



بررسی تجربی و بهینه‌سازی آماری پارامترهای ساخت مؤثر بر استحکام خمشی پانل‌های مشبک کامپوزیتی

مهدی فرهادی¹، علی داور^{2*}، محسن حیدری بنی³، جعفر اسکندری جم⁴

1- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

2- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

3- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 آبان 1400

داوری اولیه: 5 دی 1400

پذیرش: 13 دی 1400

کلیدواژگان:

تحلیل آماری- تجربی

پانل‌های مشبک کامپوزیتی

استحکام خمشی

پارامترهای ساخت

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام خمشی پانل‌های مشبک کامپوزیتی به روش تجربی- آماری می‌باشد. برای نیل به این هدف پس از مطالعه روش‌های ساخت پانل‌های مشبک کامپوزیتی و شناخت پارامترهایی که در ساخت این پانل‌ها مؤثر هستند و با در نظر گرفتن امکانات موجود، چهار پارامتر سیکل پخت، فشار حین پخت، دمای رزین و کشش الیاف، به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ساخت این پانل‌ها انتخاب شدند. در مرحله بعد با انتخاب سه سطح برای هر پارامتر با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی از بین 81 حالت ممکن ساخت، 9 حالت پیشنهادی تاگوچی برای ساخت 9 پانل، در نظر گرفته شد. پس از ساخت این نمونه‌ها، با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل مقدماتی و آنالیز واریانس، شرایط بهینه ساخت و میزان تأثیر هر پارامتر بر استحکام مشخص شد و نتایج، با خروجی نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک مقایسه شد. شرایط بهینه ساخت عبارت است از سیکل پخت به صورت 4 ساعت پخت در 80 درجه و 2 ساعت در 160 درجه، فشار 3 بار، دمای آغشته سازی رزین 60 درجه و کشش الیاف 70 نیوتن متر. همچنین کشش الیاف با 72/53% بیشترین و پارامتر فشار با 99%، کمترین تأثیر را بر پاسخ داشتند و تأثیر دمای رزین و سیکل پخت بر پاسخ به ترتیب، 11/99% و 11/67% می‌باشند.

Experimental study and statistical optimization of fabrication parameters affecting the flexural strength of composite grid-stiffened panels

Mahdi Farhadi, Ali Davar*, Mohsen Heydari Beni, Jafar Eskandari Jam

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technologies, Iran.

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 November 2021

First Decision: 26 December 2021

Accepted: 3 January 2022

Keywords:

Statistical-experimental analysis

Composite grid-stiffened panels

Flexural strength

Fabrication parameters

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of effective manufacturing parameters on the flexural strength of composite grid-stiffened panels by experimental-statistical method. To achieve this goal, after studying the methods of making composite mesh panels and recognizing the parameters that are effective in making these panels, and considering the available facilities, four parameters of firing cycle, pressure during firing, resin temperature and fiber tension as the most important effective parameters They were selected to build these panels. In the next step, by selecting three levels for each parameter using Taguchi experiment design method from among 81 possible construction modes, 9 Taguchi proposed modes for constructing 9 panels were considered. After fabrication of these samples, using the methods of preliminary analysis and analysis of variance, the optimal construction conditions and the effect of each parameter on the strength were determined and the results were compared with the output of qualitative test design software. Optimal manufacturing conditions are 4 cycles of baking cycle at 80 °C and 2 hours at 160 °C, 3 bar pressure, 60 °C resin impregnation temperature and 70 N.m fiber stretch. Also, fiber tension with 73.34% had the highest and pressure parameter with 0.99% had the least effect on the response and the effect of resin temperature and curing cycle on the response were 11.99% and 11.67%, respectively.

1- مقدمه

امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص موردنظر را فراهم

نماید، وجود ندارد. به‌عنوان مثال در صنایع هوافضا به موادی نیاز

است که ضمن داشتن استحکام بالا، دارای وزن کمی باشند،

در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است.

در صنایع هوافضا، کاربردهای زیرآبی، حمل‌ونقل و امثال آن‌ها،

Please cite this article using:

M. Farhadi, A. Davar, M. Heydari Beni, J. Eskandari Jam, Experimental study and statistical optimization of fabrication parameters affecting the flexural strength of composite grid-stiffened panels, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 1- 15, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بنابراین ساختار مشبک شش ضلعی می‌تواند یک انتخاب بهینه باشد.

مازومدار و هوا⁵ [7] برای انجام حداقل آزمایش‌ها به منظور بررسی شرایط فرآیند ساخت (نوارپیچی) حلقه‌های کامپوزیتی از جنس کربن- پلی‌اتراکتون⁶، از روش کنترل کیفیت تاگوچی بهره برده‌اند. در این آزمایش‌ها، تأثیر سه عامل توان لیزر، سرعت پیچش و فشار مستحکم شدن⁷ بر استحکام اتصال بین لایه‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری به روش تحلیل واریانس نشان دهنده‌ی 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.

یکی دیگر از پژوهش‌هایی که نتایج آن در سال 2007 منتشر گردید، مربوط است به تحقیقات جاده‌ها⁸ و همکاران که در رابطه با افزایش عملکرد صفحات مشبک کامپوزیتی، تحت بارهای عرضی، صورت پذیرفته است. هدف اصلی از این مطالعه بهینه‌سازی هندسه ساختارهای مشبک، برای افزایش جذب انرژی مخصوص، تحت یک ضربه عرضی شبه استاتیکی و دینامیکی بوده است [8].

توتارو و نیکولا⁹ در سال 2012 به بررسی پیشرفت‌های در طراحی و تولید سازه‌های مشبک کامپوزیتی غیر هم‌شکل که در مرکز تحقیقات فضایی ایتالیا اجرا شده‌اند، پرداختند. چارچوب طراحی مقدماتی با معرفی مفهوم ترکیب زیر بهینه‌سازی به منظور تطابق نیازهای سفتی سازه مشبک و پوسته و حداقل کردن وزن، با در نظر گرفتن قیدهای استحکام، بهبود داده شد. فرآیند تولید ساختار مشبک و پوسته بیرونی، به روش رشته پیچی خشک، با روبات به منظور کمک به خودکار کردن فرآیند انجام شد. در نهایت، تزریق رزین تحت کیسه خلأ و پخت همزمان ریب و پوسته بیرون از اتوکلاو به کمک مندرل گرم شده، انجام می‌شود. با چنین رویکردی یک مدل سازه میان مرحله‌ای طراحی، تولید و تست شد. تست‌های مکانیکی نشان داد که سازه ساخته شده همان‌طور که انتظار می‌رفت، عملکرد عالی از نظر سازه‌ای داشت و امکان کاهش وزن در مقایسه با سازه آلومینیوم را نشان می‌دهد [9].

مقاومت سایشی و UV خوبی داشته باشند. از آنجا که نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه خواص موردنظر را دارا باشد، باید به دنبال چاره‌ای دیگر بود. کلید حل این مشکل، استفاده از کامپوزیت هاست. کامپوزیت‌ها موادی چند جزئی هستند که خواص آن‌ها در مجموع از هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده آن‌ها بهتر است، ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیازها، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل کرد [1].

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

یکی از جامع‌ترین و بهترین تحقیقات انجام شده در زمینه سازه‌های مشبک کامپوزیتی مربوط به وسیلیو² و همکارانش [2]-4 می‌باشد که نتایج آن در طی سال‌های 2001، 2006، 2012 منتشر شد. در این مقالات، اطلاعاتی در زمینه روش‌های طراحی و تحلیل، فرآیند ساخت و همچنین کاربردها و مزایای آن نسبت به سازه‌های فلزی داده شده است.

گان و گیبسون³ [5] در سال 2004 جذب انرژی در یک سازه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی را به صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها با ساخت پانل مشبک کامپوزیتی با یک طرف پوسته، به تست این سازه با قرار دادن پانل در هر دو حالت بر روی فیکسچر تست خمش سه‌نقطه‌ای بدین صورت که هم طرف پوسته و هم ریب‌ها در زیر میله اعمال بار قرار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طرف با پوسته حداکثر نیرو تحمل شده بیشتر است، در حالی که انرژی جذب شده مخصوص و جابجایی بعد از انرژی جذب شده در بارگذاری طرف ریب‌ها بیشتر است. همچنین مشخص شد که این سازه‌ها در برابر تحمل آسیب، عملکرد عالی دارند.

فان⁴ و همکارانش [6] در سال 2007 به بررسی رفتار ساندویچ پانل‌ها با هسته مشبک شش ضلعی تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد سازه مشبک تقویت شده با الیاف کربن سفت‌تر و مستحکم‌تر از فوم‌ها و لانه زنبوری‌ها می‌باشد. برای دستیابی به مقاومت برشی ساختار مشبک، ریب‌ها حداقل در سه جهت متفاوت نیاز می‌باشد.

