) wound into a silicone mold on a foam mandrel after curing and before separation from the mold

شکل 5 استوانه مشبک کامپوزیتی (شیشه- اپوکسی) رشته‌پیچی شده درون قالب سیلیکونی روی مندرل فومی بعد از پخت و قبل از جدایش از قالب



شکل 6 سازه درون قالب سیلیکونی (الف) کربن- اپوکسی، (ب) آرامید- اپوکسی و (ج) شیشه- اپوکسی

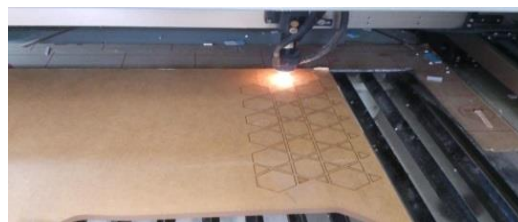


Fig. 1 Cutting process of Plexiglass by laser

شکل 1 ورق پلکسی‌گلس در حال برش با لیزر

بعد از ساخت قالب نری به روش ذکر شده، از لاستیک سیلیکون قالب‌گیری برای ساخت قالب مادگی استفاده شده است. در شکل 2، قالب نری که بین چهار جداره‌ی شیشه‌ای برای قالب‌گیری و ریختن سیلیکون محصور شده است، مشاهده می‌شود. همچنین برای جدایش راحت‌تر سیلیکون از قالب پلکسی‌گلس، یک لایه تفلون نفوذ ناپذیر در زیر آن قرار گرفته است.



Fig. 2 Male mold placed on a layer of Teflon surrounded by four glass walls

شکل 2 قالب نری واقع بر یک لایه تفلون که پیرامون آن با چهار جداره‌ی شیشه‌ای محصور شده است

3-1-2- نوشتن کد پیچش

برای رشته‌پیچی درون شیارهای قالب ساخته شده، کد پیچش نوشته شده است. این کد براساس قطر استوانه، زاویه‌ی ریب‌های مارپیچ و محل قرارگیری میله‌های نگهدارنده که وظیفه‌ی نگه داشتن باند الیاف در حین رشته‌پیچی را دارند، نوشته می‌شود.

در ادامه برای بررسی صحت و دقت کد نرم‌افزاری نوشته شده جهت رشته‌پیچی درون شیارها، ابتدا با نخ نایلونی چند بار پیچش انجام شده است. در شکل 3، نمایی از نحوه‌ی قرار گرفتن نخ اشاره شده درون شیارها نشان داده شده است.



Fig. 3 Twist with nylon yarn to test the twist code

شکل 3 پیچش با نخ نایلونی برای امتحان کردن کد پیچش

4-1-2- پخت سازه‌ها

شرایط پخت (دما و زمان) اصولاً طبق دستورالعمل شرکت سازنده‌ی رزین در نظر گرفته می‌شود، اما در دستورالعمل نیز محدوده‌ای پیشنهاد می‌شود که مبنای انتخاب هر محدوده برحسب ابعاد و ضخامت قطعه‌ی کامپوزیتی تعیین می‌شود. در این پژوهش دمای پخت در محدوده پیشنهاد شده شرکت سازنده انتخاب شده است. برای بالا بردن سرعت فرآیند پخت نهایی و یا برای اطمینان از تکمیل پیوندهای عرضی، از یک دمای پخت بالاتر از دمای پخت اولیه (پس

بوده و در هر ثانیه 90 داده را ثبت کرده است. در شکل 9 نمایی از آماده‌سازی دستگاه برای انجام آزمون نشان داده شده است.

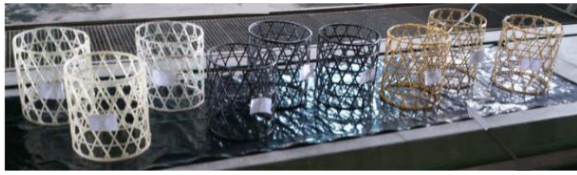


Fig. 7 Fabricated samples according to the experiments design table

شکل 7 نمونه ساخته شده طبق جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

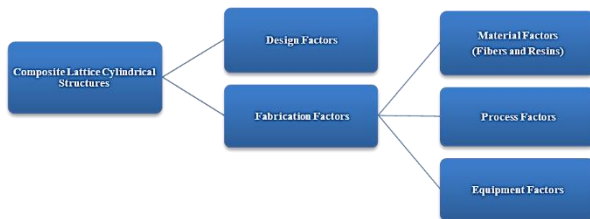


Fig. 8 Classification of factors in composite grid-stiffened cylinders

شکل 8 دسته‌بندی فاکتورها در سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی

جدول 4 جدول فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

Table 4 Table of factors under consideration and their levels

فاکتور	سطح 1	سطح 2	سطح 3
کشش الیاف	10 N	15 N	20 N
سرعت پیچش	2 rpm	4 rpm	6 rpm
شرایط پخت	4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C	4 hr @ 80 C + 3 hr @ 140 C	4 hr @ 80 C + 2 hr @ 160 C
نوع الیاف	آرامید	شیشه	کربن

جدول 5 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرایه‌ی متعامد³ L9)

Table 5 Experiments design table (orthogonal array L9)

شماره‌ی آزمایش	کشش الیاف	سرعت پیچش	شرایط پخت	نوع الیاف
1	(10N)**1	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	1 (آرامید)
2	(10N)1	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	2 (شیشه)
3	(10N)1	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	3 (کربن)
4	(15N)2	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	3 (کربن)
5	(15N)2	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	1 (آرامید)
6	(15N)2	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	2 (شیشه)
7	(20N)3	(2rpm)1	4 hr @ 80 ⁰ C + 2 hr @ 160 ⁰ C	2 (شیشه)
8	(20N)3	(4rpm)2	4 hr @ 80 ⁰ C + 4 hr @ 120 ⁰ C	3 (کربن)
9	(20N)3	(6rpm)3	4 hr @ 80 ⁰ C + 3 hr @ 140 ⁰ C	1 (آرامید)

* شماره سطح فاکتور
** مقدار کمی سطح فاکتور

2-1-5- دسته‌بندی فاکتورها

هدف عمده در فرآیند ساخت، فراهم کردن کیفیت و خواص مکانیکی مناسب ریب‌های مارپیچ است که به‌عنوان اجزای اصلی در باربری سازه‌ی مشبک استوانه‌ای عمل می‌کنند. خواص مکانیکی نیز به‌شدت از روش ساخت و فاکتورهای مرتبط با آن تأثیر می‌پذیرند و بررسی و کنترل آن‌ها برای تولید سازه‌ای با کیفیت بالا و کمترین عیوب، ضروری است. در ادامه به دسته‌بندی فاکتورهای طراحی و ساخت سازه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی پرداخته شده است (شکل 8).

