



بررسی تجربی، عددی و بهینه‌سازی اثر اتصال چسبی تقویت‌کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق‌های مشبک کامپوزیتی

علی عارفی اسگوی¹، علی داور^{2*}، محمدحسین علایی³، امین میرزایی¹، محسن حیدری بنی⁴، جعفر اسکندری جم⁵

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی اثر اتصال چسبی بر رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. به منظور ساخت پانل کامپوزیتی مشبک، قالب فومی طراحی و ساخته شد و سپس از روش لایه‌چینی دستی برای ساخت تقویت‌کننده‌ها استفاده گردید. پس از اتمام ساخت تقویت‌کننده‌ها، در سطح تماس تقویت‌کننده‌ها با پوسته کامپوزیتی، از چسب آکسون H 9940 BK به عنوان ایجاد سطح اتصال بین صفحه کامپوزیتی و تقویت‌کننده برای نمونه اول و رزین LR520 برای نمونه دوم استفاده شد. نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمون تجربی خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. در این راستا به جهت تعیین خواص مکانیکی پارچه کربن، الیاف کربن، رزین و چسب، از آزمون‌های استاندارد استفاده شد. از نتایج حل عددی، جهت بررسی اندازه هندسه سلولی، پهنا و ضخامت، به منظور بهینه‌سازی و دست یافتن به استحکام خمشی ویژه و سفتی ویژه بالا در هندسه سلولی مربعی استفاده گردید. روش طراحی آزمایش به جهت تعیین تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. از مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی، مشاهده شد که اتصال چسب آکسون نسبت به رزین، نیروی بیشتری را قبل از شروع تخریب و ایجاد آسیب در سازه تحمل می‌کند. در بررسی اثرات ضخامت و پهنا تقویت‌کننده بر رفتار خمشی پانل مشبک مشخص شد که افزایش ضخامت تا مقدار 14.87 میلی‌متر و پهنا تا مقدار 8.7 میلی‌متر باعث افزایش نیروی بیشینه ویژه می‌گردند.

دریافت: 1400/10/08

پذیرش: 1400/12/23

کلیدواژه‌ها

ورق مشبک کامپوزیتی، اتصال چسبی، استحکام خمشی، اتصال مکانیکی

Experimental, Numerical Investigation and Optimization of Effect of Adhesive Joint on Flexural Behavior of grid-stiffened Composite Plates

Ali Arefi Osgoui¹, Ali Davar^{2*}, Mohammad Hossein Alaei³, Amin Mirzaei¹, Mohsen Heydari Beni¹, Jafar Eskandari Jam¹

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

2- Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

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

Keywords

Lattice Composite Plates, Adhesive Joint, Flexural Strength, Mechanical Joint

Abstract

In this research, numerical and experimental investigations were performed to study the effect of the adhesive joint on the fractural behavior of the grid-stiffened composite plates. Foam format was designed to construct two samples of lattice composite plates, and the hand layup technique was used to prepare the ribs. Finally, the obtained ribs were connected to the composite shell in the interface of ribs with shell using Axson H9940 BK for first sample and LR520 resin adhesives for second sample. The prepared samples were analyzed using the three-point bending test. For this purpose, a test fixture was designed and constructed. The standard test of the crack release energy in the first and second mode, tensile test, and nol test were performed to evaluate the mechanical properties of the carbon cloth, carbon fibres, resin, and adhesive. The numerical solution of the problem and comparing the obtained results with experimental data revealed that the Axson adhesive connections can tolerate more force in comparison with resin adhesive connections before structure destruction.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Arefi Osgoui, A., Davar, A., Alaei, M. H., Mirzaei, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental, Numerical Investigation and Optimization of Effect of Adhesive Joint on Flexural Behavior of grid-stiffened Composite Plates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1687-1699, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.544900.1764>

1- مقدمه

یک سازه کاربردی متشکل از چند قسمت مختلف است که برحسب نیاز با تنوعی از اتصالات به یکدیگر متصل می‌شوند. با جایگزینی کامپوزیت‌های پلیمری بجای فولاد و آلومینیوم، باهدف سبک‌سازی در سازه‌های هوایی گرچه برخی از مشکلات بهبود می‌یابد اما موضوع اتصال در کامپوزیت به‌سادگی اتصال فلزات نیست. سوراخ‌کاری و رزوه زنی باعث ایجاد نقاط بحرانی در سازه‌های کامپوزیت پایه پلیمری می‌شود [1]. تقسیم‌بندی‌های گوناگونی از اتصالات کامپوزیتی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته اتصال مکانیکی، اتصال چسبی و اتصال ترکیبی تقسیم‌بندی کرد. اتصالات مکانیکی نظیر پیچ و مهره، دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. از مزایای این‌گونه اتصالات می‌توان به مواردی همچون سادگی انجام اتصال، آسیب‌پذیری کمتر نسبت به عوامل محیطی، امکان باز و بسته کردن اشاره کرد. همچنین از معایب این‌گونه اتصالات می‌توان به مواردی نظیر ایجاد تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌ها، از بین رفتن پیوستگی الیاف در اثر سوراخ‌کاری و مقاومت کم آن‌ها در برابر بارهای نوسانی و خستگی اشاره کرد [2]. در اتصالات چسبی تنش بر روی کل سطح ناحیه اتصال توزیع می‌شود و برخلاف اتصال مکانیکی تمرکز تنش در محل اتصال ایجاد نمی‌شود. همچنین این‌گونه اتصالات مقاومت خوبی در برابر بارهای نوسانی و خستگی دارند. در مقابل، چسب‌ها نسبت به‌قرار گرفتن در معرض رطوبت دچار افت خواص می‌شوند و تغییرات دما نیز بر روی سفتی آن‌ها تأثیرگذار است. به‌گونه‌ای که در دماهای بالاتر از دمای گذار شیشه‌ای چسب، کاملاً منعطف خواهد شد. ازجمله معایب دیگر چسب‌ها می‌توان به ضعف آن‌ها در برابر تنش‌های پوسته‌کنی اشاره کرد [3]. در اتصالات چسبی، چسب با ایجاد یک لایه بین دو قطعه مورد اتصال، آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌نماید. اتصال چسبی متداول‌ترین نوع اتصال در سازه‌های کامپوزیتی است و به‌منظور برطرف کردن مشکلات مربوط به خواص لهدیگی، لمینیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، توسعه داده شده‌اند.

چون هر^۲ [4] در تحقیقی، مدل دوبعدی اتصال یک‌طرفه و همچنین اتصال دوطرفه دو فلز تحت کشش را در حالت الاستیک مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، معادلات حاکم بر تنش برشی ایجاد شده در لایه چسبی موردبررسی قرار داده شد. هارت اسمیت^۳ [5] در تحقیق خود لایه‌ها را به‌صورت الاستیک و از یک جنس و با ضخامت یکسان و لایه چسب میانی را به‌صورت پلاستیک مدل نمود. وی در ادامه، شکست در این اتصال را در اثر اعمال کشش بررسی کرد. احمد و همکاران [6] برخلاف سایر تحلیل‌های انجام‌شده، ضخامت لایه‌ی چسبی را متفاوت در نظر گرفته و همچنین لایه‌ها را به‌صورت ساده مدل‌سازی نمودند. زو^۴ و همکاران [7] مدل دوبعدی اتصال چسبی یک‌طرفه و اتصال تسمه‌های یک‌طرفه فلز با ماده مرکب تحت کشش را مورد بررسی قرار دادند. آویلا^۵ و همکارش [8] در تحقیق خود دو اتصال یک‌طرفه از مواد مرکب شیشه-اپوکسی تحت کشش را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج به‌دست‌آمده را با روش عددی مقایسه نمودند. مورا^۶ و همکاران [9] در سال 2008 خواص مکانیکی چسب Resin Tech RT153FC را موردبررسی قرار داده و بر اساس آزمون‌های تجربی، استاندارد انرژی شکست مود اول و دوم را بیان کردند. آن‌ها هدف از انجام این تحقیق را بررسی ضخامت چسب، جهت مقایسه خواص مکانیکی عنوان کردند. جاده‌او^۷ و همکاران [10] در تحقیقی