⁵ Mazumdar and Hoa

⁶ Polyether ether ketone

⁷ Consolidation

⁸ Jadhav

⁹ Totaro and Nicola

¹ Void

² Vasiliev

³ Gan & Gibson

⁴ Fan

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 رزین^۴، دمای حمام رزین و مقدار شتاب‌دهنده‌ی افزوده شده، به آسانی کسر حجمی الیاف را تغییر می‌دهند. همچنین، کسر حجمی الیاف به شدت از زاویه‌ی پیچش تأثیر می‌پذیرد [15].

گوناسگار^۵ و همکاران با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های مقاوم تاگوچی به بررسی اثر پارامترهای فرآیندی بر خواص مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. آن‌ها اثر چهار متغیر زاویه پیچش، درصد وزنی ذرات سیلیکا، اندازه ذرات سیلیکا و کشش الیاف را بر سه متغیر پاسخ استحکام کششی محوری، استحکام کششی محیطی و سفتی لوله بررسی کرده‌اند. اندازه ذرات سیلیکا بیشترین اثر را روی استحکام کششی محوری داشته است [16].

همان‌طور که در تحقیقات گذشته مشاهده شد، در سازه‌های مشبک کامپوزیتی، تاکنون تنها روش‌های ساخت مختلف بررسی شده است و تحقیقی جامع در زمینه تأثیر تغییر پارامترهایی که در ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی مؤثر هستند، انجام نشده است. این خلأ در روش‌های ساخت و تأثیر تغییر پارامترهای مختلف ساخت در پانل‌های مشبک کامپوزیتی بیشتر از سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای می‌باشد. همچنین بهینه‌سازی‌های صورت گرفته به روش طراحی آزمایشات بیشتر شامل مخازن و لوله‌های کامپوزیتی می‌باشد و تاکنون تحقیقی در زمینه بهینه‌سازی فرآیند ساخت پانل‌های مشبک کامپوزیتی به روش طراحی آزمایش انجام نگرفته است.

در این پژوهش، هدف بر این است که ابتدا پارامترهای مؤثر در ساخت پانل‌های مشبک کامپوزیتی و سطوح آن‌ها مشخص و سپس با طراحی آزمایش به روش تاگوچی، ماتریس ساخت نمونه‌ها که هر کدام شامل ساخت با شرایط مختلف می‌باشد، تعیین و بر اساس این ماتریس، نمونه‌ها با شرایط ساخت متفاوت، ایجاد شده است. پس از مرحله ساخت، استحکام خمشی نمونه‌ها با آزمون خمش سه نقطه‌ای اندازه‌گیری شده و در نهایت با استفاده از روش آماری تاگوچی به تعیین سطوح بهینه پارامترهای ساخت این نوع سازه‌ها پرداخته شده است.

اسکندری جم و همکاران در سال 2013 به طراحی بهینه سازه‌های مشبک حلقوی استوانه‌ای و مخروطی پرداختند. برای بهینه‌سازی وزن ساختارهای حلقوی استوانه‌ای و مخروطی ابتدا معادلات برای به دست آوردن ماتریس سفتی استخراج شده است. همچنین روابط و قیود مربوط به بهینه‌سازی وزن این سازه‌ها تحت کماتش ارائه شد است. تحلیل کماتش خطی سازه‌های مشبک مخروطی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. همچنین استحکام کماتشی سازه‌های مشبک تحت نیروی محوری بحرانی با استفاده از المان تیر تیموشنکو و تحلیل المان محدود انجام گرفته است [10].

آرش‌مهر و همکاران در سال 2013 به صورت تحلیلی و تجربی به بررسی پوسته‌های تقویت‌شده کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی پرداختند. نتایج نشان داد که محل تقاطع ریب‌ها تأثیر زیادی در کاهش تنش فون مایرز در پوسته‌ها دارد و همچنین محاسبات نشان داد پوسته‌های تقویت‌شده با ریب‌های مایل، ظرفیت باربری را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند [11].

تحقیق دیگری که در سال 2006 به بررسی استحکام جدایش در سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و پوسته با جنس پیش آغشته کربن/اپوکسی پرداخته است، مربوط به گراو و همکارانش می‌باشد. در این تحقیق تأثیر چهار پارامتر فشار خلأ، نرخ افزایش دما، سیکل پخت و زمان به کارگیری فشار خلأ، بر استحکام جدایش هسته و پوسته بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر را سیکل پخت دارد [12].

رامش^۱ و همکارانش در سال 2013 به بررسی تأثیر نرخ تغذیه و سرعت اسپیندل بر نیروی رانش، گشتاور و ضریب آسیب در میله‌های کامپوزیتی ساخته شده با روش پالتروژن پرداختند [13].

در سال 2007 دوبرزینسکی^۲ و همکاران با روش تاگوچی به بررسی استحکام کششی و برشی در لوله‌های کامپوزیتی شیشه/پلی‌پروپیلن ساخته شده با روش رشته پیچی با انتخاب چهار پارامتر دمای الیاف، تعداد لایه‌ها، سرعت پیچش و تعداد دسته الیاف پرداختند [14].

لوسی^۳ و همکاران 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 دسته بندی شده‌اند، بر آغشته‌سازی دسته الیاف و کیفیت نهایی لوله‌های کامپوزیتی

⁴ Doctor Blade Gap
⁵ Gunasegaran

¹ Ramesh
² Dobrzanski
³ Lossie

2- روش پژوهش

روشی که در انجام این پژوهش استفاده می‌شود یک روش تجربی - آماری می‌باشد. در ادامه، ابتدا پارامترهای انتخاب شده جهت تعیین سطوح بهینه این پارامترها با استفاده از روش تاگوچی (فاز برنامه ریزی) بیان شده است؛ سپس در فاز اجرایی روش تاگوچی، تمام مراحل ساخت پانل مشبک کامپوزیتی، از طراحی تا تولید و تست‌های انجام شده بر روی آن‌ها، گزارش می‌شود. تمام مراحل انجام پروژه در شکل 1 نشان داده شده است.

2-1- طراحی و ساخت سازه‌های کامپوزیتی

در این تحقیق بعد از ساخت چند نمونه به عنوان پیش آزمایش، در نهایت چهار پارامتر به عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ساخت این پانل‌ها شناسایی و انتخاب شدند که این پارامترها عبارتند از:

1- سیکل پخت

2- فشار در حین پخت

3- دمای رزین

4- کشش الیاف

برای هر کدام از این پارامترها با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه و با توجه به تحقیقات قبلی در مورد مخازن و لمینت‌های کامپوزیتی با موضوع تعیین پارامترهای ساخت مؤثر بر سازه‌های مشبک کامپوزیتی سه سطح برای هر یک از پارامترهای چهارگانه فوق در نظر گرفته شد. این پارامترها و سطوح مربوط به آن‌ها در جدول 1 آورده شده است.

2-1-1- آرایه ارتوگونال و جدول طرح‌ریزی شده تاگوچی

با توجه به تعداد پارامترها و سطوح و صرف نظر کردن از تداخل بین پارامترها، آرایه متعامد در نظر گرفته شده آرایه 9L می‌باشد. در جدول 2 طرح‌ریزی تاگوچی آورده شده است.

جدول 1 جدول فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

Table 1 Table of factors under consideration and their levels

پارامتر سطح	سیکل پخت	فشار (bar)	دمای رزین (C)	کشش الیاف (N)
سطح 1	4 ساعت 80 درجه 4 ساعت 120 درجه	0	25	25
سطح 2	4 ساعت 80 درجه 3 ساعت 140 درجه	-1	40	36
سطح 3	4 ساعت 80 درجه 2 ساعت 160 درجه	3	60	43

جدول 2 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرایه‌ی متعامد 9L)

Table 2 Experimental design table (orthogonal array L9)

پارامتر نمونه	سیکل پخت	فشار (bar)	دمای رزین (C) ⁰	کشش الیاف (N)
نمونه شماره 1	4 ساعت در 80 درجه و 4 ساعت در 120 درجه	0	25	25
نمونه شماره 2	4 ساعت در 80 درجه و 4 ساعت در 120 درجه	-1	40	36
نمونه شماره 3	4 ساعت در 80 درجه و 4 ساعت در 120 درجه	3	60	43
نمونه شماره 4	4 ساعت در 80 درجه و 3 ساعت در 140 درجه	0	40	43
نمونه شماره 5	4 ساعت در 80 درجه و 3 ساعت در 140 درجه	-1	60	25
نمونه شماره 6	4 ساعت در 80 درجه و 3 ساعت در 140 درجه	3	25	36
نمونه شماره 7	4 ساعت در 80 درجه و 2 ساعت در 160 درجه	0	60	36
نمونه شماره 8	4 ساعت در 80 درجه و 2 ساعت در 160 درجه	-1	25	43
نمونه شماره 9	4 ساعت در 80 درجه و 2 ساعت در 160 درجه	3	40	25

2-1-2- متغیر پاسخ

هدف از این تحقیق، افزایش استحکام خمشی پانل‌های مشبک کامپوزیتی می‌باشد و با توجه به متفاوت بودن وزن پانل‌های ساخته شده، به منظور مقایسه نمونه‌ها، پاسخ یک عدد بی بعد در نظر گرفته شده است.