2-1-6- انتخاب فاکتورها

در فرآیند ساخت، تعدادی از فاکتورها هستند که توسط اپراتور قابل انتخاب، پایش و کنترل هستند که به آن‌ها فاکتورهای اولیه گفته می‌شود. در مقابل تعدادی از فاکتورها هستند که به‌طور مستقیم توسط اپراتور قابل کنترل نیستند و به آن‌ها فاکتورهای ثانویه گفته می‌شود. برای مثال، نسبت اختلاط سیستم رزین و دمای حمام رزین بر گرانیوی رزین مؤثر هستند. گرانیوی و عمر مفید¹ دو فاکتور اصلی در انتخاب رزین برای فرآیند پیچش به شمار می‌روند. اگر مقدار گرانیوی رزین بسیار پایین باشد، باید کشش زیاد در پیچش اعمال کرد تا کسر حجمی الیاف بالا رود و اگر گرانیوی بسیار بالا باشد، قطعه پخت شده دارای حفره زیادی خواهد بود [12]. هم‌چنین، کشش الیاف و نحوه‌ی آغشته‌سازی (نوع حمام رزین) بر ضخامت لایه‌ها و عرض باند الیاف تأثیر می‌گذارند. اثرات متقابل فاکتورهای ساخت، به‌خصوص در پیچش تر، مهم و پیچیده هستند. اثر فاکتورهای مذکور را می‌توان بر خواص فیزیکی مانند کسر حجمی الیاف و رزین، میزان حفره، وزن سازه، استحکام و سفتی بررسی کرد و با بهینه کردن شرایط فاکتورها، این خواص را بهبود داد.

با توجه به توضیحات ذکر شده و هزینه و امکانات موجود، چهار فاکتور در سه سطح برای بررسی و بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و هر کدام به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند. در جدول 4 فاکتورها و سطوح آن‌ها ذکر شده‌اند. شرایط ساخت هر سازه که طبق روش تاگوچی طراحی شده، در جدول 5 آورده شده است.

در انتها باید ذکر کرد که به‌خاطر وزن دوک الیاف شیشه که موجب ایجاد کشش 8 نیوتونی می‌شد و الیاف کربن که در 27 نیوتون رسته‌رشته می‌شد، محدودی 10 تا 20 نیوتون برای کشش الیاف در نظر گرفته شده است. برای فاکتور سرعت پیچش نیز حداقل سرعت دستگاه 2rpm، و حداکثر سرعتی که باند الیاف با دقت و به‌طور صحیح داخل شیارهای قالب قرار می‌گرفتند 6rpm بوده است. برای فاکتور شرایط پخت، با توجه به ضخامت و ابعاد سازه، حداقل زمان برای دماهای پیشنهادی در دستورالعمل پخت رزین در نظر گرفته شد.

3- نتایج و بررسی

3-1- شرح نحوه‌ی انجام آزمون کمانش تحت بار محوری فشاری

همانند سازه‌های کامپوزیتی سنتی، تخمین ظرفیت باربری و فرآیند واماندگی یک امر حیاتی در طراحی و به‌کارگیری سازه‌های مشبک است. در این پروژه برای انجام تمامی آزمون‌ها از دستگاه آزمون سننتم² به کد STM-150 با ظرفیت 15 تن استفاده شده است. سازه‌ها بین دو صفحه‌ی صلب فلزی (به ابعاد 50 در 50 سانتی‌متر و ضخامت 2 سانتی‌متر) قرار داده شده‌اند و بار محوری فشاری توسط فک هیدرولیکی در جهت قائم، اعمال شده است. آزمون‌ها در دمای محیط و با نرخ بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر دقیقه (به دلیل شبه استاتیکی بودن آزمون) انجام شده‌اند. داده‌بردار دستگاه از نوع الکترونیکی

¹ Pot Life
² SANTAM

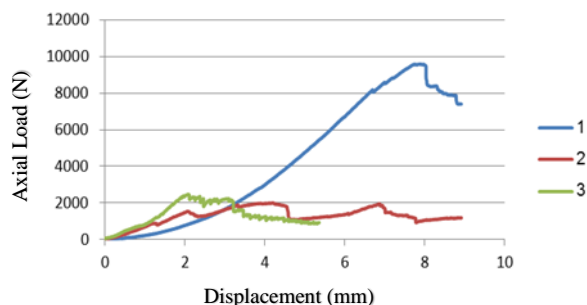
³ Orthogonal array

است. در این نمونه، سرعت پیچش دارای بالاترین سطح و کشش الیاف در سطح متوسط بوده است. سرعت زیاد پیچش، فرصت آغشته‌سازی کافی را به الیاف نداده است. همچنین، قرارگیری نامطلوب الیاف روی لایه‌های قبلی، باعث کاهش کیفیت کامپوزیت شده است. اگر الیاف به‌طور مناسب به رزین آغشته نشوند، انتقال بار برشی به‌طور کامل بین الیاف و رزین انجام نمی‌شود. همچنین، امکان شکل‌گیری ترک‌ها بین رزین و الیاف بالا می‌رود. توزیع غیریکنواخت الیاف در رزین بر خواصی همچون استحکام و سفتی بسیار تأثیرگذار است [1].



شکل 9 نمای کلی از دستگاه آزمون و آماده‌سازی شرایط آزمون

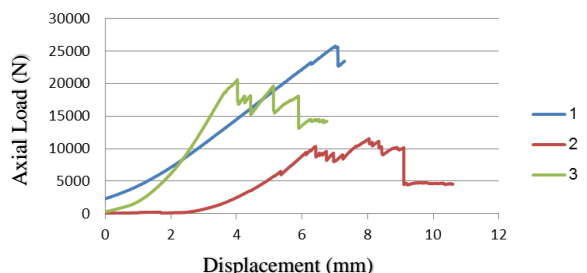
Aramid-Epoxy Structures Comparison



شکل 10 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی آرامید-اپوکسی

شکل 10 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی آرامید-اپوکسی

Glass-Epoxy Structures Comparison



شکل 11 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی شیشه-اپوکسی

شکل 11 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی شیشه-اپوکسی

در تحقیقات پیشین نیز اشاره شده است که افزایش سرعت پیچش، میزان حفره‌ها را افزایش می‌دهد که این مورد سبب کاهش استحکام کامپوزیت و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری سازه می‌شود [4, 6, 15]. حداکثر سرعت پیچش مجاز که برای هر نوع سازه متفاوت است، در استحکام کامپوزیت نقش عمده‌ای دارد. نمونه شماره 1 و 3 شکل 11 دارای بیشترین باربری نسبت به نمونه شماره 2 می‌باشند. نمونه شماره 1 نشان می‌دهد که اعمال سرعت پیچش متوسط به همراه پایین‌ترین سطح کشش موجب افزایش باربری سازه می‌شود. در نمونه شماره 3 با وجود اعمال کمترین سرعت پیچش که آغشته‌سازی مناسب الیاف را به همراه دارد اما به دلیل چقرمگی متوسط الیاف شیشه، اعمال حداکثر کشش موجب کم‌رزین شدن بین لایه‌های الیاف شده و بار نهایی کمتری نسبت به نمونه شماره 1 متحمل شده است. یکی دیگر از دلایل باربری بیشتر نمونه شماره 1 نسبت به نمونه شماره