جهت بررسی مشخصات جذب انرژی پانل‌های کامپوزیتی مشبک با هندسه سلول مثلثی^۸ تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی پرداختند. در این تحقیق، از الیاف شیشه و از پروپیلن به‌عنوان ماتریس و اتصال چسبی استفاده کرده بودند. آن‌ها آزمون و شبیه‌سازی‌های المان محدود را بر روی پانل‌های ایزوگرید تحت بار خمشی سه‌نقطه‌ای انجام دادند. ژانگ^۹ و همکاران [11] روش شکست پیشرفته‌ای را به‌منظور شبیه‌سازی و پیشرفت مدهای شکست چندگانه صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی مشبک، بر اساس یک مدل المان تقویت‌شده مثلثی بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق چسبندگی بین ورق و مشبک را از جنس اپوکسی انتخاب کردند. طحانی و همکاران [12] اولویت قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها را از لحاظ بیشینه استحکام ورق مشبک کامپوزیتی، به ترتیب نمونه با سلول واحد به شکل مربعی درشت، مربعی ریز، مثلثی و لوزی و از لحاظ حداکثر سفتی ویژه، به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، لوزی و مثلثی ارزیابی نمودند. آذر افزا و همکاران [13] در تحقیقی به بررسی ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک پرداختند. در این تحقیق، سه نمونه کامپوزیت با جنس و ضخامت مختلف با روش لایه‌گذاری دستی در قالب سیلیکونی صورت گرفت و تحت آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای، نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش تجربی نشان داد که حتی بعد از واماندگی پوسته، هسته مشبک به تحمل بار ادامه می‌دهد و پس از شکست تقویت‌کننده‌ها آسیب وارد پوسته می‌شود. داور و همکاران [14] با انجام آزمون‌های تجربی و با کمک نرم‌افزار آباکوس، به بررسی تجربی و عددی ضربه سرعت پایین در پانل ساندویچی با هسته مشبک پرداخته شده است. برای انجام آزمون ضربه سرعت پایین، دو پانل ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده و تحت بارگذاری سقوط آزاد ضربه زنده با نوک نیم کروی قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی عددی، از انواع المان‌های سه‌بعدی و حل آسیب پیش‌رونده به کمک برنامه‌نویسی با زبان فورترن در نرم‌افزار، کمک گرفته شده است.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تجربی و عددی اثر اتصال چسبی در ورق‌های کامپوزیتی مشبک بر رفتار خمشی است. برای این منظور دو نوع ورق کامپوزیتی مشبک با اتصال چسب آکسون H 9940 BK و رزین LR520 در نظر گرفته شد. برای ساخت این ورق‌ها، قالب فومی طراحی و ساخته شد. از روش لایه‌چینی دستی جهت فرآیند ساخت استفاده شد. نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمون تجربی خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفت که برای این منظور قید و بند طراحی و ساخته شد. برای بررسی درستی نتایج به‌دست‌آمده تحلیل عددی نیز انجام شده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. از حل عددی، به بررسی اندازه هندسه سلولی، پهنا و ضخامت، جهت بهینه‌سازی و دست یافتن به استحکام خمشی ویژه و سفتی ویژه بالا در هندسه سلولی مربعی استفاده گردید. به کمک روش طراحی آزمایش تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی عددی، تعیین شده است.

2- روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا مراحل ساخت سازه‌ی پانل مشبک کامپوزیتی شامل مدل‌سازی و تهیه نقشه ساخت برای قالب، نحوه‌ی رشته‌پیچی و پخت سازه تشریح شده است. در بخش بعدی، مراحل مدل‌سازی عددی این نوع سازه‌ها تشریح شد. سپس اصول بهینه‌سازی و روش طراحی آزمایش‌ها تبیین شده است. در بخش آخر به بهینه‌سازی متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده در

⁶ De Moura⁷ Jadhav⁸ Isogrid⁹ Zhang¹ TG² Shih-Chuan Her³ Hart Smith⁴ Zou⁵ Avila

زمینه کامپوزیت مشبک با یکدیگر ترکیب شده است. رزین استفاده شده LR520 و هاردنر استفاده شده HY 520 می‌باشد. در مرحله بعد الیاف کربن T700 12K را به رزین آماده شده آغشته و در شیارهای قالب فومی که به اصطلاح ریب گفته می‌شود، جای گذاری می‌شوند که در شکل 2 نشان داده شده است. این مرحله تا زمان ایجاد ضخامت مورد نیاز تکرار می‌شود. پس از اتمام این مرحله بر روی سطح ایجاد شده از رشته‌های کربن، چسب آکسون H 9940 BK به صورت یکنواخت زده می‌شود و هدف از این کار ایجاد اتصال چسبی است که در شکل 3 نشان داده شده است.

پارچه‌های کربن T300 بریده شده به منظور ساخت پوسته به رزین آغشته شده و بر روی قالب فومی قرار می‌گیرند. این عمل تا ایجاد ضخامت 4 میلی‌متری تکرار می‌شود، که در شکل 4 نشان داده شده است.

به منظور تکمیل فرآیند ساخت، پس از اتمام لایه چینی، به کمک روش وکیوم رزین اضافی و حفره‌های هوای موجود در سازه تخلیه می‌شود. در این روش با استفاده از نایلون یک محیط ایزوله و عایق ایجاد می‌شود و با ایجاد فشار 0.9- بار هوای داخل سازه به صورت کامل تخلیه می‌شود. این کار در دمای محیط و به مدت 3 ساعت انجام می‌گیرد. شکل 5 نحوه استفاده از روش وکیوم را نشان می‌دهد.



Fig. 2 Lay-up of sample grid stiffness and resin joint
شکل 2 لایه‌چینی تقویت‌کننده‌های نمونه و ایجاد اتصال رزین



Fig. 3 Lay-up of sample grid stiffness and adhesive joint
شکل 3 لایه‌چینی تقویت‌کننده‌های نمونه و ایجاد اتصال چسبی

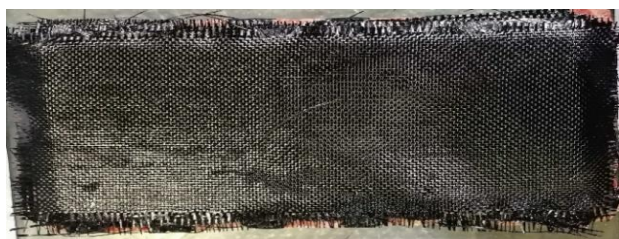


Fig. 4 Lay-up shell on grid stiffness
شکل 4 لایه‌چینی پوسته بر روی تقویت‌کننده‌ها

این پژوهش اشاره شده است.

1-2- طراحی و ساخت نمونه تجربی

مراحل ساخت سازه‌ی مورد نظر بدین ترتیب است که ابتدا طرح دوبعدی سازه مشبک از برنامه استخراج شده و به کمک دستگاه CNC یک قالب از جنس فوم ساخته شد، سپس با استفاده از روش لایه‌چینی دستی، الیاف درون شیارهای قالب فومی رشته‌پیچی شده تا سازه مشبک شکل بگیرد. پس از اتمام رشته‌پیچی، صفحه لمینیت کامپوزیتی بر روی سازه مشبک لایه‌چینی می‌شود. به کمک روش ایجاد خلأ، رزین اضافی و حفره‌های هوای موجود در سازه تخلیه می‌شود. در آخرین مرحله سازه در کوره پخت می‌گردد.

ابعاد ورق کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM D7264، 300×125 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سلول‌ها با هندسه مربعی 50 میلی‌متری با ضخامت تقویت‌کننده 8 میلی‌متر و پهنای ریب 6 میلی‌متر و همچنین ضخامت پوسته 4 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

1-1-2- مواد و ترکیبات

برای ساخت صفحه مشبک از الیاف کربن T700 استفاده شده است. رزین مورد استفاده معادل رزین اپوکسی و سخت‌کننده بوده و به نسبت 4 به 1 طبق دستور سازنده مخلوط شده‌اند. در جدول 1 نوع الیاف و رزین به کار رفته ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات الیاف و رزین

مشخصه	سازنده	پارامتر
LR520 (4)	پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران	رزین
HY520 (1)	پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران	هاردنر
Carbon Fabric T300	ACP	پارچه کربن
Carbon Fiber T700	ACP	الیاف کربن
H 9940 BK	Sika	چسب آکسون

2-1-2- ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت کامپوزیت‌های مشبک از روش لایه‌چینی دستی بر روی قالب فومی استفاده گردید. در این روش یک بلوک فومی به کمک دستگاه CNC تراش داده شده و به عنوان قالب فومی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل 1 نمونه قالب فومی نشان داده شده است.



Fig. 1 Sample of grooved foam mold
شکل 1 نمونه قالب فومی شیاردار

در مرحله ساخت نمونه، به جهت جلوگیری از اتصال مخرب بین سازه و قالب فومی از واکس HL620 استفاده شد تا یک لایه بسیار نازک بر روی قالب فومی شکل بگیرد. رزین و هاردنر با نسب جرمی 4 به 1 به منظور ساخت فاز

سنتام به کد STM-150 با ظرفیت 15 تن انجام شده است. شکل 8 نحوه انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

2-2-1- آزمون‌های خواص مواد

به منظور مدل کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس، نیاز به ثوابت مهندسی تقویت‌کننده و پوسته است. آزمون‌های تجربی جهت تعیین خواص مواد با استفاده از دستگاه سنتام و بر اساس استاندارد مربوطه انجام شده است. در ابتدا بر اساس آزمون استاندارد کشش ASTM D3039، 3 نمونه چندلایه کامپوزیتی جهت کشش آماده شده است که در شکل 9 قابل مشاهده است. بر اساس آزمون کششی انجام شده، ثوابت مهندسی پارچه و الیاف کربن در جدول 2 آورده شده است. و در شکل 10 نمودار تنش-کرنش قابل مشاهده می‌باشد.



Fig. 8 Perform three-point bending test

شکل 8 انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای



Fig. 9 Multi-layer composite samples for tensile testing

شکل 9 نمونه‌های چندلایه کامپوزیت جهت آزمون کشش

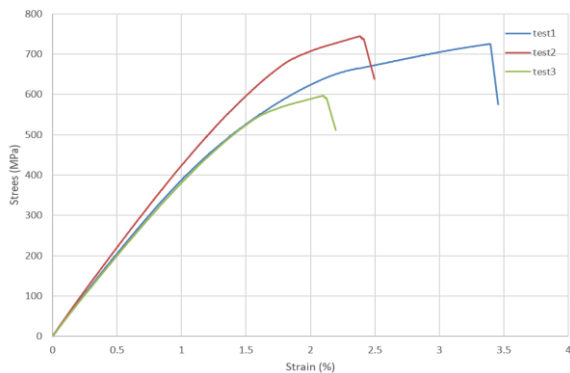


Fig. 10 Stress-strain diagram of laminated composite

شکل 10 نمودار تنش-کرنش چندلایه کامپوزیتی

پس از اتمام مرحله وکیوم سازه آماده شده، سیکل پخت خود را در دمای محیط می‌گذرانند. سپس در آن با دمای 60 درجه به مدت 10 ساعت پخت می‌شود. در شکل 6 نمایی از آن نشان داده شده است. شکل 7 نمونه آماده شده ورق کامپوزیتی مشبک را نشان می‌دهد. جهت ساخت نمونه دوم در ناحیه اتصال بین پوسته و تقویت‌کننده از رزین اپوکسی LR520 استفاده گردیده و فرآیند ساخت مطابق نمونه اول تکرار شده است.