بعد از ساخت و تست نمونه‌ها، داده‌های آزمون‌ها به روش تاگوچی تحلیل شده و با خروجی نرم‌افزار طراحی آزمایش کوالیتک مقایسه شده است و از صحت محاسبات اطمینان حاصل شده است. شرایط بهینه، درصد مشارکت هر پارامتر و



Fig. 1 Classification of factors in composite grid-stiffened Panel

شکل 1 دسته‌بندی فاکتورها در سازه پانل مشبک کامپوزیتی

⁰ Orthogonal array

استحکام خمشی در حالت بهینه پیش‌بینی شده است.

برش لیزر قرار داده شده (شکل 3) و پس از عملیات برش، قالب پلکسی‌گلاس مورد نظر ایجاد می‌شود.

2-2- طراحی و ساخت پانل مشبک کامپوزیتی

برای ساخت پانل‌های مشبک کامپوزیتی، یکی از بهترین روش‌ها، استفاده از قالب‌های سیلیکونی می‌باشد. زیرا سیلیکون، انبساط حرارتی بالایی داشته و به خوبی ریب‌ها را فشرده کرده و به راحتی نیز از قطعه جدا می‌شود.

مراحل ساخت سازه‌ی موردنظر بدین ترتیب است که ابتدا طرح دوبعدی سازه مشبک از برنامه استخراج شده و به کمک دستگاه برش لیزر یک الگو از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شد. سپس به وسیله قالب الگو قالب سیلیکونی ساخته شده است. با استفاده از رشته پیچی دستی و به روش تر پیچی، الیاف درون شیارهای قالب سیلیکونی رشته پیچی شده تا سازه مشبک شکل بگیرد. در انتها سازه رشته پیچی شده در اتوکلاو با کنترل فشار و دما، پخت می‌شود.

1-2-2- مواد و ترکیبات

برای ساخت پوسته مشبک از الیاف شیشه نوع S استفاده شده است. رزین مورد استفاده رزین اپوکسی، سخت کننده و شتاب دهنده می‌باشد و به نسبت 100، 90، 0.5 طبق دستور سازنده مخلوط شده‌اند. در جدول 3 نوع الیاف و رزین به کار رفته ارائه شده است. در جدول 4 خواص مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده نشان داده شده است.

2-2-2- مدل سازی قالب سازه

برای استفاده از قالب سیلیکونی، باید از قالب دیگری به عنوان قالب الگو برای قالب گیری سیلیکون که به صورت تقریباً مایع می‌باشد، استفاده کرد. برای مدل کردن قالب الگو ابتدا یک سلول واحد مدل شده است، سطح مقطع ریب‌ها $3 \times 13 \text{ mm}$ که عرض ریب‌ها و 13 ضخامت آن‌ها می‌باشد، در نظر گرفته شد. در شکل 2 اندازه قطرها و عرض سلول واحد که در نرم افزار کتیا طراحی شده است را مشاهده می‌کنید. در نهایت، مدل سازی قالب الگو سازه انجام شده است. در شکل 2 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه نیز آورده شده است.

از پلکسی‌گلاس به عنوان قالب الگو استفاده شده است. برای ساخت قالب الگو با لیزر، ابتدا قالب به صورت دوبعدی در نرم افزار طراحی شده است. برای این کار معمولاً از نرم افزار اتوکد¹ و کورل دراو² استفاده می‌شود. سپس ورق پلکسی‌گلاس در دستگاه

جدول 3 مشخصات الیاف و رزین

Table 3 Specifications of fibers and resins

مشخصه	سازنده	پارامتر
Araldite LY556 (100)	Huntsman	رزین
Aradur HY917 (90)	Huntsman	هاردنر
DY70 (0/5)	Huntsman	شتاب دهنده
S Glass tex 2400	Silenka	الیاف شیشه

جدول 4 خواص مکانیکی الیاف و رزین

Table 4 Mechanical properties of fibers and resin

مواد	دانسیته (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	استحکام کششی (MPa)
شیشه	2400	52	0/21	1204
اپوکسی	1100	3.1	0/35	83

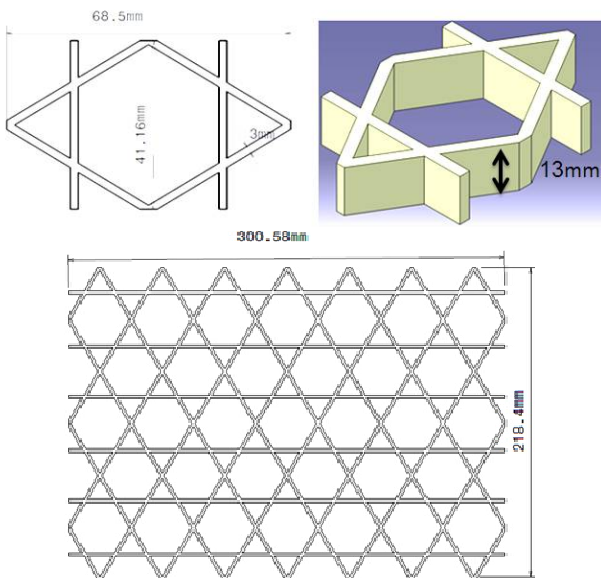


Fig. 2 Structural dimensions and geometric parameters of the network
شکل 2 ابعاد سازه و پارامترهای هندسی شبکه

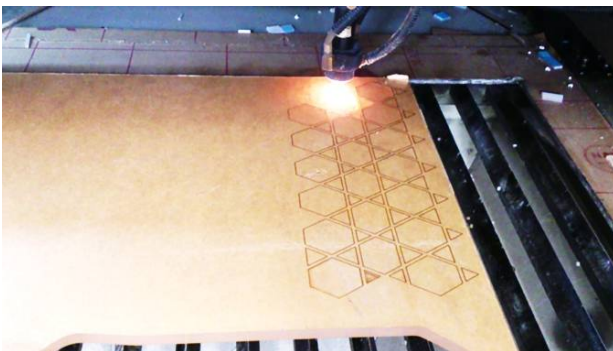


Fig. 3 Cutting process of Plexiglass by Laser

شکل 3 ورق پلکسی‌گلاس در حال برش با لیزر

¹ AutoCAD

² CorelDRAW

بنابراین عریض بودن حمام رزین سبب پخش شدن رزین در سطح زیادی شده و در نتیجه ضخامت رزین در کف حمام ناچیز شده و در نتیجه امکان دارد آغشته سازی الیاف به خوبی صورت نپذیرد. همچنین با توجه به اینکه دمای رزین، به عنوان یک پارامتر در این پروژه مدنظر قرار گرفته است، به این مسئله باید توجه داشت که جنس حمام نیز قابلیت تحمل حرارت را داشته باشد. با توجه با این ملاحظات یک حمام رزین ساده فلزی به طول 20 سانتیمتر و عرض 5 سانتیمتر و عمق 7 سانتی‌متر ساخته شد. در این حمام جهت کنترل مسیر الیاف و آغشته‌سازی کافی آن، چند میله در قسمت‌های مختلف حمام رزین تعبیه شد (شکل 6).

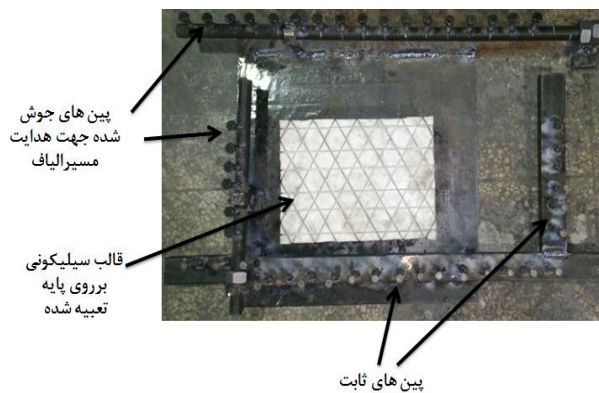


Fig. 5 Winding with nylon thread to try the twist code

شکل 5 پیچش با نخ نایلونی برای امتحان کردن کد پیچش

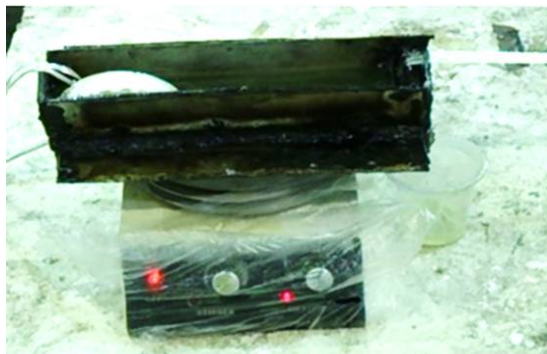


Fig. 6 Resin bath and passing fibers through it

شکل 6 حمام رزین و عبور الیاف از درون آن

2-2-4- فرآیند پیچش

ابتدا الیاف از دوک الیاف باز شده است و به صورت آزاد بر روی میز کار قرار گرفته است. سپس الیاف وارد حمام رزین شده و بعد از آغشته شدن الیاف با رزین و عبور از حمام رزین، ابتدای دسته الیاف نتابیده به اولین پیچ گره زده شده است. سپس الیاف باز شده از دوک، با کشش دستی از حمام رزین عبور کرده و رشته پیچی آغاز شده است. در ابتدا، الیاف آغشته شده از داخل

بعد از ساخت قالب نری به روش ذکر شده، از لاستیک سیلیکون قالب گیری برای ساخت قالب اصلی استفاده شده است. در شکل 4، قالب پلکسی گلاس که بین چهار جداره‌ی شیشه‌ای برای قالب گیری و ریختن سیلیکون محصور شده است، مشاهده می‌شود. همچنین برای جدایش راحت‌تر سیلیکون از قالب پلکسی گلاس، یک لایه تفلون نفوذ ناپذیر در زیر آن قرار گرفته است.