شکل 9 نمای کلی از دستگاه آزمون و آماده‌سازی شرایط آزمون

باید به این نکته اشاره کرد که قبل از انجام آزمون باید تراز بودن صفحات فلزی چک شود. در این پروژه، این شاخص با ابزار تراز سنجیده شده است. همچنین، تراز دو سطح بالا و پایین سازه و عدم بیضی‌گون شدن استوانه نیز باید چک شوند. بعد از برش دو سطح بالا و پایین سازه، هر دو سطح با ابزار تراز چک شده‌اند و همچنین قطر داخلی استوانه نیز با ابزار کولیس اندازه‌گیری شده‌اند. موارد ذکر شده بر انتقال یکنواخت بار بر سازه‌ها و در نتیجه نتایج آزمون‌ها می‌توانند تأثیرگذار باشند.

2-3- مقایسه‌ی نتایج آزمون‌ها

در این بخش، نمودارهای بار-جابجایی نمونه‌های هم‌جنس به‌صورت یکجا، نمودار مقایسه‌ی درصد تغییر طول نسبی سازه‌ها در حداکثر بار و نمودار مقایسه‌ی جرم آن‌ها آورده شده است. در شکل 10 به مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی آرامید-اپوکسی پرداخته شده است.

همان‌طور که از شکل 10 قابل مشاهده است، باربری سازه‌ها در نمونه‌های دوم و سوم آرامید-اپوکسی (شماره پنج و نه جدول 3) به‌شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل آن به دو فاکتور فرآیندی سرعت پیچش الیاف و دمای پخت برمی‌گردد، با افزایش سرعت پیچش، میزان آغشته‌سازی الیاف به رزین کاهش داشته است. در محل‌هایی که الیاف به‌طور مناسب آغشته نمی‌شوند، ترک‌ها ظاهر می‌شوند و رشد می‌نمایند و واصلندگی زودرس اتفاق می‌افتد. روند کاهش میزان آغشته‌سازی موجب بالا رفتن بیش از حد کسر حجمی الیاف و متقابلاً پایین آمدن کسر حجمی رزین شده است که ظرفیت انتقال بار از زمینه به تقویت‌کننده را دچار کاهش می‌کند. زمینه، انتقال بار را از طریق استحکام برشی بین لایه‌های فراهم می‌کند [13]. استحکام برشی بین لایه‌ای، شاخصی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند بین رزین و الیاف است. چسبیدن آرامیدها به زمینه، به خوبی چسبیدن الیاف کربن یا شیشه به زمینه نیست. بنابراین، مقادیر استحکام برشی بین لایه‌های آرامیدها کمتر است [14]. این مقادیر کم تا حدودی از مقاومت برشی نسبتاً کم خود الیاف نیز ناشی می‌شود [14]. همچنین، پخت در حرارت‌های بالاتر موجب ایجاد ریز ترک‌هایی در کامپوزیت می‌شود که این رخداد نیز میزان استحکام را کاهش داده است (هر دو نمونه تحت دمای پخت بالاتری نیز قرار گرفته‌اند) [13]. در نمونه شماره یک آرامید به دلیل استفاده از حداقل سرعت پیچش که آغشته‌سازی بهتر الیاف به رزین را به همراه دارد و همچنین دمای پخت کمتر که موجب ایجاد ترک‌های کمتر در زمان پخت، در سازه شده است، توانسته نیروی بیشتری را نسبت به دو نمونه دیگر متحمل شود. در شکل 11 نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی شیشه-اپوکسی آورده شده است.

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های شیشه-اپوکسی، نمونه‌ی دوم (شماره‌ی شش جدول 3) دارای کمترین بار تحمل شده

¹ Ovality

بیشتری هستند. بخشی از این نتایج به چگالی الیاف (ترتیب چگالی: آرامید، کربن و شیشه از کم به زیاد [12]) برمی‌گردد و بخشی از آن به فاکتورهای فرآیندی کشش الیاف و سرعت پیچش مربوط می‌شود. لازم به ذکر است که فاکتورهای فرآیندی کشش الیاف و سرعت پیچش، میزان آغشته‌سازی الیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهند که تأثیر مستقیم بر روی کسر حجمی الیاف نسبت به رزین در سازه دارد.

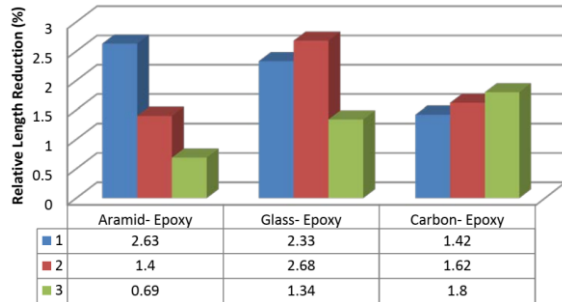


Fig. 13 Comparison diagram of the percentage reduction of relative length at maximum bearing load

شکل 13 نمودار مقایسه‌ی درصد کاهش طول نسبی در حداکثر بار تحمل شده

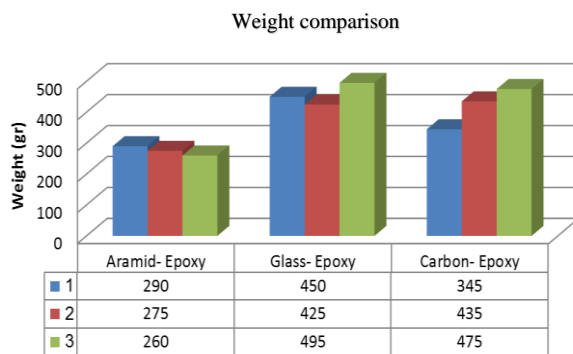


Fig. 14 Sample weight comparison chart

شکل 14 نمودار مقایسه‌ی جرم نمونه‌ها

در شکل 15 حداکثر بار تحمل شده توسط هر سازه مد نظر قرار گرفته است. همچنین در این شکل، درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده برای نمونه‌های هم‌جنس ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده برای هر نوع الیاف قرار گرفته‌اند.