Fig. 5 Using the vacuum method to drain excess air and resin

شکل 5 استفاده از روش وکیوم جهت تخلیه هوا و رزین اضافی



Fig. 6 View of the the Oven to apply temperature

شکل 6 نمایی از آن جهت اعمال دما

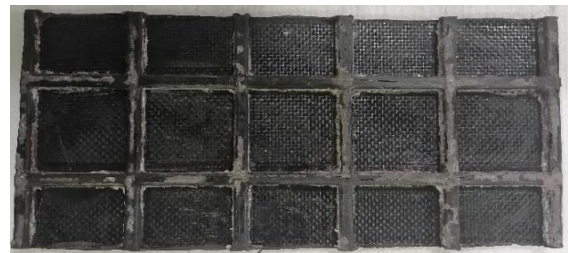


Fig. 7 Grid stiffened composite plate after completing the manufacturing process

شکل 7 ورق کامپوزیتی مشبک پس از تکمیل فرآیند ساخت

2-2-2 آزمون‌های تجربی

پس از اتمام ساخت نمونه‌ها، به منظور بررسی رفتار خمشی، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای استفاده گردیده است. در این آزمون، ورق کامپوزیتی مشبک بر اساس استاندارد ASTM D7264 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مورد نیاز برای آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، قید و بندی طراحی و ساخته شد. سرعت بارگذاری طبق استاندارد ذکر شده 2 میلی‌متر بر دقیقه است که شرایط بارگذاری شبه استاتیکی را فراهم می‌سازد. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، توسط دستگاه آزمون کشش و فشار شرکت

بر اساس آزمون استاندارد نتایج DCB و ENF با روابط 1 و 2 به ترتیب انرژی شکست مود اول و انرژی شکست مود دوم در جدول 3 و جدول 4 بیان گردیده است. و نمودار نیرو-جابجایی برای آزمون‌های استاندارد DCB در شکل 15 و شکل 16 و برای آزمون ENF در شکل 17 و شکل 18 قابل مشاهده است.

$$G_I = \frac{3 P^2 C^2}{2 A_1 b h} \quad (1)$$

$$G_{II} = \frac{3 m P_{max}^2 a_{pc}^2}{2 B} \quad (2)$$



Fig. 13 Samples prepared for DCB and ENF tests

شکل 13 نمونه‌های تهیه‌شده برای آزمون ENF و DCB

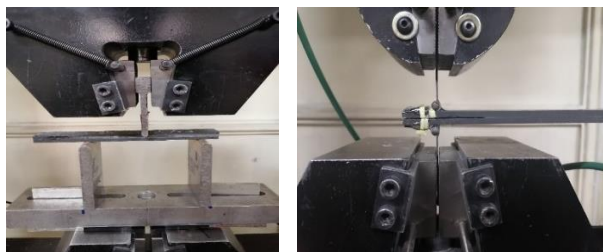


Fig. 14 To the right of the DCB standard test and to the left of the ENF standard test

شکل 14 سمت راست آزمون استاندارد DCB و سمت چپ آزمون استاندارد ENF

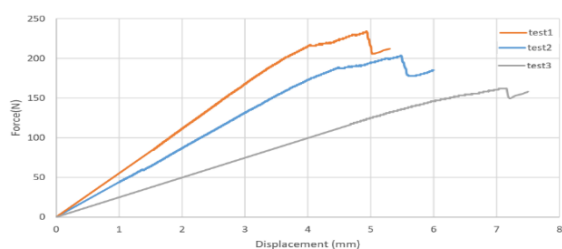


Fig. 15 Force- displacement diagram of DCB test adhesive

شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی چسب آزمون DCB جهت تعیین انرژی شکست مود اول

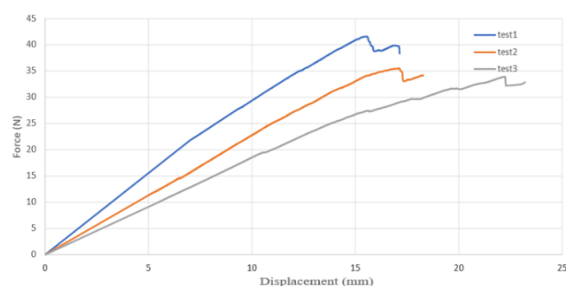


Fig. 16 Force- displacement diagram of DCB test resin

شکل 16 نمودار نیرو-جابجایی رزین آزمون DCB جهت تعیین انرژی شکست مود اول

جهت تعیین مدول الاستیک و استحکام کششی ریب‌های تقویت‌شده کامپوزیتی از آزمون حلقه استفاده می‌شود. نمونه‌های این آزمون طبق استاندارد ASTM D2290 ساخته و با کمک دستگاه کشش مورد آزمون قرار می‌گیرد. در شکل 11 نحوه آزمون کشش حلقه و نمونه‌های آزمون حلقه قابل مشاهده است.

نتایج آزمون حلقه بر اساس استاندارد ذکرشده برای نمونه‌های الیاف کربن به صورت منحنی‌های تنش- کرنش در شکل 12 نشان داده شده است. بر اساس شیب نمودار تنش- کرنش پارامتر مدول طولی تعیین می‌گردد که در جدول 2 قابل مشاهده است.

در ادامه بر اساس آزمون تجربی DCB و ENF در اتصال چسب و رزین بر اساس استاندارد ASTM D7905 و ASTM D5528، 3 نمونه از هر آزمون آماده گردیده است که نحوه آماده‌سازی نمونه هر دو آزمون یکسان بوده و در شکل 13 قابل مشاهده می‌باشد. سپس با استفاده از دستگاه سننم ذکر شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد که در شکل 14 قابل مشاهده است.

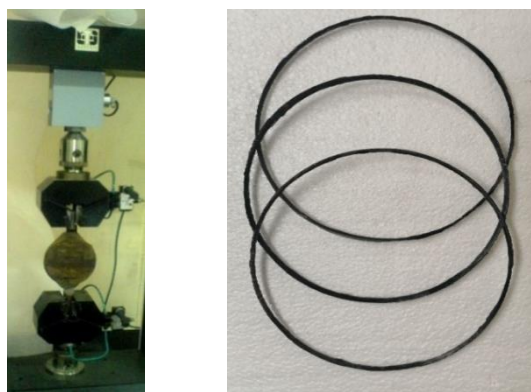


Fig. 11 Samples of ring test and ring tension test

شکل 11 نمونه‌های آزمون حلقه و آزمون کشش حلقه

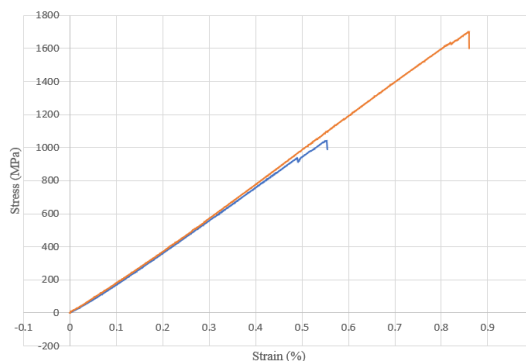


Fig. 12 Stress-strain diagram of the ring test

شکل 12 نمودار تنش- کرنش آزمون حلقه

جدول 2 ثوابت مهندسی پارچه و الیاف کربن

Table 2 Engineering constants of carbon fibers and textile

مقدار (MPa)	ثوابت مهندسی الیاف کربن	مقدار (MPa)	ثوابت مهندسی پارچه کربن
E ₁	170000	E ₂	42000
E ₂	10000	G ₁₂	5000
G ₁₂	5000	V ₁₂	0.1
V ₁₂	0.3		

شده است. برای مش‌بندی از المان پوسته پیوسته SC8R استفاده شده است. از تئوری تخریب هشین¹ به‌منظور پیش‌بینی تخریب در سازه استفاده شده است. شکل 19 نمای شماتیک از مدل‌سازی، مش‌بندی و شرایط تکیه‌گاهی سازه را نشان می‌دهد. شکل 20 شرایط مرزی و نقاط مرجع را نشان می‌دهد.