2-2-3- ساخت سازوکار پیچش پیوسته الیاف

در این پروژه با تلفیقی از روش رشته پیچی آزاد و قالب سیلیکونی با استفاده از دسته الیاف نتابیده و آغشته‌سازی در حین (تر پیچی)، از الیاف پیوسته برای ساخت پانل مشبک تا پر شدن کامل قالب سیلیکونی استفاده شده است.

بدین منظور، مطابق شکل 5 سازوکاری طراحی و ساخته شده است. در چهار طرف قالب سیلیکونی به موازات لبه‌های قالب، میله‌هایی تعبیه شده است و بر روی آن‌ها در امتداد شیارهای قالب سیلیکونی پیچ‌هایی جوش داده شد (از پیچ به جای پین استفاده شد). قالب سیلیکونی نیز در وسط بر روی پایه‌ای قرار داده شد. در واقع هدف از تعبیه این پیچ‌ها، هدایت مسیر الیاف خارج از قالب سیلیکونی و همچنین ثابت نگه‌داشتن آن‌ها جهت انجام فرآیند پیچش پیوسته می‌باشد.

حمام رزین باید عمق داشته و عرض این حمام کم باشد، زیرا میزان رزین مصرفی برای ساخت نمونه‌ها کم می‌باشد. همچنین برای کنترل دمای رزین در حین آغشته سازی، تمام رزین مصرفی را یک‌باره در حمام رزین نمی‌توان ریخت.



Fig. 4 Male mold located on a layer of Teflon surrounded by four glass walls

شکل 4 قالب پاکسی گلاس واقع بر یک لایه تفلون که پیرامون آن با چهار جداره‌ی شیشه‌ای محصور شده است

شده درون قالب سیلیکونی بعد از پخت در شکل 9 نشان داده شد. در شکل 10 تصاویر نمونه‌های ساخته شده آمده است.

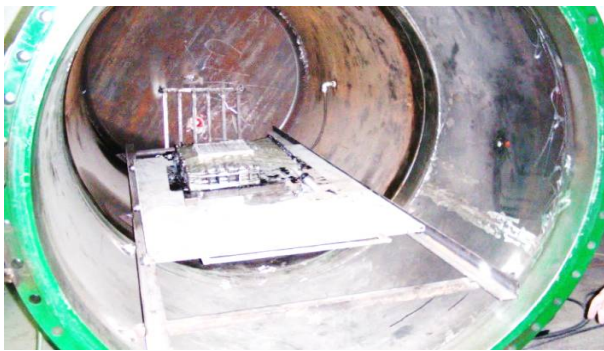


Fig. 8 View of structure is placed in the autoclave

شکل 8 نمایی از نحوه‌ی قرارگیری سازه در اتوکلاو

اولین شیار قالب سیلیکونی عبور داده شده و سپس از پشت دو پیچ روبه‌روی در طرف مقابل، عبور داده شده؛ دوباره وارد قالب سیلیکونی شده است و این عمل تا آخرین شیار ادامه پیدا کرده است (شکل 7). به همین ترتیب این عمل تا پر شدن کامل شیارهای قالب سیلیکونی ادامه یافته است. در ساخت تمام نمونه‌ها از تعداد لایه‌های مساوی الیاف استفاده شده و 12 لایه الیاف برای پر کردن شیارهای قالب سیلیکونی در تمام نمونه‌ها به کار رفته است.

بعد از پر کردن شیارها، یک نوار تفلونی بر روی قطعه قرار داده شده است و سپس یک صفحه سنگین فولادی نیز بر روی آن گذاشته شده تا الیاف بر روی هم قرار گرفته و رزین به‌صورت یکسان پخش شود [17].

2-2-5- پخت سازه‌ها

سطوح انتخابی سیکل پخت با توجه به سیکل‌های پیشنهادی شرکت سازنده انتخاب شده است و با توجه با اینکه ابعاد و ضخامت قطعه موردنظر کم می‌باشد حد پائین سیکل‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

در همه نمونه‌ها افزایش دما با نرخ 2 درجه بر دقیقه، دما به 80 درجه رسیده و 4 ساعت در 80 درجه باقی می‌ماند. سپس در همه نمونه‌ها با نرخ 2 درجه بر دقیقه نمونه‌ها به دمای موردنظر رسیده و 4 یا 3 یا 2 ساعت در آن دما پخت تکمیل شده است. بعد از پخت کامل، دما با نرخ 2 درجه بر دقیقه پایین آورده شده است. جهت پخت و همچنین اعمال فشار یا خلأ، از دستگاه اتوکلاو استفاده شده است.



Fig. 9 Composite mesh panel threaded into a silicone mold after cure and before separation from the mold

شکل 9 پانل مشبک کامپوزیتی رشته‌پیچی شده درون قالب سیلیکونی بعد از پخت و قبل از جدایش از قالب



Fig. 7 Filament winding and fill grooves in silicone mold

شکل 7 رشته پیچی و پر کردن شیارهای قالب سیلیکونی

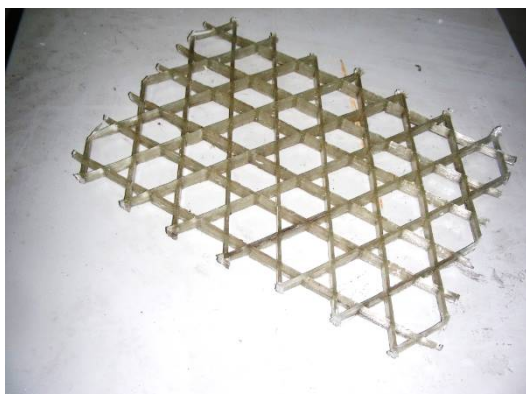


Fig. 10 Composite mesh panel after separation from silicone mold

شکل 10 پانل مشبک کامپوزیتی بعد از جداسازی از قالب سیلیکونی

2-2-6- دسته‌بندی فاکتورها

در این پژوهش باید 4 پارامتر در ساخت هر نمونه کنترل شود.

در شکل 8 سازه پخت شده به همراه قالب سیلیکونی در اتوکلاو نشان داده شده است. پانل مشبک کامپوزیتی رشته‌پیچی

برای کنترل هر پارامتر از ابزار و روش خاصی استفاده شده است.

- کنترل دما و سطوح انتخابی دما

دمای رزین در سه سطح 25، 40 و 60 درجه سلسیوس تنظیم شده است که در هر دما میزان جذب رزین الیاف متفاوت می‌باشد.

• دلیل انتخاب سطوح دما:

با توجه به اینکه دمای ژل شدن رزین، 80 درجه می‌باشد، سطوح انتخاب شده دما در سه سطح کمتر از دمای ژل شدن 60 و 40 یعنی به فاصله 20 درجه‌ای و 25 که نزدیک به دمای محیط می‌باشد انتخاب شدند. افزایش دما با استفاده از یک گرم‌کن حرارتی آزمایشگاهی انجام شده است و با یک ترمومتر میزان دما اندازه‌گیری و کنترل شده است.

- کنترل کشش الیاف و سطوح انتخابی کشش

همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای رشته پیچی ممتد الیاف سازوکاری طراحی شده است. در اینجا باید اشاره شود که این سازوکار نه تنها برای کنترل حرکت الیاف و پیچش ممتد آن استفاده می‌شود، بلکه راهکاری برای کنترل کشش الیاف نیز می‌باشد. این سازوکار بدین صورت طراحی شده است که پیچ‌های مربوط به ریب‌های مایل، در یک طرف بر روی یک پایه فلزی جوش شده و ثابت می‌باشند اما در طرف مقابل پیچ‌ها بر روی یک پیچ قدرت یک متری جوش شده‌اند که این پیچ قدرت قابلیت بازو بسته‌شده را دارا می‌باشد. بنابراین با بازو بسته شدن این پیچ قدرت، الیاف‌های بکار رفته در ساخت پانل مشبک شل یا سفت می‌شوند و کشش در آن‌ها تغییر می‌کند (شکل 11). میزان کشش در الیاف به میزان سفت شدن پیچ قدرت وابسته می‌باشد. وسیله‌ای که می‌توان میزان کشش را، با کنترل میزان سفت کردن پیچ قدرت کنترل نمود گشتاورسنج می‌باشد.