برای محاسبه بار ویژه عموماً از تقسیم حداکثر بار بر چگالی سازه به دست می‌آید اما در این پژوهش به دلیل ثابت بودن حجم تمامی سازه‌ها، بار ویژه از تقسیم حداکثر بار اعمالی بر جرم سازه محاسبه شده است. در شکل 16 حداکثر بار تحمل شده ویژه مد نظر قرار گرفته است. همچنین در این شکل، درصد اختلاف بار تحمل شده ویژه توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده ویژه برای نمونه‌های هم‌جنس ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده برای هر نوع الیاف قرار گرفته‌اند.

از دو شکل 15 و 16 قابل مشاهده است که درصد اختلاف بار تحمل شده و بار تحمل شده ویژه، هر دو در نمونه‌های آرامید-اپوکسی در مقایسه با نمونه‌های شیشه-اپوکسی و کربن-اپوکسی (در این نمونه‌ها درصد اختلاف نسبتاً کمتر است) بسیار بیشتر است. این درصد اختلاف، تأثیر زیاد و مهم

3، کمتر بودن دمای پخت می‌باشد اما در ادامه نتیجه می‌شود که تأثیر دمای پخت بر روی استحکام سازه، بسیار کمتر از دو پارامتر کشش و سرعت پیچش الیاف، می‌باشد. شکل 12، نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی کربن-اپوکسی آورده شده است.

Carbon-Epoxy Structures Comparison

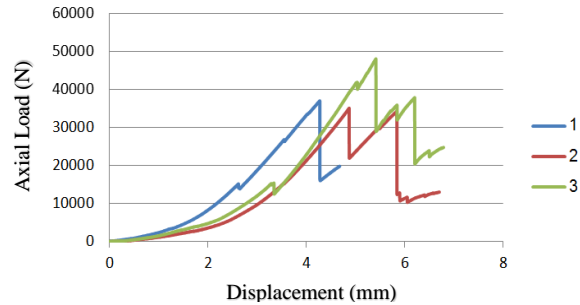


Fig. 12 Comparison of load - displacement diagrams of three carbon-epoxy structures

شکل 12 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی سه سازه‌ی کربن-اپوکسی

نمونه‌های کربن-اپوکسی از نظر باربری در مقایسه با نمونه‌های شیشه-اپوکسی و آرامید-اپوکسی رفتار مشابه‌تری به هم دارند. نمونه‌ی سوم کربن-اپوکسی (شماره‌ی هشت جدول 3) که بار بیشتری را تحمل کرده است، در کمترین دما پخت شده است. این امر تنش‌های پس‌مانند کمتر در حین عمل‌آوری و در نتیجه ریزترک‌های کمتری را موجب شده است (از صداهای کمتری که در هنگام شکست ریزترک‌ها در حین آزمون شنیده شده است می‌توان به این وضعیت پی برد) که استحکام و باربری سازه را دچار کمترین کاهش کرده است. همچنین، در سازه‌هایی که با الیاف کربن تقویت شده‌اند، بهترین عملکرد تحت شرایط، کشش الیاف بیشتر و سرعت پیچش متوسط رخ داده که موجب افزایش تحمل بار سازه گردیدند. در الیاف کربن به علت ترد بودن الیاف، کشش الیاف بیشتر سازه‌ی یکپارچه‌تر و با حفره‌های کمتر تولید می‌شود.

در شکل 13، نمودار مقایسه‌ی بین درصد تغییر طول نسبی در حداکثر بار تحمل شده توسط سازه، به تفکیک نوع الیاف آورده شده است. دلیل اختلاف تغییر طول نسبی در سازه‌ها با الیاف تقویت‌کننده یکسان به اختلاف کسر حجمی الیاف و نوع پخت سازه برمی‌گردد و برای سازه‌ها با الیاف تقویت‌کننده متفاوت به استحکام متفاوت الیاف و ترد و چقرمه بودن الیاف برمی‌گردد (ترد بودن الیاف، ریب‌هایی یکپارچه‌تر و با حفره‌های کمتر را به همراه دارد). اختلاف شدید درصد تغییر طول نسبی نمونه شماره 1 با نمونه شماره 3 به دلیل کاهش شدید استحکام نمونه شماره 3 در فرآیند ساخت می‌باشد که موجب فروپاشی سازه در جابه‌جایی کم شده است. در سازه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل بالا بودن مدول الاستیک سازه، شیب نمودار نیرو-جابجایی بیشتر از سازه‌های تقویت‌شده با الیاف دیگر بوده است، این نشان از تحمل باربری بیشتر این سازه‌ها در تغییر طول اندک، هنگام بارگذاری می‌باشد.

همان‌طور که از شکل 13 قابل مشاهده است، نمونه‌های کربن-اپوکسی و آرامید-اپوکسی نسبت به نمونه‌های شیشه-اپوکسی درصد کاهش طول نسبی کمتری داشته‌اند. در شکل 14، نمودار مقایسه‌ی جرم تمام نمونه‌ها به تفکیک نوع الیاف آورده شده است. از داده‌های به دست آمده مشهود است که سازه‌های آرامید-اپوکسی دارای جرم کمتر و سازه‌های شیشه-اپوکسی دارای جرم

2- ناهم‌وزنی ایجاد شده در سطوح بالا و پایین استوانه‌ها در اثر برش و یا ناهم‌تراز بودن صفحات فلزی که تعامد سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در نتیجه انتقال یکنواخت بار به سازه را در حین آزمون دچار اختلال می‌کنند.
3- به‌کارگیری انواع مختلف الیاف (علت محتمل می‌تواند ترد بودن الیاف کربن نسبت به شیشه و آرامید باشد که موجب می‌شود، الیاف به‌خوبی روی هم قرار گرفته و سازه‌ای همگن و یکپارچه تولید شود. همچنین چقرمه بودن و جذب رزین کمتر الیاف آرامید، موجب افزایش کسر حجمی الیاف شده که این امر کم رزین شدن الیاف و اتصال ناقص لایه‌ها را به همراه دارد).