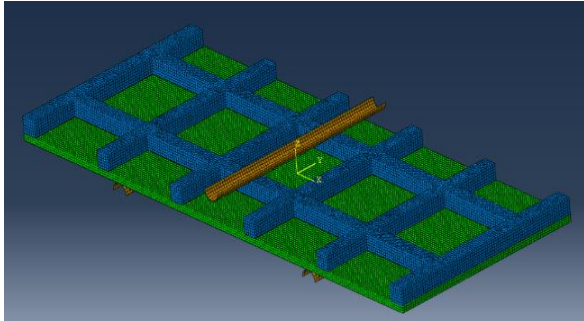


Fig. 19 Schematic view of modeling

شکل 19 نمای شماتیک مدل‌سازی

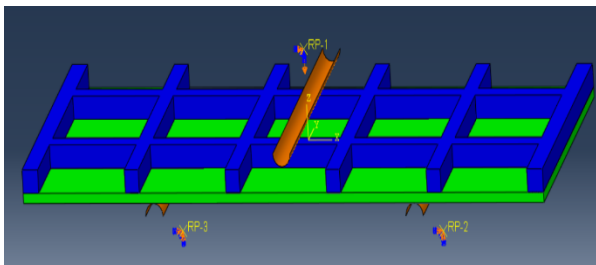


Fig. 20 Boundary conditions and reference points

شکل 20 شرایط مرزی و نقاط مرجع

پس از مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی، با توجه به اعمال بارگذاری با یک نرخ ثابت جابجایی و همچنین شبه استاتیکی بودن مسئله، در مرحله تعیین نوع آنالیز، تحلیل به‌صورت استاتیکی انتخاب شد و در ادامه به‌منظور اتصال بین تقویت‌کننده‌ها از اتصال چسبی استفاده شده است. به‌منظور دستیابی به بهترین نتایج حل عددی مسئله، این تحلیل با تعداد المان‌های متفاوت انجام شد. در انتها با افزایش تعداد المان‌های در نظر گرفته شده، جواب‌های به‌دست‌آمده همگرایی مناسبی داشته‌اند. با توجه به شکل 21 تعداد 19500 المان برای رسیدن به جواب مناسب کافی است.

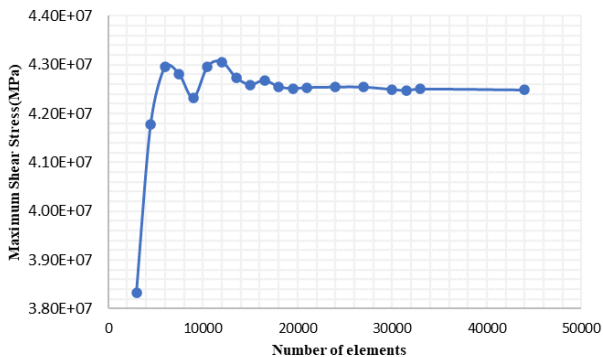


Fig. 21 Convergence diagram of the number of elements

شکل 21 نمودار همگرایی تعداد المان

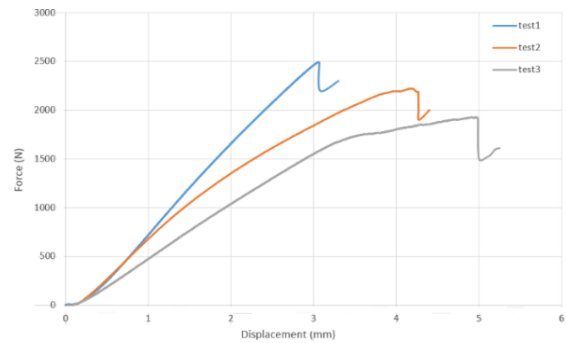


Fig. 17 Force-displacement diagram of ENF test adhesive

شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی چسب آزمون ENF جهت تعیین انرژی شکست مود دوم

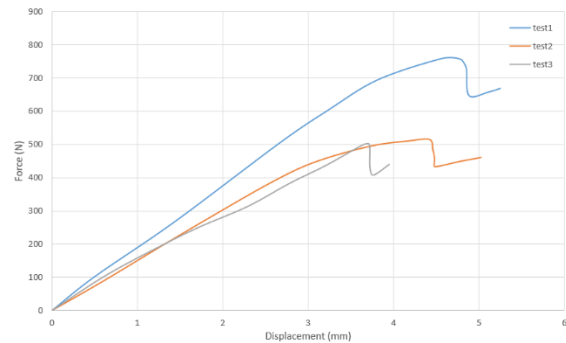


Fig. 18 Force-displacement diagram of ENF test resin

شکل 18 نمودار نیرو-جابجایی رزین آزمون ENF جهت تعیین انرژی شکست مود دوم

جدول 3 مقادیر آزمون DCB برای چسب و رزین جهت تعیین انرژی شکست مود اول
Table 3 DCB test values for adhesives and resins to determine the failure energy of the first mode

نمونه	مقادیر مود اول چسب (KJ/m ²)	مقادیر مود اول رزین (KJ/m ²)
نمونه اول	0.45	0.5
نمونه دوم	0.35	0.4
نمونه سوم	0.25	0.3

جدول 4 مقادیر آزمون ENF برای رزین و چسب جهت تعیین انرژی شکست مود دوم
Table 4 ENF test values for adhesives and resins to determine the failure energy of the second mode

نمونه	مقادیر مود اول چسب (KJ/m ²)	مقادیر مود اول رزین (KJ/m ²)
نمونه اول	2.7	1.12
نمونه دوم	2.9	1.23
نمونه سوم	3.12	1.4

3-2- شبیه‌سازی اجزاء محدود

به‌منظور بررسی صحت نتایج تجربی از شبیه‌سازی اجزاء محدود استفاده شده و شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. در مرحله مدل‌سازی، با توجه به ابعاد و اندازه‌های ذکر شده برای پوسته و تقویت‌کننده‌ها در محیط گرافیکی نرم‌افزار آباکوس سازه مدل‌سازی هندسی شده و مدل‌سازی شرایط تکیه‌گاهی بر اساس استاندارد ASTM D7264 مدل

¹ Hashin

3- نتایج و بررسی

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمون تجربی ورق کامپوزیتی مشبک ارائه شده است. شکل 22 نمونه آزمون شده را بعد از آسیب نشان می‌دهد.

مطابق شکل 23 نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی، نمونه کامپوزیت مشبک با اتصال چسب آکسون قابل مشاهده است. نتایج تجربی و عددی که شامل نیرو، جابجایی و جذب انرژی در جدول 7 بررسی و مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در شکل 23 نمودار عددی و تجربی تا نقطه تخریب که بیانگر بیشترین نیروی قابل تحمل سازه است، رسم شده است.



(الف - a)



(ب - b)

Fig. 22 a) Tested sample for adhesive joint structure b) Tested sample for resin joint structure

شکل 22 الف) نمونه بعد از انجام آزمون برای سازه اتصال چسبی ب) نمونه بعد از انجام آزمون برای سازه اتصال رزین

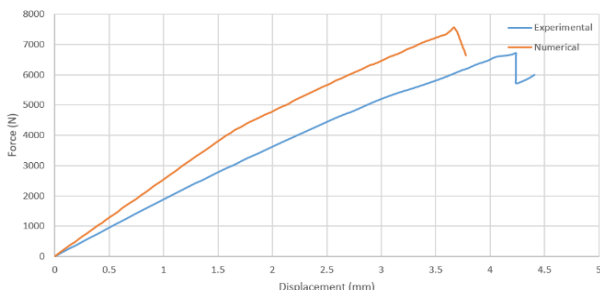


Fig. 23 Numerical and experimental results of joint samples with Axson adhesive

شکل 23 نتایج عددی و تجربی نمونه اتصال با چسب آکسون

4-2- طراحی آزمایش¹

به دلیل وجود مقادیر کمی زیاد در هر یک از متغیرهای ذکر شده، و عدم توانایی در انجام شبیه‌سازی و استخراج نتایج جهت تعیین نمونه بهینه، محث طراحی آزمایش جهت کاهش زمان و سهولت در انتخاب تعداد نمونه شبیه‌سازی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته شده است.

در راستای انجام این پژوهش، از طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح استفاده شده است.

1-4-2- روش سطح پاسخ

این روش برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مورد استفاده است. در این روش، پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌شود. بسته به آن که طراحی آزمایش فقط بین دو محدوده (حد بالا و حد پایین) و یا خارج باشد، به ترتیب از دو روش باکس-بنکن² و مرکب مرکزی استفاده می‌شود.

در راستای پژوهش انجام شده جهت بررسی اندازه سلول، ضخامت و پهنای تقویت‌کننده از روش سطح پاسخ استفاده شده است که در جدول 5 پارامترها و متغیرها نشان داده شده است.

بر اساس استفاده از روش سطح پاسخ، و داده‌های متغیر به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت³ آزمایش‌ها مشخص می‌گردد. جدول 6 تعداد آزمایش‌ها را بر اساس ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و سایز هندسه ابعادی نشان می‌دهد.

جدول 5 پارامترها و سطوح تعیین شده

Table 5 Parameters and levels set

پارامتر	سطوح	واحد
ضخامت	5 الی 20	میلی متر
پهنای تقویت‌کننده	6 الی 10	میلی متر
سایز سلول	50 الی 100	میلی متر

جدول 6 جدول طرح‌ریزی آزمایش‌ها

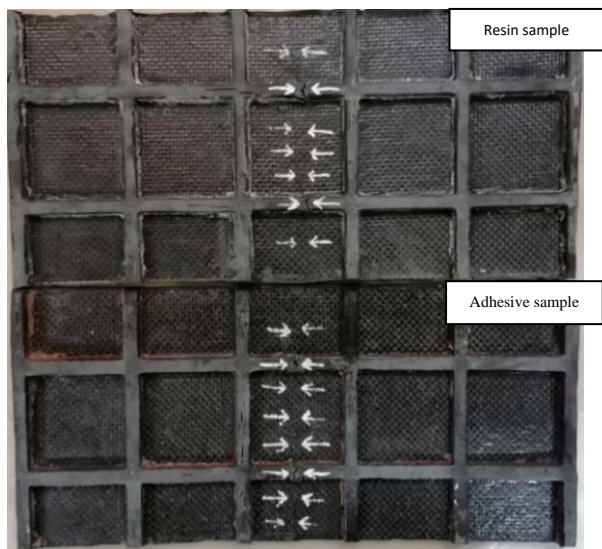
Table 6 Experimental design table

شماره نمونه	عامل شماره 1 ضخامت ریب (mm)	عامل شماره 2 عرض ریب (mm)	عامل شماره 3 هندسه تقویت‌کننده (Cm ²)
1	8.8	7.81057	5
2	6.28	8.20492	7.25
3	11.6	10	7.925
4	20	10	8.125
5	6.28	8.20492	7.25
6	6	10	10
7	13.7	6.08	7.25
8	15.8	6	5
9	20	7.6	8.125
10	20	7.48	5
11	14.4	8.2	6.5
12	6	6	5
13	6	6	10
14	13.7	6.08	7.25
15	13.7	8.2	9.90813
16	20	10	8.125
17	13.7	8.2	9.90813
18	20	6	10
19	13.7	8.2	9.90813
20	11.25	10	5