• دلیل انتخاب سطوح کشش الیاف:

الیاف شیشه موجود در کارگاه در کشش 6 kg رشته‌رشته می‌شود، بنابراین باید سطوح انتخابی کشش کمتر از 6 کیلوگرم باشند. با توجه به اینکه کشش با یک گشتاورسنج کنترل شده است و 6 کیلوگرم کشش، با محاسباتی که انجام شده، تقریباً معادل اعمال گشتاور 160 نیوتن متر بر پیچ قدرت می‌باشد، سطوح انتخابی کشش N.m70، N.m100 و N.m120 انتخاب شد. بعد از اعمال گشتاور و رسیدن به مقدار موردنظر کشش، با استفاده از دو مهره تثبیت، پیچ قدرت ثابت شده است.

- کنترل فشار و سطوح انتخابی فشار

جهت کنترل فشار و سطح‌های مختلف آن از اتوکلاو استفاده می‌شود. فشار در سه سطح 0، 3 بار و 1- بار اعمال می‌شود.

• دلیل انتخاب سطوح فشار:

سطوح انتخابی فشار با توجه به میزان فشاری که از طریق اتوکلاو می‌توان اعمال می‌کرد انتخاب شد.

• اعمال فشار

فشار اعمالی باید در مدت کوتاهی پیش از ژله‌ای شدن رزین به کار رود، به‌گونه‌ای که رزین قادر به جریان یافتن بین لایه‌های الیاف باشد [18]. زمانی که فرآیند ژله‌ای شدن آغاز می‌شود، گرانروی رزین به سرعت افزایش می‌یابد. رزین‌های که واکنش‌پذیری کمی دارند، عمل ژله‌ای شدن در آن‌ها به آهستگی رخ می‌دهد. اگر پیش از ژله شدن، فشار بر روی قالب وارد شود، رزین به بیرون از قالب و یا لایه‌ها می‌رود. فشار باید در لحظه ژله‌ای شدن رزین و یا مدت کوتاهی پس از آن روی قالب وارد شود [18]. اعمال فشار توسط کنترلر دستگاه اتوکلاو انجام می‌شود. در روش قالب‌گیری کیسه‌ای در خلأ، اعمال خلأ روی قطعه تا پخت کامل قطعه ادامه می‌یابد [19].

- کنترل سیکل پخت و سطوح پخت

پخت رزین در سه سطح با توجه به اطلاعات شرکت سازنده

انتخاب شده است که عبارت‌اند از:

1- 4 ساعت در 80 درجه و 4 ساعت در 120 درجه

2- 4 ساعت در 80 درجه و 3 ساعت در 140 درجه

3- 4 ساعت در 80 درجه و 2 ساعت در 160 درجه

هدف عمده در فرآیند ساخت، فراهم کردن کیفیت و خواص مکانیکی مناسب ریب‌ها است که به‌عنوان اجزای اصلی در باربری سازه‌ی مشبک عمل می‌کنند. خواص مکانیکی نیز به شدت از روش ساخت و فاکتورهای مرتبط با آن تأثیر می‌پذیرند و بررسی و کنترل آن‌ها برای تولید سازه‌ی با کیفیت بالا و کمترین عیوب، ضروری است.



Fig. 11 Mechanism with fixed and movable screws located on the power screw

شکل 11 سازوکار همراه با پیچ‌های ثابت و متحرک قرار گرفته بر روی پیچ قدرت

3- نتایج و بررسی

3-1- شرح نحوه‌ی انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

به طور کلی، دو روش برای آزمون خمش وجود دارد که به روش‌های خمش سه‌نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای معروف هستند. در خمش سه‌نقطه‌ای تکیه‌گاه در نزدیکی دو انتهای نمونه قرار داده می‌شود و نیرو در نقطه مرکزی اعمال می‌شود، اما در روش دوم نیرو به صورت متمرکز اعمال نمی‌شود. در روش خمش سه نقطه‌ای حداکثر تنش در نقطه وسط نمونه قرار دارد ولی در روش چهارنقطه‌ای در طول ناحیه‌ای از نمونه گسترده می‌شود. روشی که در این پروژه استفاده شده است، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای می‌باشد. برای تست خمش سه‌نقطه‌ای، از دستگاه تست یونیورسال سنتام با ظرفیت 15 تن که دارای فک پنوماتیکی خودکار می‌باشد استفاده شده است. آزمون‌ها در دمای محیط و با نرخ بارگذاری 2 mm/min انجام شده است. فیکسچر خمش سه‌نقطه‌ای از سه میله فولادی تشکیل شده است که بر روی پایه‌های فلزی ثابت شده‌اند. دو میله کناری در تست ثابت می‌باشند و کاملاً به پایه‌های خود مقید شده‌اند و پانل بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد و میله سوم که در وسط و بر روی پانل می‌باشد از طریق پایه خود به فک بالایی دستگاه متصل می‌شود. برای ایجاد شرایط شبه استاتیک، فک متحرک دستگاه که میله وسط به آن وصل شده است با سرعت 2mm/min به پانل نیرو وارد می‌کند و آن را تحت خمش قرار می‌دهد. فاصله دو میله زیرین برابر با 255/86 mm می‌باشد و میله بالایی وسط فاصله این دو میله قرار گرفته است. قطر میله‌های فیکسچر یک سانتی متر می‌باشد. در شکل 12 نمایی از آماده‌سازی دستگاه برای انجام آزمون نشان داده شده است.

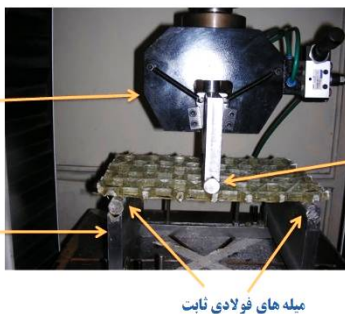


Fig. 12 Overview of the test device and preparation of test conditions

شکل 12 نمای کلی از دستگاه آزمون و آماده‌سازی شرایط آزمون

جدول 5 جرم پانل‌ها و درصد حجمی الیاف در ریب و گره برای هر پانل

Table 5 Panel mass and volume percentage of fibers in rib and node for each panel

شماره نمونه	درصد حجمی الیاف در ریب (%)	درصد حجمی الیاف در گره (%)	جرم پانل (gr)
نمونه 1	45/8	61/2	229,69
نمونه 2	33	44/1	241,64
نمونه 3	38/9	52	257,72
نمونه 4	39	52/1	289,63
نمونه 5	38/7	51/7	273,92
نمونه 6	43/5	58/1	267,88
نمونه 7	46	61/5	249,78
نمونه 8	49	65/5	237,26
نمونه 9	47/5	63/5	252,66

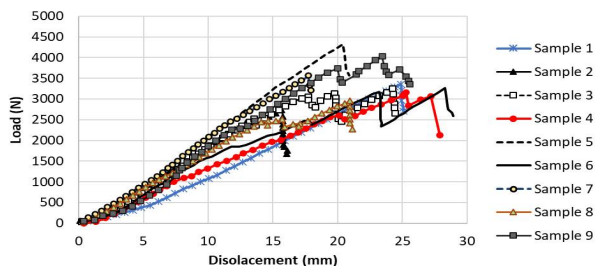


Fig. 13 Comparison of load-displacement diagrams of three-point bending test for 9 samples

شکل 13 مقایسه‌ی نمودارهای بار-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای برای 9 نمونه

3-2- درصد حجمی الیاف

خواص مکانیکی و شیمیایی یک قطعه کامپوزیتی به میزان زیادی تحت تأثیر میزان الیاف به رزین قرارداد [18]. در این پژوهش برای محاسبه درصد حجمی الیاف، روش سوزاندن که برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه مناسب است، طبق استاندارد 2584ASTM D استفاده شده است. از هر نه قطعه نمونه‌هایی بریده و وزن شده و سپس به مدت دو ساعت در کوره با دمای 600 درجه قرار داده می‌شوند. در این دما و زمان، رزین به‌طور کامل تبخیر شده و تنها الیاف باقی می‌ماند. با توزین الیاف باقی مانده و تقسیم آن به جرم اولیه نمونه، درصد وزنی الیاف محاسبه می‌شود. در جدول 5، جرم پانل‌ها و درصد حجمی الیاف در ریب و گره برای هر نمونه ارائه شده است.

جرم کمتر و سازه شماره 4 دارای جرم بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. لازم به ذکر است که فاکتورهای فرآیندی کشش الیاف و دمای رزین، میزان آغشته‌سازی الیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهند که تأثیر مستقیم بر روی کسر حجمی الیاف نسبت به رزین در سازه دارد.