جدول 6: مقایسه حالت‌های واماندگی در سطوح مختلف فاکتورها

Table 6: Comparison of failure modes at different levels of factors

حالت واماندگی				
حالت 4	حالت 3	حالت 2	حالت 1	
شکست	کمانش	تورق یا جدایش	شکست کششی	فاکتور ساخت
برشی ریب	ریب‌های مارپیچ محدود به گره‌های مجاور	بین لایه‌ای	عرضی	
کشش الیاف:				
--	1	2-3	--	1
4	--	4-5	6°	2
8	--	7-8-9	--	3
سرعت پیچش:				
8	1	8	6	1
4	--	4-2-9	--	2
--	--	3-7-5	--	3
شرایط پخت:				
8	1	8	6	1
4	--	4-2-9	--	2
--	--	3-7-5	--	3
نوع الیاف:				
--	1	5-9	--	1
--	--	2-7	6	2
4-8	--	3-4-8	--	3

3-3- تحلیل آماری نتایج و بهینه‌سازی ساخت

هدف از این پژوهش تجربی- آماری، تعیین اثر فاکتورهای ساخت بر عملکرد سازه‌ای و مشخص کردن بهترین شرایط ساخت برای این نوع از ساختارهای کامپوزیتی می‌باشد. برای این کار، از روش طراحی آزمایش‌های تاگوجی و نرم‌افزار کوالی‌تک¹ استفاده شده است. در این پروژه، چهار فاکتور در سه سطح به‌صورت مجزا تحت کنترل و بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل‌ها برای دو متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه (نسبت حداکثر بار تحمل شده به جرم سازه) و کارایی فشاری سازه (حداکثر بار تحمل شده به بار فشاری قابل تحمل هر ریب) انجام شده‌اند و در نهایت بهینه‌سازی براساس کارایی فشاری سازه صورت گرفته است.

3-3-1- تحلیل آماری

در جدول 7، طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرلیه‌ی متعامد L9 تاگوجی) که سازه‌ها طبق آن ساخته و آزموده شده‌اند آورده شده است. در روش تاگوجی، برای چهار فاکتور در سه سطح، از تعداد کل 81 آزمایش ممکن، 9 آزمایش پیشنهاد می‌شود. باید متذکر شد که به دلیل منابع مالی محدود، برای هر حالت، یک نمونه ساخته و آزموده شده است. به همین دلیل تحلیل آماری داده‌ها با آنالیز استاندارد انجام شده است.

پارامترهای فرآیندی شامل کشش الیاف، سرعت پیچش و شرایط پخت بر باربری سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی، به‌خصوص سازه‌های آرامید-اپوکسی را نشان می‌دهد.

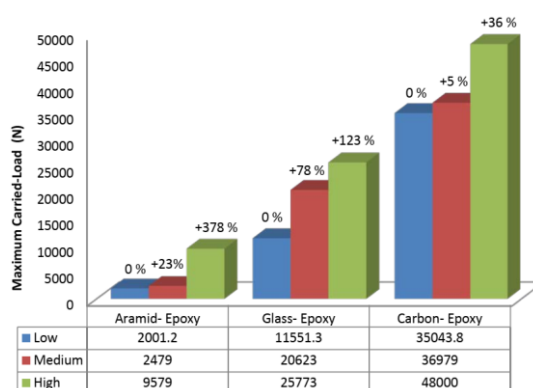


Fig. 15 Graph of the percentage difference of load bearing by structures compared to the minimum load bearing

شکل 15 نمودار درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده

Specific maximum carried-load comparison

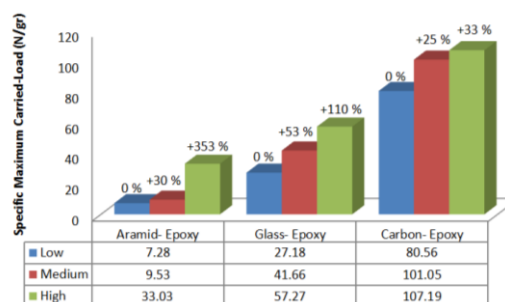


Fig. 16 Graph of the percentage difference of load bearing by structures compared to the minimum load bearing

شکل 16 نمودار درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده

در جدول 6، حالت‌های رخ داده در سطوح مختلف فاکتورها بر مبنای حالت‌های واماندگی طبقه‌بندی شده، دسته‌بندی شده‌اند. حالت واماندگی غالب در استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری، تورق بوده است. در ضمن باید اشاره کرد، اکثر واماندگی‌ها در حلقه‌های بالایی نزدیک محل اعمال بار رخ داده‌اند؛ زیرا در این نواحی، توزیع تنش یکنواخت نیست و تمرکز تنش به‌وجود می‌آید. حالت شکست کششی عرضی فقط در نمونه شش (شیشه-اپوکسی)، کمانش ریب‌های مارپیچ محدود به گره‌های مجاور فقط در نمونه یک (آرامید-اپوکسی) و شکست برشی ریب فقط در نمونه‌های چهار و هشت (کربن-اپوکسی) رخ داده است.

دلایل تغییر محل رخ دادن واماندگی و ایجاد حالت‌های مختلف واماندگی در استوانه‌ها می‌توانند موارد زیر باشند:

- 1- عدم تقارن ایجاد شده در سازه در حین ساخت (چرخش نامناسب سازه در حین پخت در اتوکلاو که موجب کم رزین یا پر رزین شدن برخی نواحی در سازه می‌شود یا کشش زیاد الیاف که موجب قرارگیری نامناسب باند الیاف بر لایه‌های قبلی می‌شود).

جدول 7 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

Table 7 Experiments design table

شماره‌ی آزمایش	کشش الیاف	سرعت پیچش	شرایط پخت	نوع الیاف	پاسخ (حداکثر بار تحمل شده ویژه)	پاسخ (کارایی فشاری)
1	1	1	1	1	33.03	1.73
2	1	2	2	2	57.27	3.11
3	1	3	3	3	107.19	1.91
4	2	1	2	3	80.56	1.81
5	2	2	3	1	7.28	0.36
6	2	3	1	2	27.18	1.39
7	3	1	3	2	41.66	2.49
8	3	2	1	3	101.05	2.48
9	3	3	2	1	9.53	0.44

جدول 8 استحکام فشاری مواد کامپوزیتی

Table 8 Compressive strength of composite materials

کامپوزیت	آرامید-اپوکسی	شیشه-اپوکسی	کربن-اپوکسی
استحکام فشاری	276 MPa	414 MPa	965 MPa

الف- تحلیل برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

در مرحله‌ی مقدماتی تحلیل، اثرات اصلی فاکتورها مشخص شده است و نمودار آن‌ها رسم شده است. در شکل 17، نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه آمده است.

در شکل 17 محور افقی، سطوح فاکتورها را نشان می‌دهد و محور عمودی، مقدار میانگین اثر اصلی فاکتورها را نشان می‌دهد. در نمودارهایی که شیب خطوط کم است و تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهند (فاکتورهای شرایط پخت و سرعت پیچش)، بیانگر کم اهمیت بودن آن فاکتور است. در تحلیل واریانس که نتایج آن در بخش بعدی آورده می‌شود، این دو فاکتور کم اثر در خطا ادغام می‌شوند.

در تحلیل به روش تاگوچی، پس از انتخاب مشخصه‌ی کیفیت که در این تحلیل «هر چه بزرگ‌تر، بهتر» در نظر گرفته شده است، نتایج تحلیل و تفسیر می‌شوند. بر این مبناء، در نمودارها نقاط بالاتر برای ما مطلوب هستند.