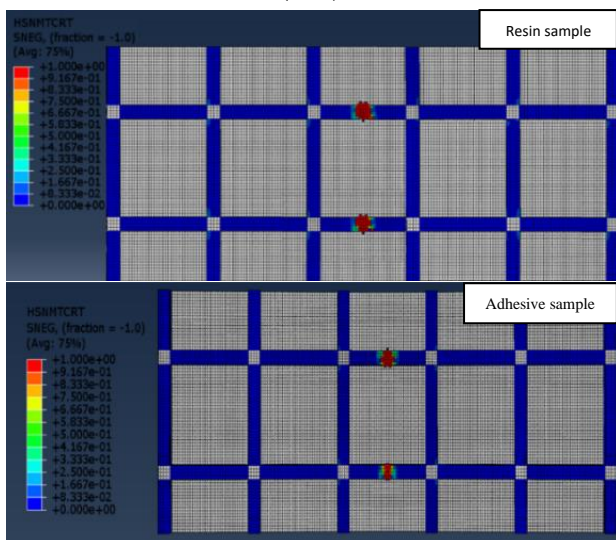
¹ Design of Experiment

² Box-Behnken

³ Design Expert



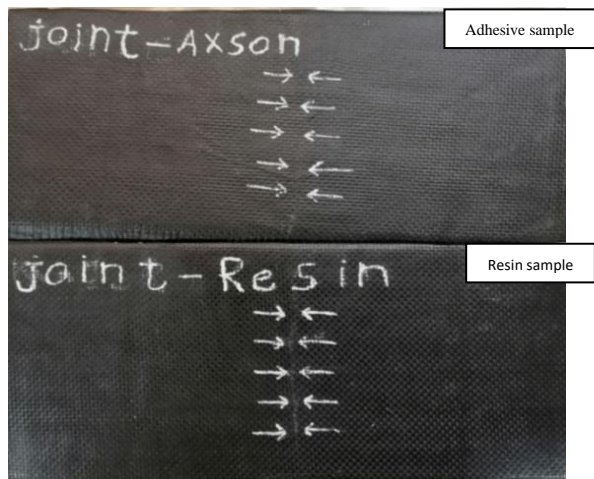
(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 25 a) Failure of composite grid-stiffened plate in experimental test b) Failure of composite grid-stiffened plate in numerical simulation with adhesive joint and resin

شکل 25 الف) شکست ورق کامپوزیت مشبک در آزمون تجربی ب) شکست ورق کامپوزیتی مشبک در شبیه‌سازی عددی با اتصال چسبی و رزین



(الف-ا)

جدول 7 بررسی نتایج تجربی و عددی اتصال چسب آکسون

Table 7 Investigation of experimental and numerical results of axson adhesive joint

بیشترین جابجایی (mm)	جذب انرژی (N.mm)	نیروی بیشینه (N)	
4.3	15900	6700	تجربی
3.8	16181	7500	عددی

بر اساس جدول 7 مقدار اختلاف نیرو بین گزارش آزمون تجربی و عددی 12٪، برای جذب انرژی 6٪ و برای جابجایی 11٪ است. در شکل 24 نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی نمونه کامپوزیت مشبک با اتصال رزین قابل مشاهده است. نتایج تجربی و عددی در این شبیه‌سازی دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشند. از آنجاکه همواره شرایط در فرایند ساخت سازه کاملاً ایده‌آل نبوده و با اشکالاتی همراه است و از طرفی شرایط مدل‌سازی و تحلیل در شبیه‌سازی عددی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود، مقدار نیروی تحمل شده در شبیه‌سازی‌های عددی کمی بیشتر از نتایج تحلیل‌های تجربی متناظر است که این امر قابل پیش‌بینی بود. در جدول 8 نتایج تجربی و عددی اتصال با رزین ارائه شده‌است. بر اساس جدول 8، مقدار بیشینه نیرو آزمون تجربی و عددی 11٪، برای جذب انرژی 13٪ و برای جابجایی 5٪ است.

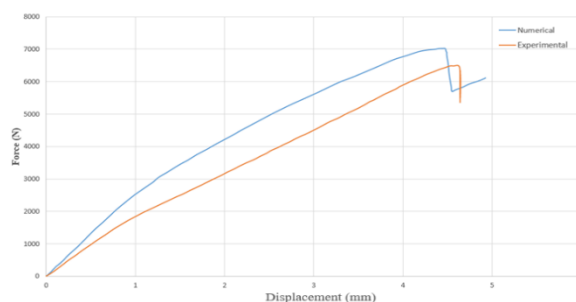


Fig. 24 Numerical and experimental results of resin joint samples

شکل 24 نتایج عددی و تجربی نمونه اتصال با رزین

جدول 8 بررسی نتایج عددی و تجربی اتصال با رزین

Table 8 Evaluation of numerical and experimental results of resin joint

بیشترین جابجایی (mm)	جذب انرژی (N.mm)	نیروی بیشینه (N)	
4.7	16100	6300	تجربی
4.5	18483	7000	عددی

بر اساس داده‌های ذکر شده در مورد بررسی اتصال دهنده‌ها، چسب آکسون به دلیل مقاومت در برابر خمش و تحمل نیرویی بیشتر نسبت به رزین، به‌عنوان اتصال‌دهنده انتخاب گردیده و در راستای انجام پژوهش از پارامترها و خواص تعیین شده برای چسب استفاده شده است. شکل 25 شکست ورق کامپوزیتی مشبک در شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی را نشان می‌دهد. بر این اساس شکست در سازه مشبک کامپوزیتی در قسمت تقویت‌کننده‌ها اتفاق می‌افتد و در صورت ادامه بارگذاری، پوسته شروع به شکست می‌کند. شکل 26 عدم شکست پوسته در زمان شکست تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.

در شکل 27 نحوه جدایش اتصال، با در نظر گرفتن خواص و ضخامت برای اتصال‌دهنده قابل مشاهده است. در راستای این تحقیق به دلیل عدم توانایی در کنترل ضخامت برای اتصال‌دهنده از روش انتخاب ضخامت برای اتصال دهنده استفاده نشده است.

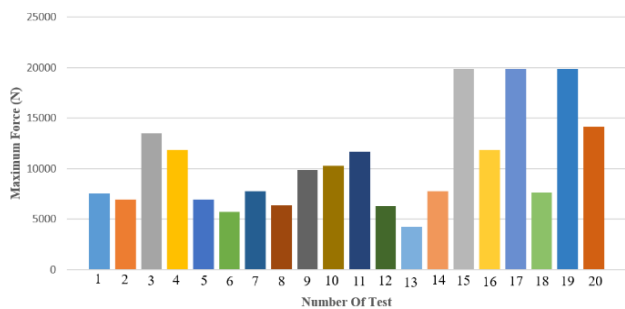


Fig. 28 Results of maximum force in Abaqus analysis

شکل 28 نتایج نیروی بیشینه حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس

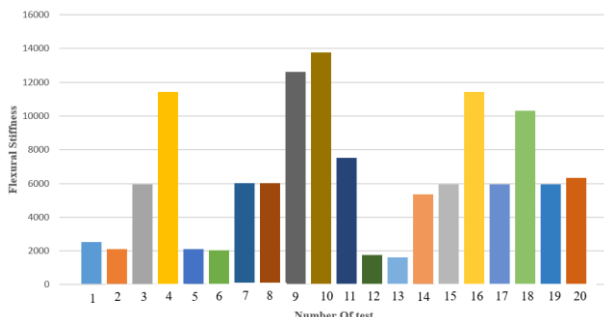


Fig. 29 Results of Stiffness in Abaqus analysis

شکل 29 نتایج سفتی حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های 15، 17 و 19 که آزمایش‌های تکراری می‌باشند دارای حالت بیشینه در بحث تحمل نیرویی و نمونه شماره 10 دارای حالت بیشینه در بحث سفتی خمشی می‌باشد. جدول 9 پارامترهای این نمونه را بیان می‌کند.

با توجه به ویژگی مهم انواع ساختارهای کامپوزیتی مشبک، یعنی استحکام و سفتی ویژه بالای آن‌ها به‌ویژه در کاربردهای هوایی، فضایی و دریایی که عامل وزن یک پارامتر مهم و غیرقابل‌انکار به شمار می‌رود، توجه به پارامتر وزن و میزان افزایش آن نسبت به نمونه‌های دیگر ضروری است. بدین منظور وزن تخمینی سازه‌های شبیه‌سازی‌شده پیش از شروع تحلیل بر اساس چگالی بیان شده توسط تحقیقات [15] در جدول 10 نشان داده شده است.