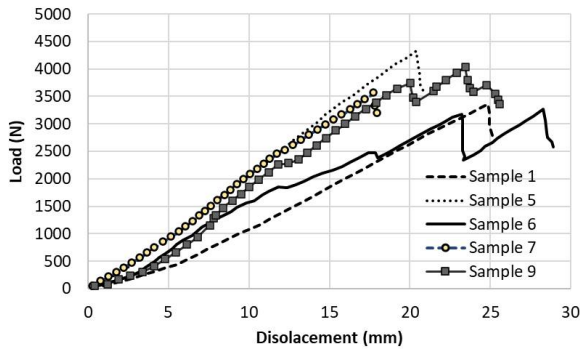


Fig. 14 Comparison of load diagrams - displacement of three glass-epoxy structures

شکل 14 مقایسه‌ی نمودارهای بار - جابجایی سه سازه‌ی شیشه - اپوکسی

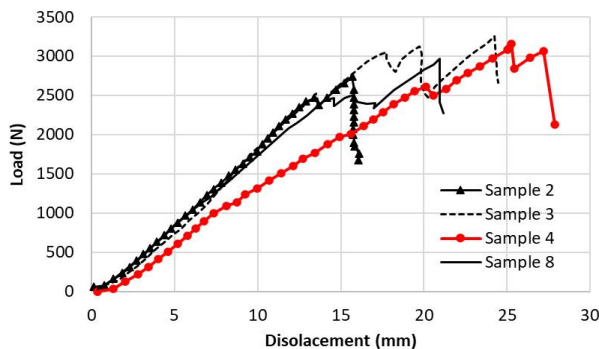


Fig. 15 Comparison of load diagrams - displacement of three carbon-epoxy structures

شکل 15 مقایسه‌ی نمودارهای بار - جابجایی سه سازه‌ی کربن - اپوکسی

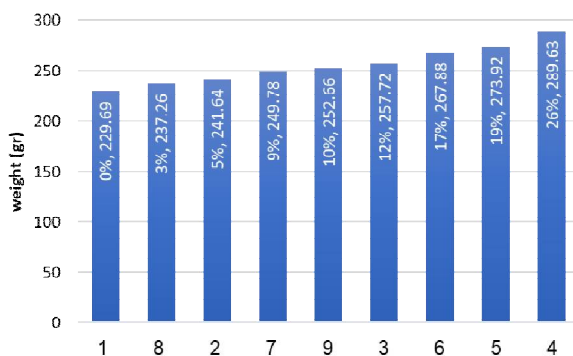


Fig. 16 Sample weight comparison chart

شکل 16 نمودار مقایسه‌ی جرم نمونه‌ها

در شکل 17 حداکثر بار تحمل شده توسط هر سازه مد نظر قرار گرفته است. هم‌چنین در این شکل، درصد اختلاف بار

همان‌طور که از شکل 14 قابل مشاهده است، باربری سازه‌ها در نمونه‌های پنجم، هفتم و نهم نسبت به سایر نمونه‌ها بالاتر بوده است. دلیل آن به فاکتور کشش الیاف برمی‌گردد. دو نمونه پنجم و نهم کمترین کشش الیاف را داشته‌اند، افزایش کشش الیاف، موجب آسیب در بافت الیاف شده و کاهش باربری سازه را به همراه دارد. نمونه شماره 7 دارای کشش الیاف بیشتر نسبت به دو نمونه دیگر می‌باشد، اما به دلیل پخت در دمای بالا و دمای رزین 60 درجه توانسته نیرویی نزدیک به دو نمونه دیگر متحمل شود. در محل‌هایی که الیاف به‌طور مناسب آغشته نمی‌شوند، ترک‌ها ظاهر می‌شوند و رشد می‌نمایند و واماندگی 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 لایه‌ای فراهم می‌کند [20]. استحکام برشی بین لایه‌ای، شاخصی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند بین رزین و الیاف است. مقادیر کم استحکام برشی تا حدودی از مقاومت برشی نسبتاً کم خود الیاف نیز ناشی می‌شود [21]. در شکل 11 نمودارهای بار - جابجایی سه سازه‌ی شیشه - اپوکسی آورده شده است.

همان‌طور که از شکل 15 مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های تست شده، نمونه‌ی دوم دارای کمترین بار تحمل شده است. در این نمونه، دمای رزین 40 درجه، فشار پخت منفی، سیکل پخت در کمترین سطح و کشش الیاف در سطح متوسط بوده است. همه این پارامترها مخصوصاً دمای رزین، فرصت آغشته‌سازی کافی را به الیاف نداده و کمترین کسر حجمی الیاف در این نمونه حاصل شده 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]. نمونه‌های شماره 8، 4 و 3 به دلیل دارای بودن بیشترین کشش الیاف، دارای کمترین باربری بعد از نمونه شماره 2 می‌باشند. نمونه شماره 8 بیشترین کسر حجمی الیاف را نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است.

در شکل 16، نمودار مقایسه‌ی جرم تمام نمونه‌ها و درصد اختلاف جرم سازه‌ها در مقایسه با کمترین جرم آورده شده است. از داده‌های به‌دست آمده مشهود است که سازه شماره 1 دارای

در جدول 6، حالت‌های رخ داده در سطوح مختلف فاکتورها بر مبنای حالت‌های واماندگی طبقه‌بندی شده، دسته‌بندی شده‌اند. حالت واماندگی غالب در پانل‌های مشبک کامپوزیتی تحت خمش سه نقطه‌ای، شکست در لایه‌های زیرین بوده است. در آزمون خمش سه نقطه‌ای، قسمت زیرین پانل تحت کشش و قسمت بالایی تحت فشاری می‌باشد، از این رو قسمت‌های زیرین عموماً دچار شکست شده و قسمت‌های رویی به دلیل نیروی فشاری دچار کمانش می‌شوند.

جدول 6 مقایسه حالت‌های واماندگی در سطوح مختلف فاکتورها

Table 6 Comparison of failure states at different levels of factors

حالت واماندگی		
فاکتور ساخت	حالت 1 شکست در لایه‌های زیرین	حالت 2 کمانش در لایه‌های بالایی
کشش الیاف:		
1	9-1	5
2	7-8-2	6
3	8-3	4
دمای رزین:		
1	8-1	6
2	9-2	4
3	7-3	5
سیکل پخت:		
1	3-2-1	--
2	--	6-5-4
3	8-9-7	--
فشار:		
1	1-7-9	4
2	2-8	5
3	3	6

در شکل 19 دو حالت واماندگی، شکست در لایه‌های زیرین سازه در اثر کشش و کمانش در لایه‌های بالایی در اثر فشار ارائه شده است.

3-4- تحلیل آماری نتایج و بهینه‌سازی ساخت

هدف از این پژوهش تجربی - آماری، تعیین اثر فاکتورهای ساخت بر عملکرد سازه ای و مشخص کردن بهترین شرایط ساخت برای این نوع از ساختارهای کامپوزیتی می باشد. برای این کار، از روش طراحی آزمایش تاگوچی و نرم‌افزار کوآلی تک¹

تحمل شده توسط سازه ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده برای نمونه‌ها ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده قرار گرفته‌اند. بار ویژه عموماً از تقسیم حداکثر بار بر چگالی سازه به دست می‌آید، اما در این پژوهش به دلیل ثابت بودن تقریبی حجم تمامی سازه‌ها، بار ویژه از تقسیم حداکثر بار اعمالی (به کیلوگرم) بر جرم سازه محاسبه شده است. در شکل 18 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 نمونه‌ها ذکر شده است. در این نمودار، نمونه‌ها به ترتیب از کم‌ترین تا بیشترین نتیجه‌ی به دست آمده قرار گرفته‌اند.