در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس (ANOVA) پرداخته شده است. در جدول 9 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه آورده شده است. در جدول 10 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه بعد از ادغام دو فاکتور کم اثر سرعت پیچش و شرایط پخت آورده شده است.

در جدول 7، هر ردیف نشان دهنده‌ی شرایط ساخت هر سازه می‌باشد. اعداد 1، 2 و 3 به ترتیب نمایانگر سطح پایین، متوسط و بالای فاکتورها می‌باشند و در دو ستون بعدی نتایج متغیرهای پاسخ آمده است. در این پروژه، اثر فاکتورها بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل بررسی شده است. دو متغیر پاسخ در نظر گرفته شده در این پروژه از روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$\eta = \frac{P_{MCL}}{W} \quad (1)$$

این پاسخ (η) که از تقسیم حداکثر بار تحمل شده¹ توسط سازه (P_{MCL}) بر جرم سازه (W) به دست می‌آید، نشان دهنده‌ی حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه² سازه است.

$$P^* = \frac{P_{MCL}}{P_{Rib}} \quad (2)$$

هم‌چنین، این پاسخ (P^*) که از تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط سازه به بار فشاری قابل تحمل هر ریب (P_{Rib}) در سازه به دست می‌آید، نشان دهنده‌ی کارایی فشاری³ سازه است. بار فشاری قابل تحمل در هر ریب از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است:

$$P_{Rib} = S_{Composite} \times A_{Rib} \quad (3)$$

$S_{Composite}$ نشان دهنده‌ی استحکام فشاری کامپوزیت به کار رفته در ریب‌ها (سازه) و A_{Rib} نیز معرف مساحت سطح مقطع ریب است. نتایج آزمون استحکام فشاری مواد کامپوزیتی به کار رفته در ساخت سازه‌ها در جدول 8 آمده است.

جدول 9 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

Table 9 Analysis of variance (ANOVA) table for the response variable of maximum specific load

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1137.13	568.56	1081.39	0	10.17
سرعت پیچش	2	78.53	39.26	78.53	0	0.7
شرایط پخت	2	32.93	16.46	32.93	0	0.3
نوع الیاف	2	9931.88	4965.94	9876.15	0	88.83
خطا	0	0	0	0	0	0
مجموع	8	11180.5				100

³ Compressive Efficiency

¹ Maximum Carried-Load (MCL)

² Specific Maximum Carried-Load (SMCL)

Y_i پاسخ هر آزمایش و r تعداد تکرار می‌باشد.

شکل 18 مقدار نسبت S/N را در پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه را نشان می‌دهد. نسبت S/N با استفاده از معادله (4) به دست آمده است و داده‌ها نشان می‌دهد که این نمودار بر عکس نمودار اثر اصلی پارامترها می‌باشد. نتایج مطالعات نسبت S/N نشان می‌دهد، در نسبت بالاتر اثر پارامتر بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر شرایط بهینه پارامترهای آزمایش طبق این نمودار، کشش الیاف سطح 1، سرعت پیچش سطح 1، سیکل پخت سطح 1 و نوع الیاف کربن می‌باشد.

در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ کارایی فشاری با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت «هر چه بزرگتر، بهتر» پرداخته شده است (جدول 11). در جدول 12 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری بعد از ادغام فاکتور کم اثر شرایط پخت آورده شده است.

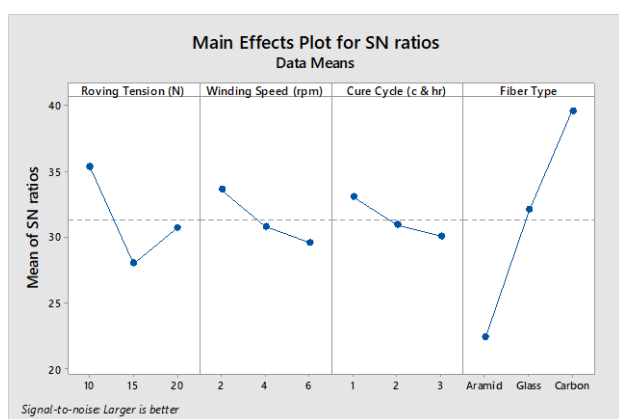


Fig. 18 Diagrams of S/N on the response variable of the specific maximum carried-load

شکل 18 نمودارهای S/N بر متغیر پاسخ حداکثر بار ویژه

در جدول 11 با توجه به محاسبات انجام شده، فاکتور شرایط پخت، به دلیل کوچکتر بودن مجموع مربعات آن از 10٪ بزرگترین مجموع مربعات موجود (مربوط به فاکتور نوع الیاف)، کم اثر تلقی می‌شود و باید ادغام شود. هر سه فاکتور باقی‌مانده در سطح اطمینان 90٪ معنادار هستند. سهم خطا نیز 7.40٪ است که نشان از صحت طراحی آزمایش انجام شده دارد. همچنین، فاکتورهای نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪ به ترتیب مؤثرترین عوامل بر کارایی فشاری سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی هستند (جدول 12).

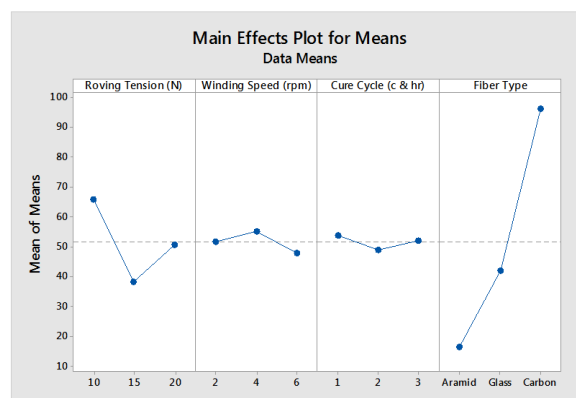


Fig. 17 Diagrams of the main effect of factors on the response variable of the specific maximum carried-load

شکل 17 نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه

همان‌طور که از جدول 9 قابل مشاهده است، دو فاکتور سرعت پیچش و شرایط پخت، به دلیل کم اثر بودن، در جدول 10 ادغام شده‌اند و درجه‌ی آزادی و مجموع مربعات آن‌ها به خطا افزوده شده است. فاکتورهایی که مجموع مربعات آن‌ها از 10٪ بزرگ‌ترین مجموع مربعات موجود کمتر باشد، باید ادغام شوند [6].

هر دو فاکتور کشش الیاف و نوع الیاف، با داشتن ضریب معناداری بزرگتر از ضریب فیشر که از جدول استاندارد فیشر به دست می‌آیند، در سطح اطمینان 95٪ معنادار هستند. خطای طرح آزمایشی نیز 2.78٪ به دست آمده است که صحت فرآیند طراحی آزمایشات انجام شده را نشان می‌دهد. اگر سهم مربوط به خطا در آزمایشی کمتر از 15٪ باشد، طراحی آزمایش انجام شده قابل قبول است [16]. همچنین با توجه به درصد سهم فاکتورها، نوع الیاف با 88.23٪ و سپس کشش الیاف با 9.98٪ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر متغیر پاسخ در نظر گرفته شده (حداکثر بار تحمل شده ویژه)، داشته‌اند.