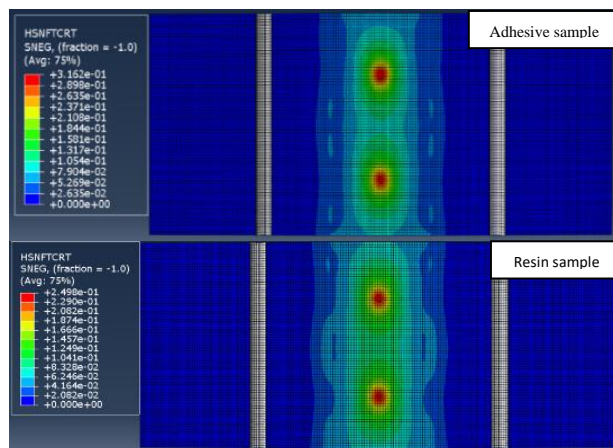
در شکل 30 و 31 نتایج تحلیل المان محدود نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده بر اساس بار بیشینه ویژه و سفتی خمشی ویژه نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های 15، 17 و 19 که آزمایش‌های تکراری می‌باشند دارای حالت بیشینه ویژه در بحث تحمل نیرویی و نمونه شماره 9، 10 و 18 دارای حالت بیشینه ویژه در بحث سفتی خمشی می‌باشد. جدول 11 پارامترهای این نمونه را بیان می‌کند.

جدول 9 پارامترهای تعیین‌شده برای سازه با تحمل نیرویی و سفتی بیشینه

Table 9 Parameters set for structures with maximum force tolerance and stiffness

نوع تحلیل	ضخامت تقویت‌کننده (mm)	پهنای تقویت‌کننده (mm)	ابعاد هندسه سلولی (cm)	مقدار
بار بیشینه	13.7	8.2	9.9	1995 (N)
سفتی بیشینه	20	7.48	5	13752 (N/mm)



(b-ب)

Fig. 26 a) Start of failure in shells if loading continues b) No failure of shells at the time of failure of amplifiers

شکل 26 الف) شروع شکست در پوسته‌ها در صورت ادامه بارگذاری ب) عدم شکست پوسته‌ها در زمان شکست تقویت‌کننده‌ها

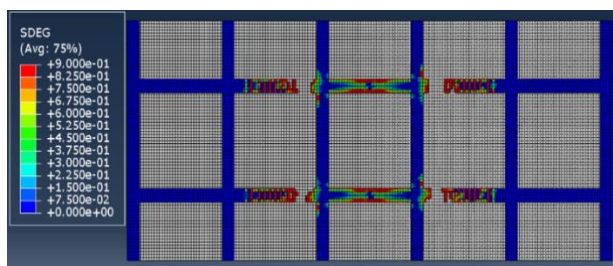


Fig. 27 How to separate the joint, taking into account the properties and thickness of the connector

شکل 27 نحوه جدایش در اتصال با در نظر گرفتن خواص و ضخامت برای اتصال‌دهنده

3-3- نتایج بهینه‌سازی طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود پرداخته شده است. ابتدا نتایج حاصل از هر شبیه‌سازی و سپس پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر روی خواص ورق کامپوزیتی مشبک، نظیر بار بیشینه و سفتی سازه و همچنین بار بیشینه و سفتی ویژه سازه بررسی شده است. در ابتدا لازم است برخی اصطلاحات استفاده شده در این بخش به صورت مختصر توضیح داده شود.

- 1- نیروی بیشینه: بیشترین بار تحمل شده توسط ورق کامپوزیتی مشبک که واحد آن نیوتن (N) است.
- 2- نیروی بیشینه ویژه: نسبت بار بیشینه به جرم ورق‌های تقویت‌شده مشبک کامپوزیتی که واحد نیوتن بر گرم (N/gr) است.
- 3- سفتی: شیب نمودار بار-جابجایی در ناحیه الاستیک که واحد آن نیوتن بر میلی‌متر (N/mm) است.

4- سفتی ویژه: نسبت سفتی به جرم ورق کامپوزیتی مشبک که واحد آن نیوتن بر میلی‌متر گرم (N/mm.gr) است.

پس از بررسی اتصال بین تقویت‌کننده و پوسته و انتخاب پارامترهای اتصال‌دهنده مناسب، شبیه‌سازی عددی برای تمام حالت‌های پیشنهادی طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح مورد تحلیل قرار گرفت. شکل 28 نتایج نیروی بیشینه و شکل 29 نتایج سفتی خمشی حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

سازه‌های کامپوزیتی مشبک به‌طور عمده به‌وسیله فاکتورهای وزن، ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و ابعاد هندسه سلولی کنترل می‌شود. در ادامه به بررسی اثرات فاکتورها بر بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه پرداخته شده است.

3-4-1- شناسایی اثرات فاکتورها بر نیرو بیشینه ویژه و بهینه‌سازی سازه
در این پژوهش از روش پاسخ سطح (RSM) برای تجزیه و تحلیل اثرات فاکتورهای ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و هندسه سلولی تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه استفاده شده است. تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه سازه کامپوزیتی مشبک در شکل 32 مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت تقویت‌کننده تا ضخامت 14.87 میلی‌متر نیروی بیشینه ویژه تا مقدار 53.44 N/gr افزایش پیدا کرده و سپس به خاطر پارامترهای تأثیرگذار مانند وزن سازه، کاهش پیدا می‌کند.

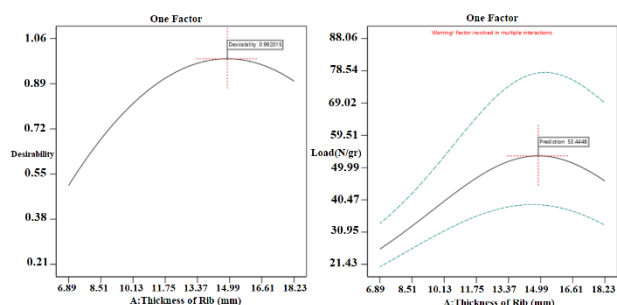


Fig. 32 Effect of reinforcement thickness on maximum specific force
شکل 32 رابطه بین ضخامت تقویت‌کننده بر نیرو بیشینه ویژه

تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر بار بیشینه ویژه در شکل 33 قابل مشاهده است. همان‌طور که در نمودار بیان شده است با افزایش پهنای تقویت‌کننده تا مقدار 8.7 میلی‌متر نیرو بیشینه نیز افزایش یافته است و سپس به دلیل تأثیرات وزن سازه با افزایش پهنای تقویت‌کننده کاهش پیدا کرده است.

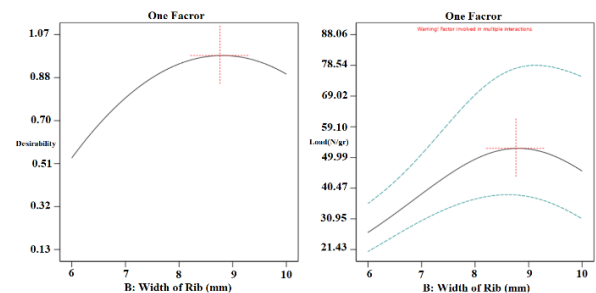


Fig. 33 Effect of reinforcement width on maximum specific force
شکل 33 رابطه پهنای تقویت‌کننده و نیرو بیشینه ویژه

Table 11 Parameters set for structures with maximum force tolerance and stiffness

مقدار	ابعاد هندسه سلولی (cm)	پهنای تقویت‌کننده (mm)	ضخامت تقویت‌کننده (mm)	نوع تحلیل
51(N/gr)	9.9	8.2	13.7	بار بیشینه ویژه
26(N/mm.gr)	8.1	7.6	20	سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 9
26(N/mm.gr)	5	7.48	20	سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 10
26(N/mm.gr)	10	6	20	سفتی بیشینه ویژه نمونه شماره 18

جدول 10 وزن نمونه‌های شبیه‌سازی شده [15]

Table 10 Weight of simulated samples [15]

شماره تحلیل	وزن (gr)	شماره تحلیل	وزن (gr)
1	334.4	11	430
2	320	12	308.6
3	424	13	283
4	561	14	370
5	320	15	382
6	312.8	16	561
7	370	17	382
8	429	18	394
9	488	19	382
10	531	20	437

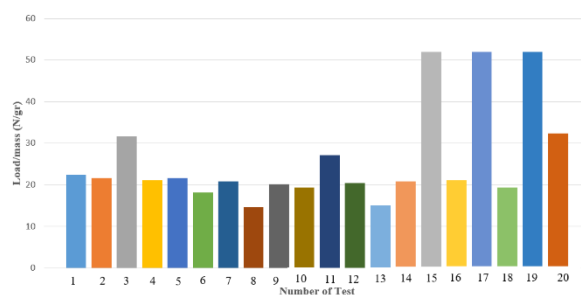


Fig. 30 Results of specific maximum force in Abaqus analysis

شکل 30 نتایج نیروی بیشینه ویژه در تحلیل آباکوس

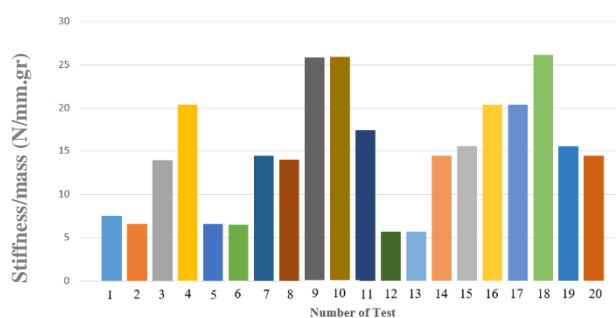


Fig. 31 Results of specific stiffness in Abaqus analysis

شکل 31 نتایج سفتی ویژه در تحلیل آباکوس

3-4- تحلیل آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح

اندازه‌گیری مقدار بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌ها در تحلیل استحکام سازه‌های کامپوزیتی مشبک است. به‌طوری‌که به‌عنوان بااهمیت‌ترین معیار کیفیت استحکام در نظر گرفته شده است.