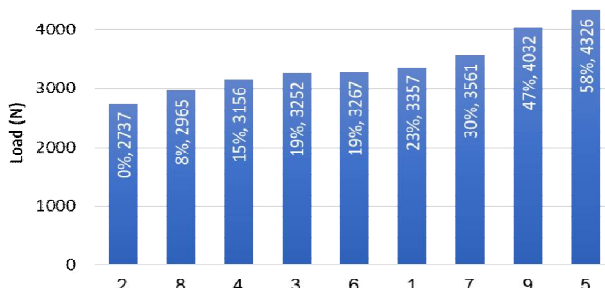


Fig. 17 Graph of the percentage difference of load bearing by structures compared to the minimum load bearing

شکل 17 نمودار درصد اختلاف بار تحمل شده توسط سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار تحمل شده

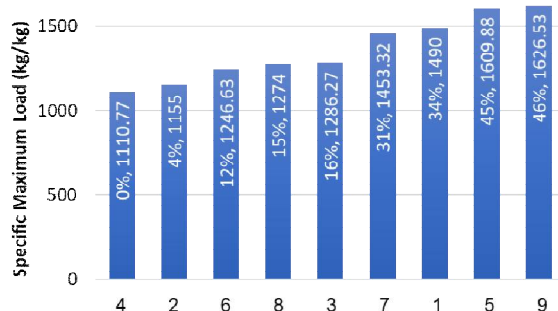


Fig. 18 Graph of the percentage difference of specific Load by structures compared to the minimum specific load

شکل 18 نمودار درصد اختلاف بار ویژه سازه‌ها در مقایسه با کمترین بار ویژه

از شکل‌های 17 و 18 مشاهده می‌شود که درصد اختلاف بار تحمل شده و بار تحمل شده ویژه، هر دو در نمونه‌های شماره 5 و 9 در مقایسه با نمونه‌های دیگر بیشتر است. این درصد اختلاف، تأثیر زیاد و مهم پارامترهای فرآیندی شامل کشش الیاف، دمای رزین و شرایط پخت بر باربری سازه‌ی پانل مشبک کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

¹ Qualitek

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 (1) و (2) محاسبه شده‌اند:

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

این پاسخ (η) که از تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط سازه (P_{MCL}) بر جرم سازه (W) به دست می‌آید، نشان دهنده‌ی حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه^۱ سازه است.

$$SEA = \frac{\text{سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی تا حداکثر نیرو}}{W} \quad (2)$$

برای محاسبه جذب انرژی مخصوص تنها وزن نمونه بین دو تکیه در نظر گرفته می‌شود [8].

الف - تحلیل برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

در ابتدای امر، اثرات اصلی فاکتورها مشخص و نمودار آن‌ها رسم شده است. نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه در شکل 20 آمده است.

در شکل 20 محور افقی، سطوح فاکتورها و محور عمودی، مقدار میانگین اثر اصلی فاکتورها را نشان می‌دهد. نمودارهایی که شیب خطوط کم است و تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهند (فاکتورهای فشار)، بیانگر کم اهمیت بودن آن فاکتور است. در تحلیل واریانس که نتایج آن در بخش بعدی آورده می‌شود، این فاکتور کم اثر در خطا ادغام می‌شوند.

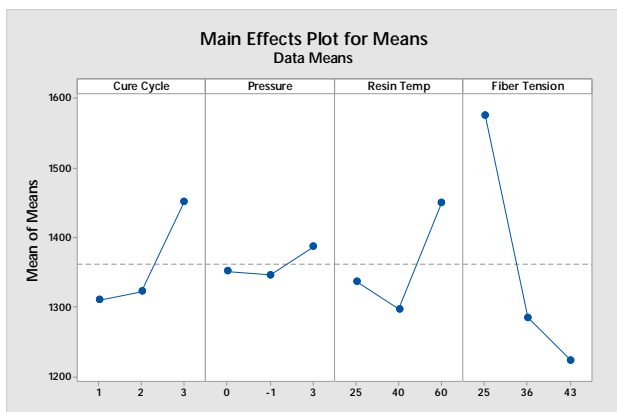


Fig. 20 Diagrams of the main effect of factors on the response variable of the maximum specific load

شکل 20 نمودارهای اثر اصلی فاکتورها بر متغیر پاسخ حداکثر بار ویژه

پاسخ، متغیر خروجی فرآیند و به عبارتی مشخصه‌ای است که در پایان انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری می‌شود و شرایط بهینه بر اساس نزدیک بودن به اهداف پاسخ مشخص می‌شود. پاسخ در

استفاده شده است. در این پروژه، چهار فاکتور در سه سطح به صورت 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 جذب انرژی مخصوص انجام شده‌اند و در نهایت بهینه‌سازی براساس حداکثر بار تحمل شده ویژه سازه صورت گرفته است.

3-4-1- تحلیل آماری

در جدول 7، طرح‌ریزی آزمایش‌ها (آرایه‌ی متعامد L9 تاگوچی) که سازه‌ها طبق آن ساخته و آزموده شده‌اند آورده شده است. در روش تاگوچی، 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.

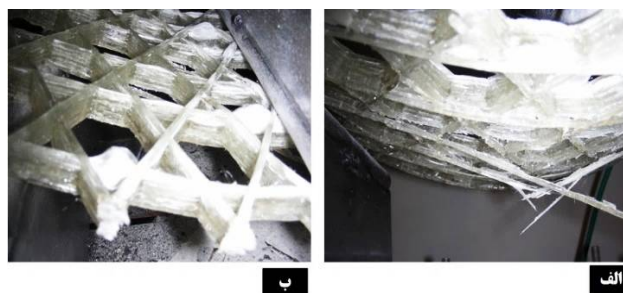


Fig. 19 a) Fracture in the underlying layers, b) Fiber buckling in the upper layers

شکل 19 الف) شکست در لایه‌های زیرین، ب) کمانش الیاف در لایه‌های رویی

جدول 7 جدول طرح‌ریزی آزمایشات

Table 7 Experimental planning table

شماره‌ی آزمایش	سیکل پخت	فشار	دمای رزین	کشش الیاف	پاسخ (حداکثر بار تحمل شده ویژه)	پاسخ (جذب انرژی مخصوص)
1	1	1	1	1	1490	192/51
2	1	2	2	2	1155	105/51
3	1	3	3	3	1286/27	208/85
4	2	1	2	3	1110/77	180/18
5	2	2	3	1	1609/88	188/13
6	2	3	1	2	1246/63	231/04
7	3	1	3	2	1453/32	148/98
8	3	2	1	3	1274	168/58
9	3	3	2	1	1626/53	222/53

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 که در جدول 2 مقادیر آن‌ها

¹ Maximum Carried-Load (MCL)

² Specific Maximum Carried-Load (SMCL)

³ Specific energy absorption

خطا 2 می‌باشند. برای شروع، از درصد اطمینان 99% در صورتی که نسبت واریانس هر پارامتر از 99 بیشتر باشد به معنی بامعنی بودن داده می‌باشد که هیچ کدام از پارامترها این شرایط را ندارند. درصد اطمینان بعدی که بررسی می‌شود 95% می‌باشد. در این سطح اطمینان در صورتی که نسبت واریانس هر پارامتر از 19 بیشتر باشد، به معنای بامعنی بودن آن پارامتر می‌باشد. همان طور که از جدول مشاهده می‌گردد، تنها پارامتر کشش الیاف، در این سطح اطمینان، معنادار می‌باشد. بنابراین این درصد اطمینان نیز مورد قبول نیست. سطح اطمینان بعدی 90% می‌باشد. در این درصد اطمینان در صورتی پارامترها معنادار می‌باشند که نسبت واریانس آن‌ها از 9 بیشتر باشد. با بررسی و مقایسه نتایج با جدول فیشر می‌توان گفت اثر همه فاکتورها در درصد اطمینان 90% معنی دار هستند و فاکتورها در این درصد اطمینان اهمیت دارند. خطای طرح آزمایشی نیز 3.97% 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 [14]. همچنین با توجه به درصد سهم فاکتورها، کشش الیاف با 72/53% و سپس دمای رزین و سیکل پخت با 11/99% و 11/67% 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 زیان یا میانگین مربعات انحراف¹ (MSD) محاسبه می‌شود. سپس نسبت S/N از MSD با استفاده از معادله (3) به دست می‌آید:

$$S/N = -10 \log_{10}(MSD) \quad (3)$$

برای حالتی که مشخصه‌ی کیفیت به صورت "هر چه بزرگتر، بهتر" باشد MSD با معادله (4) به دست می‌آید:

$$MSD = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots\right)}{r} \quad (4)$$

y_i پاسخ هر آزمایش و r تعداد تکرار می‌باشد.

شکل 21 مقدار نسبت S/N را در پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه نشان می‌دهد. نسبت S/N با استفاده از معادله (4) به دست آمده است و داده‌ها نشان می‌دهد که این نمودار همانند نمودار اثر اصلی پارامترها می‌باشد. نتایج مطالعات نسبت S/N نشان می‌دهد که در نسبت بالاتر S/N اثر پارامتر بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر شرایط بهینه پارامترهای آزمایش طبق این

این تحلیل "هر چه بزرگتر، بهتر" در نظر گرفته شده است [22]. بر این مبنا، در نمودارها نقاط بالاتر برای ما مطلوب هستند.

در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس (ANOVA) پرداخته شده است. در جدول 8، تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه آورده شده است.

جدول 8 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه

Table 8 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 (%)
سیکل پخت (C)	2	365859	18294/8	365859	-	12/6
فشار (P)	2	2873,35	1436/6	2873/35	-	0/99
دمای رزین (T)	2	37535,4	18767	37535/4	-	12/99
کشش الیاف (F)	2	211896	105948	211896	-	73/34
خطا	-	-	-	-	-	-
مجموع	8	288895				100

جدول 9 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی ویژه بعد از ادغام فاکتور فشار

Table 9 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 (%)
سیکل پخت (C)	2	365859	18294/8	33716/4	12/73	11/66
دمای رزین (T)	2	37535/4	18767	34662/1	13/06	11/99
کشش الیاف (F)	2	211896	105948	209023	73/74	72/53
خطا	2	2873/35	1436/6	-	-	3/97
مجموع	8	288895				100

همان طور که از جدول 9 قابل مشاهده است، فاکتور فشار، به دلیل کم اثر بودن، ادغام شده و درجه‌ی آزادی و مجموع مربعات آن به خطا افزوده شده است. فاکتورهایی که مجموع مربعات آن‌ها از 10% بزرگ‌ترین مجموع مربعات موجود کمتر باشد، باید ادغام شوند [22]. برای بررسی صحت نتایج از جدول فیشر استفاده می‌کنیم. درجه آزادی فاکتورها و درجه آزادی

¹ Mean Squared Deviation

ویژه انجام شده است (جدول 11). 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.