وقتی آزمایش‌ها، شامل تکرار در هر موقعیت آزمایشی بوده و نتایج به صورت کمی اندازه‌گیری شود، تاگوچی تحلیل نسبت S/N را توصیه می‌کند. ابتدا تابع زبان یا میانگین مربعات انحراف¹ (MSD) محاسبه می‌شود. سپس نسبت S/N از MSD با استفاده از معادله‌ی (4) به دست می‌آید:

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (4)$$

برای حالتی که مشخصه‌ی کیفیت به صورت «هر چه بزرگتر، بهتر» باشد MSD با معادله (5) به دست می‌آید:

$$MSD = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots\right)}{r} \quad (5)$$

جدول 10 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه بعد از ادغام فاکتورهای سرعت پیچش و شرایط پخت

Table 10 Analysis of variance (ANOVA) table for the response variable of maximum specific load by pooled winding speed and cure cycle factors

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1137.13	568.56	1116.73	10.2	9.98
نوع الیاف	2	9931.88	4965.94	9753.68	89.1	88.23
خطا	4	111.47	55.73			2.78
مجموع	8	11180.5				100

¹ Mean Squared Deviation

جدول 11 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری

Table 11 Analysis of variance table (ANOVA) for compressive efficiency response variable

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1.71	0.85	1.71	0	25.38
سرعت پیچش	2	1.13	0.56	1.13	0	16.76
شرایط پخت	2	0.12	0.06	0.12	0	1.78
نوع الیاف	2	3.78	1.81	3.78	0	56.08
خطا	0	0	0	0	0	0
مجموع	8	6.74				100

جدول 12 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ کارایی فشاری با ادغام فاکتور شرایط پخت

Table 12 Analysis of variance table (ANOVA) for compressive efficiency response variable by pooled cure cycle factor

فاکتورها	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم
	f	S	V	S'	F	P (%)
کشش الیاف	2	1.71	0.85	1.58	13.70	23.54
سرعت پیچش	2	1.13	0.56	1.00	9.02	14.86
نوع الیاف	2	3.78	1.81	3.65	30.25	54.20
خطا	2	0.12	0.06			7.40
مجموع	8	6.74				100

3-2- بهینه‌سازی و ساخت نمونه بهینه

در نمونه بهینه، واماندگی به صورت تورق و شکست کششی عرضی در ریب‌های مارپیچ قرار گرفته بین تقاطع ریب‌های مارپیچ با یکدیگر در حلقه‌ی اول و دوم مشاهده شده است. همچنین صدای شکست ریزترک‌ها نیز تا قبل از واماندگی نهایی شنیده شده است. سازه پس از باربرداری، به سرعت شکل خود را بازیابی کرد. حداکثر بار تحمل شده ثبت شده (28352 N) برای این نمونه، در محدوده‌ی پیش‌بینی شده‌ی آماری قرار دارد و این نتیجه صحت طرح آزمایشی را نشان می‌دهد. همچنین، جابجایی ثبت شده 5.45 mm است. در جدول 14، حالت واماندگی نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه آورده شده است.

فرآیند بهینه‌سازی برای متغیر پاسخ کارایی فشاری انجام شده است (جدول 13). با توجه به مشخصه‌ی کیفیت در نظر گرفته شده «هر چه بزرگتر، بهتر»، سطوحی از فاکتورها که در آن‌ها متغیر پاسخ بیشینه شده، به عنوان سطوح بهینه در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به دامنه‌ی اطمینان، جواب بلید در بازه‌ی بین 2.68 تا 3.50 قرار داشته باشد. دامنه اطمینان، تغییرات عملکرد میانگین در شرایط بهینه برای سطح اطمینان در نظر گرفته شده را پیش‌بینی می‌کند. جواب به‌دست آمده از آزمایش (آزمون تأیید)، در بازه‌ی فوق‌الذکر قرار دارد و نشان از صحت محاسبات آماری در مورد بهینه‌سازی فرآیند تحت بررسی دارد. در واقع، صحت‌سنجی طراحی آزمایشات انجام شده، از مقایسه‌ی نتیجه‌ی پیش‌بینی شده با نتیجه‌ی به‌دست آمده از آزمون تجربی صورت می‌گیرد. اختلاف پاسخ حاصل از آزمون تجربی با پاسخ پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی 9.38٪ به‌دست آمده است. در انتها، حالت واماندگی نمونه‌ی بهینه تحت بار محوری فشاری (آزمون کماتش) بررسی می‌شود.

جدول 14 حالت واماندگی نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه

Table 14 Failure mode of the sample fabricated in optimal conditions

فاکتور ساخت	حالت واماندگی			
	حالت 1	حالت 2	حالت 3	حالت 4
شکست ساخت	شکست کششی	تورق یا جدایش	کمانش ریب‌های مارپیچ محدود به برشی ریب	شکست
عرضی	عرضی	بین لایه‌ای	گره‌های مجاور	برشی ریب
کشش الیاف: 10 N	✓	✓	×	×
سرعت پیچش: 2 rpm	✓	✓	×	×
شرایط پخت: 4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C	✓	✓	×	×
نوع الیاف: شیشه	✓	✓	×	×

جدول 13 جدول بهینه‌سازی

Table 13 Optimization table

شرایط بهینه	جواب پیش‌بینی شده	جواب آزمایش	اختلاف
کشش الیاف: 10 N			
سرعت پیچش: 2 rpm			
شرایط پخت: 4 hr @ 80 C + 4 hr @ 120 C	3.09 ± 0.41	3.41	9.38%
نوع الیاف: شیشه			

درصدهای اختلاف مشاهده شده، نشان از تأثیر زیاد فاکتورهای فرآیندی بر کیفیت و باربری سازه‌های کامپوزیتی ساخته شده دارد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل آماری - تجربی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که:

1- در تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب فاکتور نوع الیاف با 88.23٪ و کشش الیاف با 9.98٪ بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه، بیشترین تأثیر را گذاشته‌اند و خطا نیز در این طرح آزمایشی 2٪ بوده است.

2- در تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب فاکتور نوع الیاف با 54.20٪، کشش الیاف با 23.54٪ و سرعت پیچش با 14.86٪ بر متغیر پاسخ کارایی فشاری، بیشترین تأثیر را داشته‌اند و خطا نیز در این طرح آزمایشی 7.40٪ بوده است.