جدول 11 پارامترهای تعیین‌شده برای سازه با تحمل نیرویی و سفتی بیشینه

تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر سفتی ویژه در شکل 37 قابل مشاهده است. همان‌طور که در نمودار بیان شده است تأثیر پهنای تقویت‌کننده‌ها بر سفتی ویژه سازه با شیب ملایم رو پایین تعریف می‌شود که یکی از دلایل کاهش شیب نمودار بالا رفتن وزن سازه است.

اثر فاکتور اندازه هندسه سلولی بر سفتی ویژه سازه، در شکل 38 قابل مشاهده است. همان‌طور در شکل قابل مشاهده و بررسی است تأثیر هندسه سلول مربعی در ساخت تقویت‌کننده‌ها با شیب ملایم صعودی بوده و سپس به صورت خط صاف مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حالت بهینه هندسه سلول بوده و افزایش ابعاد در روند سفتی ویژه سازه، تأثیر چندانی نخواهد داشت.

در نهایت نمونه بهینه تابع استخراج شده باهدف بیشینه کردن سفتی ویژه استخراج گردید که در شکل 39 قابل مشاهده است. مقدار عددی مطلوبیت^۱ نشان از شرایط مطلوب و دقت طراحی آزمایش را بیان می‌کند که در راستای بررسی حالت بهینه بار بیشینه ویژه مقدار 0.97 به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول تحلیل است.

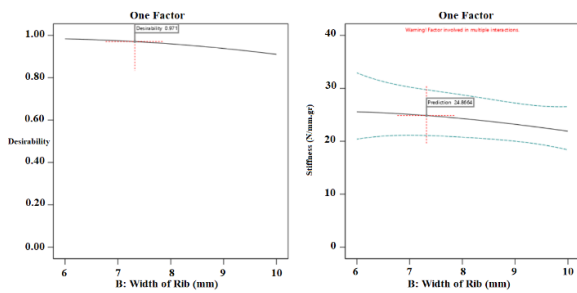


Fig. 37 The effect of reinforcing width on the specific stiffness of the structure

شکل 37 تأثیر پهنای تقویت‌کننده بر سفتی ویژه سازه

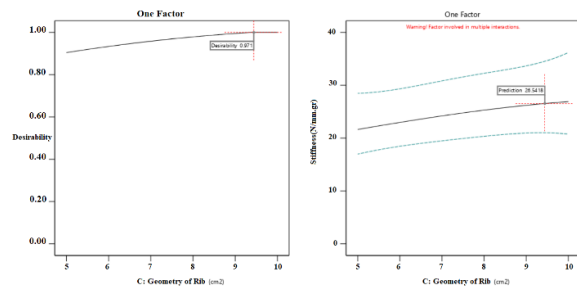


Fig. 38 The effect of structural cell geometry dimensions on the specific stiffness of the structure

شکل 38 تأثیر ابعاد هندسه سلولی سازه بر سفتی ویژه سازه

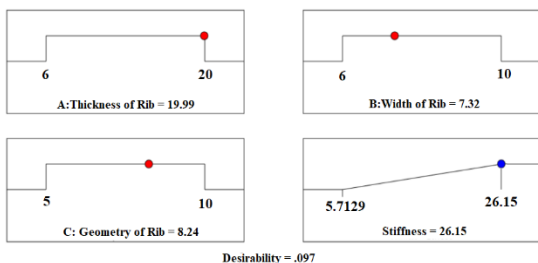


Fig. 39 Optimal results of parameters to determine the structure with maximum specific stiffness

شکل 39 نتایج بهینه پارامترها جهت تعیین سازه با سفتی ویژه بیشینه

اثر فاکتور اندازه هندسه سلولی بر نیرو بیشینه ویژه سازه، در شکل 34 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از بزرگ‌ترین هندسه سلولی مربعی بر اساس مقالات و تحقیقات گذشته باعث افزایش بار بیشینه ویژه در سازه می‌شود.

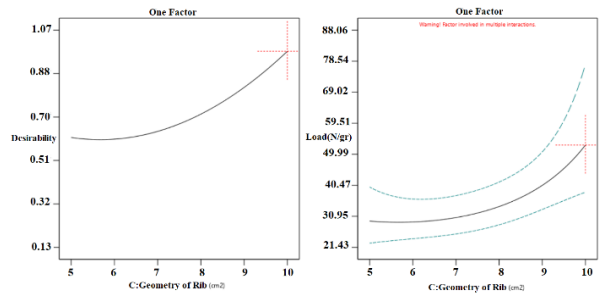


Fig. 34 Effect of cell geometry on maximum specific force

شکل 34 رابطه هندسه سلولی بر نیرو بیشینه ویژه

در نهایت نمونه بهینه تابع استخراج شده باهدف بیشینه کردن بار ویژه استخراج گردید که در شکل 35 قابل مشاهده است. مقدار عددی مطلوبیت^۱ نشان از شرایط مطلوب و دقت طراحی آزمایش را بیان می‌کند که در راستای بررسی حالت بهینه بار بیشینه ویژه مقدار 0.92 به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول تحلیل است.

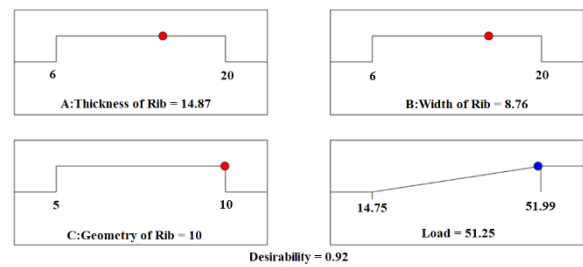


Fig. 35 Optimal results for special maximum load

شکل 35 نتایج بهینه جهت تحمل بار بیشینه ویژه

3-4-2- شناسایی اثرات فاکتورها بر سفتی ویژه و بهینه‌سازی سازه

بررسی اثرات فاکتورها بر سفتی ویژه سازه طبق روند بار بیشینه ویژه مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر سفتی ویژه در شکل 36 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت تقویت‌کننده تا ضخامت بیشینه سفتی ویژه سازه افزایش پیدا می‌کند. در این راستا با در نظر گرفتن ضخامت 20 میلی‌متری برای تقویت‌کننده‌ها سفتی ویژه سازه 24.86 N/mm.gr مقدار است.

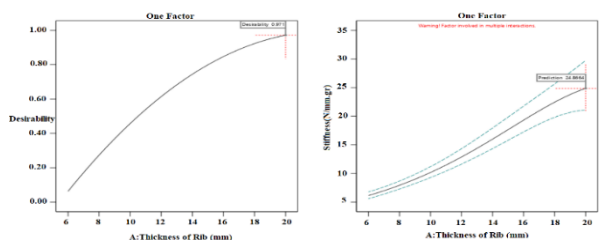


Fig. 36 The effect of reinforcement thickness on the specific stiffness of the structure

شکل 36 تأثیر ضخامت تقویت‌کننده بر سفتی ویژه سازه

² Desirability

¹ Desirability

تحلیل شده است. در شکل 42 نمودار نیرو-جابجایی قابل مشاهده است و در جدول 12 مقدار نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه با نتایج طراحی آزمایش مقایسه شده است. با توجه به مقادیر شبیه‌سازی عددی و مقایسه با مقادیر تعیین شده از طراحی آزمایش با درصد خطای کم نمونه شبیه‌سازی عددی مورد قبول است.

همچنین در نمونه بهینه، شکست ابتدا در ناحیه تقویت‌کننده‌ها اتفاق افتاده و با ادامه بارگذاری صفحه شروع به شکست می‌کند. در شکل 43 ناحیه شکست بر روی تقویت‌کننده‌ها، قابل مشاهده است.

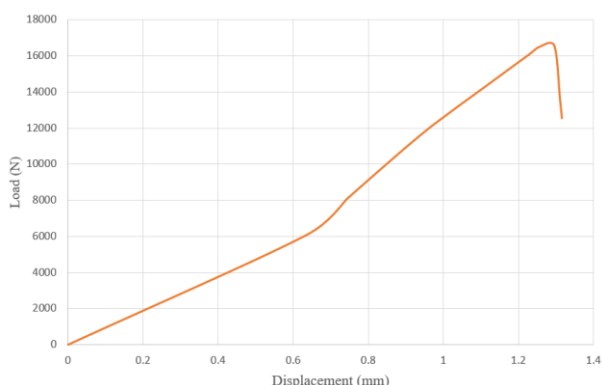


Fig. 42 numerical simulation of Optimal sample

شکل 42 شبیه‌سازی عددی نمونه بهینه

جدول 12 مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و طراحی آزمایش

Table 12 Comparison of numerical simulation results and experimental design

درصد اختلاف	شبیه‌سازی عددی	طراحی آزمایش	نوع نمونه بهینه
9٪	37/67	41/07	نیروی بیشینه ویژه (N/gr)
7٪	23/1	21/58	سفتی ویژه (N/mm.gr)

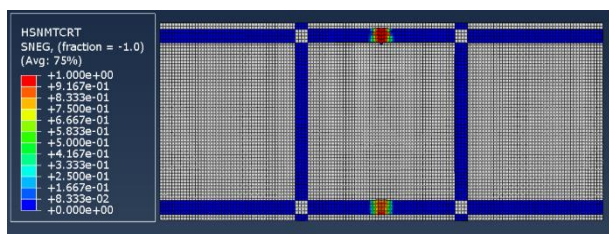


Fig. 43 Failure of grid stiffness in the optimal sample

شکل 43 شکست تقویت‌کننده‌ها در نمونه بهینه

4- نتیجه‌گیری

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی به خاطر داشتن ویژگی‌های این مواد، بررسی‌ها و تحقیقات مختلف سبب ساخت سازه‌های کامپوزیتی مشبک شد. خواص مکانیکی ایده‌آل، تحمل نیروی بیشتر نسبت به سازه‌های دیگر، مقاومت در برابر ضربه و رفتارهای خمشی مناسب این سازه را منحصربه‌فرد کرده است. در این تحقیق، رفتار خمشی ورق مشبک کامپوزیتی به‌صورت تجربی و عددی با آزمون خمش سه‌نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. و هدف اصلی تحقیق،

3-4-3- بررسی سازه بهینه از نظر نیرو و سفتی بیشینه ویژه تأثیر پارامترهای ضخامت تقویت‌کننده، پهنای تقویت‌کننده و هندسه سلولی به‌صورت جداگانه بر روی سفتی ویژه و نیروی بیشینه ویژه در توضیحات ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته و سازه‌های بهینه معرفی گردید. در برخی از سازه‌های مشبک کامپوزیتی اثر سفتی و نیروی بیشینه هر دو بایستی به‌صورت آمیخته در هم بررسی و تحلیل شوند.