جدول 11 جدول بهینه‌سازی

Table 11 Optimization table

نوع پارامتر	شرایط بهینه	جواب پیش‌بینی شده
کشش الیاف	25 N	1778/9
فشار	3 bar	
شرایط پخت	4 hr @ 80 C + 4 hr @ 160 C	
دمای رزین	60 C	

همان‌طور که در جدول 11 ارائه شده است، پارامتر پاسخ، برای نمونه بهینه، بیشتر از 9 نمونه ساخته شده می‌باشد و این عدد برابر با 1778/9 نیوتن می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به تحلیل آماری-تجربی اثر پارامترهای ساخت بر استحکام پانل مشبک کامپوزیتی تحت آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که:

- از بین سیکل پخت‌های ارائه شده، سیکل پخت با دمای بالاتر تأثیر بیشتری بر افزایش استحکام و پخت کامل‌تر رزین خواهد داشت.

- اعمال فشار بر پخت پانل‌های مشبک کامپوزیتی، تأثیر اندکی بر افزایش استحکام خواهد داشت و همچنین ایجاد شرایط خلأ تأثیر اندکی بر کاهش استحکام خواهد داشت.

- گرم کردن رزین در حین آغشته سازی، بر میزان جذب رزین توسط الیاف تأثیرگذار است، به طوری که در دمای 40 درجه، رزین بیشتر از دمای 25 درجه جذب الیاف شده است و در دمای 60 درجه (حالت بهینه) میزان رزین کمتری نسبت به دمای 25 درجه جذب شده است.

- با توجه به استحکام الیاف شیشه، اعمال کشش بیش از N 25 به الیاف که معادل 70 N.m گشتاور پیچ قدرت می‌باشد باعث آسیب این الیاف می‌شوند و استحکام آن، کاهش می‌یابد. هرچند به صورت ظاهری این آسیب مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین کشش بیش از این مقدار توصیه نمی‌شود.

- کشش الیاف به اندازه 72/53%، دمای رزین 11/99% و سیکل پخت 11/67% بر متغیر پاسخ (استحکام خمشی ویژه) در درصد اطمینان 90% تأثیرگذار هستند و خطا در این طرح

نمودار، کشش الیاف سطح 1، دمای رزین سطح 3، سیکل پخت سطح 3 و فشار پخت سطح 3 می‌باشد. در مرحله‌ی بعدی به تحلیل واریانس برای متغیر جذب انرژی مخصوص با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت "هر چه بزرگتر، بهتر" پرداخته شده است (جدول 10).

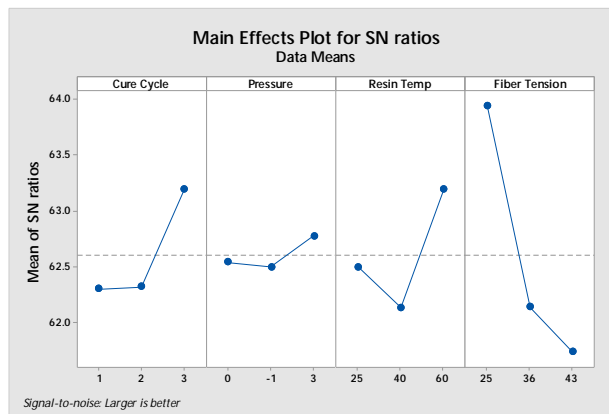


Fig. 21 Diagrams of S/N on the response variable of the maximum specific load

شکل 21 نمودارهای S/N بر متغیر پاسخ حداکثر بار ویژه

جدول 10 تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیر جذب انرژی مخصوص
Table 10 Analysis of variance (ANOVA) for specific energy absorption variable

درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مربعات خالص	ضریب معناداری	درصد سهم	فاکتورها
<i>f</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>S'</i>	<i>F</i>	<i>P (%)</i>	
2	1463/1	731/5	1463/1	0	12/15	سیکل پخت
2	7047/2	3523/6	7047/2	0	58/56	فشار
2	1177/4	588/7	1177/4	0	9/8	دمای رزین
2	2345/6	1172/8	2345/6	0	19/49	کشش الیاف
0	0	0	0	0	0	خطا
8	12033/33				100	مجموع

در جدول 10 با توجه به محاسبات انجام شده، هر چهار فاکتور در سطح اطمینان 90% معنادار هستند. سهم خطا نیز صفر است که نشان از صحت طراحی آزمایش انجام شده دارد. همچنین، فاکتورهای فشار با 58/56%، کشش الیاف با 19/49%، سیکل پخت با 12/15% و دمای رزین با 9/8% به ترتیب مؤثرترین عوامل بر جذب انرژی مخصوص پانل مشبک کامپوزیتی هستند.

3-5- بهینه‌سازی

فرآیند بهینه‌سازی برای متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده‌ی

- Taghavian, and E. Fotuhie, "Optimal Design of Annular Lattice Structures," *Journal of Science and today's world*, vol. 2, pp. 42-57, 2013.
- [11] J. Arashmehr, G. H. Rahimi, and S. F. Rasouli, "An Experimental and Numerical Investigation of a Grid Composite Cylindrical Shell Subjected to Transverse Loading," *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 59, pp. 755-762, 2013.
- [12] S. Grove, E. Popham, and M. Miles, "An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 804-812, 2006.
- [13] B. Ramesh, S. J. C. Sharan, and R. Kaviyalagan, "Experimental investigation and optimization in drilling GFRP polymeric composites using Taguchi and ANOVA," *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 2, pp. 52-60, 2013.
- [14] L. Dobrzanski, J. Domaga, and J. Silva, "Application of Taguchi method in the optimisation of filament winding of thermoplastic composites," *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, pp. 133-140, 2007.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] T. D. Kim, "Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel," *Composite Structures*, vol. 49, pp. 21-25, 2000.
- [18] Shokrie. M. Z., Behrooz. F., "Quality control of composite materials," 2006. (in persian)
- [19] Beheshti. M., Rezadoost. A., "Reinforced plastics (composites)," Iran Polymer Petrochemical Research Institute, 2011. (in persian)
- [20] Beheshti, M. H. and Rezadoust, A. M., "Reinforced plastics (composites)," In Persian, Iran Polymer and Petrochemical Research Institute, 2005.
- [21] Strong, E. B., "Basics of making composites (materials, methods and applications)," F. Divasalar and P. Abachi Trans., University Publishing Center, In Persian 2001.
- [22] Zeinali, A., "Taguchi experiment design using Qualitek software," Petrochemical Research and Technology Company, Tehran, 2008.
- آزمایش 3/97% می‌باشد. همچنین پارامتر فشار به میزان 0/99% که میزان کمی تأثیرگذار بوده و ادغام شده است.
- در پانل‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی عرضی، مدهای شکست عبارت‌اند از: شکست تحت کشش طولی در لایه‌های زیرین، کمانش و میکرو کمانش الیاف در لایه‌های رویی تحت کشش فشاری و برش عرضی در نزدیکی شرایط مرزی.

5- مراجع

- [1] Hua, S. V., "Principles of making composite materials," A. Pashaei, Trans., Isfahan University Jihad Publications, In Persian, 2013.
- [2] V. Vasiliev, V. Barynin, and A. Rasin, "Anisogrid lattice structures—survey of development and application," *Composite structures*, vol. 54, pp. 361-370, 2001.
- [3] V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, and A. F. Razin, "Anisogrid composite lattice structures—development and aerospace applications," *Composite structures*, vol. 94, pp. 1117-1127, 2012.
- [4] V. Vasiliev and A. Razin, "Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications," *Composite Structures*, vol. 76, pp. 182-189, 2006.
- [5] C. Gan, R. F. Gibson, and G. M. Newaz, "Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading," *Experimental mechanics*, vol. 44, pp. 185-194, 2004.
- [6] H. Fan, F. Meng, and W. Yang, "Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers," *Composite structures*, vol. 81, pp. 533-539, 2007.
- [7] 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.
- [8] P. Jadhav and P. R. Mantena, "Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading," *Composite structures*, vol. 77, pp. 353-363, 2007.
- [9] G. Totaro and F. De Nicola, "Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launchers," *Acta Astronautica*, vol. 81, pp. 570-577, 2012.
- [10] J. E. Jam, M. Noorabadi, N. Namdaran, H.