3- نتیجه تجربی حاصل از آزمون برای نمونه‌ی ساخته شده در شرایط بهینه، در محدوده‌ی پیش‌بینی شده‌ی آماری بوده است (اختلاف پیش‌بینی روش تاگوچی و آزمون تجربی 9.38٪ بوده است).

4- بیشترین مد واماندگی مشاهده شده، تورق بوده و بیشترین محل ایجاد واماندگی حلقه‌های بالایی سازه بوده‌اند.

5- واماندگی در استوانه‌های آرامید-اپوکسی به‌صورت تدریجی و نرم بوده است و بازایی شکل آن‌ها پس از باربرداری نیز به‌کندی صورت گرفته است؛ اما در استوانه‌های کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی واماندگی به‌صورت ناگهانی و ترد بوده است و پس از باربرداری، شکل خود را به‌سرعت بازبایی می‌کردند.

6- سازه‌های تقویت شده با الیاف آرامید، دارای کمترین جرم در مقایسه با سازه‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه بوده‌اند. دلیل آن به چگالی کم الیاف و جذب کم رزین توسط این نوع الیاف برمی‌گردد.

7- استفاده از الیاف آرامید در این نوع سازه‌ها، به دلیل استحکام فشاری کم آن‌ها در مقابل بارهای فشاری، اصلاً توصیه نمی‌شود. به عنوان یک پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان از الیاف آرامید به‌صورت هیبریدی، آن هم در ریب‌های محیطی که تحت نیروهای کششی قرار می‌گیرند (پس از انتقال بارهای فشاری ریب‌های ماریپیچ به ریب‌های محیطی، ریب‌های محیطی تحت کشش قرار می‌گیرند که به خودپایداری سازه کمک می‌کند) استفاده نمود.

5- مراجع

- [1] Hoa, S. V., "Principles of making composite materials," DEStech Publications, Inc, 2009.
- [2] Totaro, G. and De Nicola, F., "Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launchers," Acta Astronautica, Vol. 81, pp. 570-577, 2017.
- [3] Mazumdar, S. K. and Hoa, S. V., "Application of Taguchi method for process enhancement of on-line consolidation technique," Composites, Vol. 26, No. 9, pp. 673-669, 1995.
- [4] Cohen, D., "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength," Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 28, No. 12, pp. 1035-1047, 1997.
- [5] Lossie, M., Vandepitte, D. and Olofsson, K., "Experimental design approach to off-line quality control in filament winding," Proceedings of the international convention for filament winding technology, 1998.
- [6] Khalili, S. M. R. and Jahanmehr, F., "Experimental analysis of the effect of winding process parameters on physical properties and mechanical behavior of all-composite tanks," In Persian, 15th

در شکل‌های 19 و 20 سازه ساخته شده با شرایط بهینه قبل از آزمون و پس از آزمون آورده شده است.

3-3-3- مقایسه موردی

در این قسمت، حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه‌های شیشه-اپوکسی با نمونه‌ی ساخته شده با شرایط بهینه که آن هم شیشه-اپوکسی است، مقایسه شده است (شکل 21).



Fig. 19 Structures made with optimal conditions before testing

شکل 19 سازه ساخته شده با شرایط بهینه قبل از آزمون



Fig. 20 Overview of the structure after testing

شکل 20 نمای کلی سازه پس از آزمون

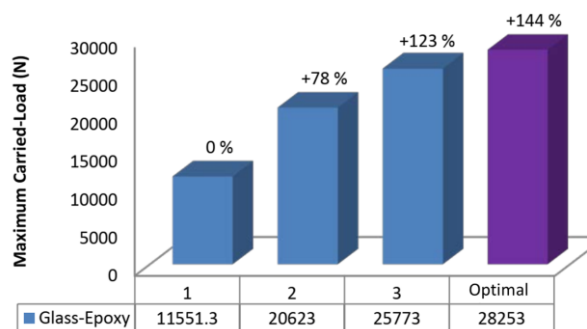


Fig. 21 Graph comparing the percentage difference between glass-epoxy samples and the sample fabricated with optimal conditions

شکل 21 نمودار مقایسه درصد اختلاف نمونه‌های شیشه-اپوکسی با نمونه‌ی ساخته شده با شرایط بهینه

همان‌طور که از شکل 21 قابل مشاهده است، حداکثر بار قابل تحمل سازه با بهینه کردن شرایط ساخت به‌شدت بالا می‌رود. درصدهای ذکر شده، نسبت به نمونه‌ای محاسبه شده که کمترین بار را تحمل کرده است. نمونه‌ی با شرایط بهینه‌ی ساخت، 9٪ درصد بهبود در بار تحمل شده را نسبت به نمونه‌ی شیشه-اپوکسی که بالاترین بار تحمل شده را دارد نشان می‌دهد. این

- Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Iran, 2007.
- [7] Dobrzanski, L. A., Domagala, J. and Silva, J. F., "Application of Taguchi method in the optimization of filament winding of thermoplastic composites," Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 133-140, 2007.
- [8] Gunasegaran, V., Prashanth, R. and Narayanan, M., "Experimental investigation and finite element analysis of filament wound GRP pipes for underground applications," Procedia Engineering, Vol. 64, pp. 1293-1301, 2013.
- [9] Kopecki, T., Mazurek, P. and Lis, T., "Experimental and Numerical Analysis of a Composite Thin-Walled Cylindrical Structures with Different Variants of Stiffeners," Subjected to Torsion. Materials, 12(19), p.3230, 2019.
- [10] Gerami, A., Davar, A., Heidari Bani, M., Eskandari Jam, J., "Numerical and experimental analysis of the buckling strength of a composite cylindrical lattice structure before and after low speed transverse impact," Composite Science and Technology, 8 (1): pp. 1363-1372, 2021.(in persian)
- [11] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A. and Rasin, A. F., "Anisogrid composite lattice structures—development and aerospace applications," Composite Structures, Vol. 94, pp. 1117-1127, 2012.
- [12] Vasiliev, V. V. and Morozov, E. V., "Advanced mechanics of composite materials," Second ed., Elsevier, UK, 2007.
- [13] Beheshti, M. H. and Rezaoust, A. M., "Reinforced plastics (composites)," In Persian, Iran Polymer and Petrochemical Research Institute, 2005.
- [14] Strong, E. B., "Basics of making composites (materials, methods and applications)," F. Divasalar and P. Abachi Trans., University Publishing Center, In Persian 2001.
- [15] Henninger, F., Hoffmann, J. and Friedrich, K., "Thermoplastic filament winding with online-impregnation. Part B. Experimental study of processing parameters," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, No. 12, pp. 1677-1688, 2002.
- [16] Zeinali, A., "Taguchi experiment design using Qualitek software," Petrochemical Research and Technology Company, Tehran, 2008.