تأثیر اثرات فاکتورها بر سازه‌ای که نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه هر دو در کنار هم اهمیت دارند در شکل 40 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بررسی تأثیر رفتار فاکتورها به دلیل وجود دو پاسخ مرتبط به یکدیگر قابل مقایسه به‌صورت مجزا نمی‌باشد. در شکل 41 مقادیر پارامترهای بهینه نشان داده شده است.

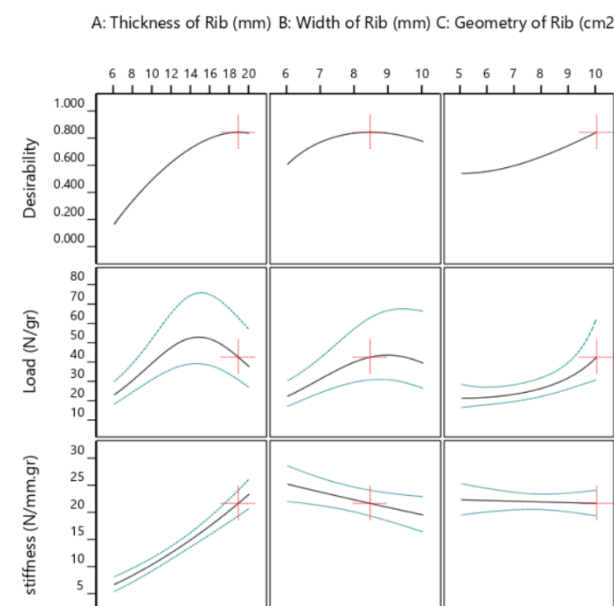


Fig. 40 Effects of factors for specific maximum force response and specific stiffness

شکل 40 اثرات فاکتورها برای پاسخ نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه

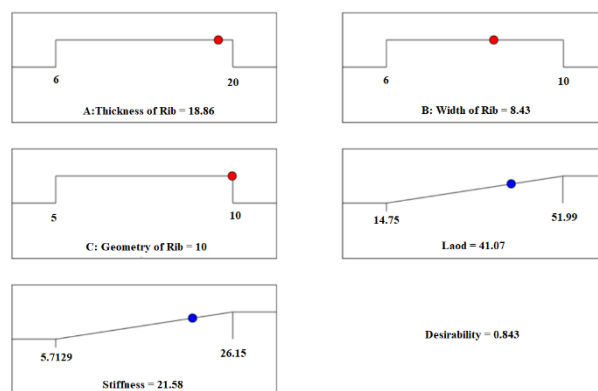


Fig. 41 Optimal results of parameters to determine the structure with specific maximum force and specific stiffness

شکل 41 نتایج بهینه پارامترها جهت تعیین سازه با نیروی بیشینه ویژه و سفتی ویژه

3-3- شبیه‌سازی عددی و تحلیل مدل بهینه

پس از بررسی اثرات فاکتورها و تعیین پارامترهای بهینه، به جهت اطمینان از نتایج طراحی آزمایش، پارامترهای تعیین شده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و

- [8] Avila, A.F., Bueno, Plinio de O., (6772), "An experimental and numerical study on adhesive joints for composites," composites", Vol. 22, pp. 511-510, 2004.
- [9] De Moura, M., et al., "Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints," International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 28, No. 8, pp. 419-426, 2008.
- [10] Jadhav, P., P.R. Mantena, and R.F. Gibson, "Energy absorption and damage evaluation of grid stiffened composite panels under transverse loading," Composites Part B: Engineering, Vol. 37, No. 2-3, pp. 191-199, 2005.
- [11] Zhang, Z., Chen, H., and Ye, L., "Progressive failure analysis for advanced grid stiffened composite plates/shells," Composite Structures, Vol. 86, No. 1-3, pp. 45-54, 2008.
- [12] Tahanie, V., Shahgholian, D., Rahimi, Gh., "Experimental and numerical study of the effect of the shape of reinforcements on the bending behavior of composite mesh sheets," in persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 303-311, 2016.
- [13] Azarafza, R., Davar, A., Mahmoudi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich sheets with mesh core," in persian, Composite Science and Technology (JSTC), Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2016.
- [14] Davar, A., Azarafza, R., Faraji Shoa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core," in persian, Composite Science and Technology (JSTC), Vol. 6, No. 4, pp. 615-626, 2020.
- [15] Guénon, V. A., Chou, T. W. and Gillespie, J. W., "Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite," Journal of materials science, Vol. 24, No. 11, pp. 4168-4175, 1989.

بررسی اتصال چسبی پوسته با مشبک در نظر گرفته شد. و در این راستا دو سازه مختلف که یکی با رزین اپوکسی LR520 و دیگری با چسب آکسون H 9940 BK به پوسته اتصال داده شده بودند، مورد آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که اتصال چسب آکسون نسبت به اتصال رزین 16٪ بر نیروی قابل تحمل، قبل از شروع تخریب می‌افزاید. و در نمونه اتصال با چسب آکسون نسبت به اتصال رزین، جذب انرژی 10٪ افزایش را نشان می‌دهد.

در بحث بهینه‌سازی سازه‌ها، بررسی پارامتر اقتصادی جایگاه موردتوجه دارد. اما در برخی مواقع در صنایع مختلف همچون صنایع هوایی افزایش خواص مکانیکی سازه نسبت به صرفه اقتصادی ارجحیت دارد. در این تحقیق، در صورت استفاده از چسب آکسون H 9940 BK به‌عنوان اتصال چسبی هزینه‌های جاری مواد حدود 8٪ افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت و پهنا در صورت نادیده گرفتن اثر وزنی باعث کوچک‌تر شدن هندسه سلولی شده و بر استحکام سازه می‌افزاید. اما با در نظر گرفتن اثر وزنی، افزایش ضخامت و پهنا در جهت افزایش استحکام سازه نمی‌باشد. در بررسی اثر ضخامت بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت‌شده مشبک مشخص شد که افزایش ضخامت تا مقدار 14.87 میلی‌متر باعث افزایش نیروی بیشینه ویژه می‌گردد و سپس به جهت تأثیر افزایش وزن نسبت به تحمل نیرویی این پاسخ وارد روند کاهش می‌شود. و در بررسی اثر ضخامت بر سفتی ویژه مشخص شد، که دارای رابطه مستقیم بوده و با افزایش ضخامت سفتی ویژه افزایش می‌گردد.

در بررسی اثر پهنا بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت‌شده مشبک مشخص شد، با افزایش پهنا تا مقدار 8.7 میلی‌متر باعث افزایش نیرو بیشینه ویژه می‌گردد و سپس به جهت تأثیر افزایش وزن نسبت به تحمل نیرویی این پاسخ وارد روند کاهش می‌شود. و بررسی اثر پهنا بر سفتی ویژه نشان می‌دهد با افزایش پهنا به دلیل افزایش وزن سفتی ویژه سازه وارد روند کاهش می‌گردد. در بررسی اثر هندسه سلول بر رفتار خمشی ورق‌های تقویت‌شده مشبک مشخص شد، استفاده از بزرگ‌ترین هندسه سلولی مربعی بر اساس مقالات و نتایج ذکر شده باعث افزایش نیرو بیشینه ویژه و سفتی ویژه سازه می‌گردد.

5- مراجع

- [1] Silva, L.F., "Design rules and methods to improve joint strength," in Handbook of Adhesion Technology, 2011.
- [2] Andersson, T. and Stigh, U., "The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces," International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, No. 2, pp. 413-434, 2004.
- [3] De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 10-11, pp. 2224-2230, 2008.
- [4] Her, S.-C., "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints," Composite Structures, Vol. 47, No. 1-4, pp. 673-678, 1999.
- [5] Hart-Smith, L., "Adhesive-bonded single-lap joints: NASA Langley Research Center," Report NASA CR-112236, 1973.
- [6] Hadj-Ahmed, R., Foret, G., and Ehrlicher, A., "Stress analysis in adhesive joints with a multiparticle model of multilayered materials (M4)," International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 21, No. 4, pp. 297-307, 2001.
- [7] Zou, G., Shahin, K., Taheri, F., "An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints," Composite Structures, Vol. 65, No. 3-4, pp. 499-510, 2004.