



بررسی تجربی و عددی اثر شکل تقویت کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی مشبک

وحید طحانی¹، داود شاه‌غلیان قهفرخی²، غلامحسین رحیمی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 111-14115، mme.modares.ac.ir، rahimi_gh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 فروردین 1395

پذیرش: 13 خرداد 1395

ارائه در سایت: 12 تیر 1395

کلید واژگان:

خمش

ورق کامپوزیتی مشبک

تقویت کننده مثلثی شکل

تقویت کننده مربعی شکل

تقویت کننده لوزی شکل

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی، بدلیل ویژگی‌های منحصر بفردشان، ایده‌هایی به منظور تقویت و بهبود کارایی آن‌ها ارائه شد. ایده‌هایی که سبب ساخت سازه‌های کامپوزیت مشبک شد. خواص مکانیکی ایده‌آل، سفتی ویژه و استحکام بالا در برابر ضربه و خستگی، این سازه را به یکی از سازه‌های پر کاربرد در صنایع هوایی، موشکی و دریایی تبدیل نموده است. ورق‌های کامپوزیتی مشبک، از یک پوسته نازک کامپوزیتی متصل به یک سری تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی تشکیل شده است. شبکه تقویت‌کننده‌ها منجر به افزایش قابل توجه سفتی و استحکام سازه می‌شود. در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی اثر شکل تقویت‌کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت‌کننده‌های مثلثی، مربعی و لوزی شکل در نظر گرفته شد. برای ساخت این ورق‌ها، قالب سیلیکونی طراحی و ساخته شد و سپس از روش لایه چینی و لایه پیچی دستی برای ساخت ورق‌ها استفاده شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند که برای این منظور نیز فیکسچری طراحی و ساخته شد. از حل عددی مسئله و مقایسه با نتایج تجربی مشاهده شد که اختلاف بسیار کمی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که سفتی خمشی ویژه ورق با تقویت کننده مربعی بترتیب 1.92 و 1.88 برابر ورق با تقویت کننده مثلثی و لوزی شکل می‌باشد. همچنین استحکام خمشی ورق با تقویت کننده مربعی 1.58 برابر ورق مثلثی می‌باشد. بنابراین ورق با تقویت کننده مربعی شکل دارای بیشترین سفتی و استحکام خمشی می‌باشد.

Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite plates

Vahid Tahani, Davoud Shahgholian Ghahfarokhi, Gholam Hossein Rahimi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*P.O.B. 14115- 111, Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 April 2016
Accepted 02 June 2016
Available Online 02 July 2016

Keywords:
Flexure
Grid composite plate
Triangular rib
Square rib
rhombic rib

ABSTRACT

With the arrival of composite materials and because of their unique properties, ideas were presented in order to strengthen and improve their performance. The ideas were reason for building of Grid composite structures. These structures are widely used in the aerospace, missile and Marine industry because of their ideal mechanical properties: special stiffness and high strength against impact and fatigue. Grid composite plates are made from thin composite shell connected a series of composite ribs. Ribs network results in a significant increase in stiffness and strength of structure. In this research, experimental and numerical investigations of effect of Shape of ribs have been on flexural behavior of grid composite plates. For this purpose, three types of Grid plates were considered with triangle, square and rhombic ribs. For building these plates, silicone mold was designed and built and was also used for making plates from hand lay-up and hand-wound layer technique. Samples were subjected to three-point bending test; for this purpose, the fixture was designed and built. From numerical solution of the problem and comparison of experimental results it was observed that there is very little difference between experimental and numerical results. Experimental results show that special flexural stiffness of plate with square rib is 1.92 and 1.88 plate with triangular and rhombic ribs, respectively. Also, the flexural strength of plate with square rib is 1.58 plate with triangular rib. Thus plate with square rib has the highest stiffness and bending strength.

1- مقدمه

وزن کم باشد، روز به روز محسوس‌تر می‌شد. فلزات به دلیل ویژگی‌های ساختاریشان دارای استحکام بالا و در عین حال وزن زیادی هستند. با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی، به دلیل ویژگی‌های خاص این مواد، ایده‌ی

با پیشرفت صنعت و تکنولوژی به ویژه در صنایع هوایی، فضایی و خودروسازی نیاز به سازه‌هایی که دارای خواص ایده‌آل نظیر استحکام بالا و در عین حال

با ارائه مدلی تحلیلی، مطالعه پارامتری عوامل مؤثر بر کماتش پوسته تقویت را انجام داد. قنک‌شنگ [6] مدهای شکست صفحات کامپوزیتی مشبک تحت بار جانبی را به هر دو روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار داد. ایشان همچنین به بررسی پاسخ بار-جابجایی صفحات کامپوزیتی مشبک نیز پرداخت. در ادامه گیبسون و همکاران [7] نتایج یک بررسی تجربی-تحلیلی بر روی مشخصات جذب انرژی و تخریب پل‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک تحت بار شبه استاتیکی خمشی سه‌نقطه‌ای را ارائه کردند و روشی به منظور مدلسازی چنین ساختارهایی، تحت بار شبه استاتیکی را ارائه دادند. نتایج آزمایش و شبیه‌سازی‌ها برای پل‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک نشان داد که این نوع از ساختارها تحمل در برابر تخریب بالایی دارند و بیش‌ترین جذب انرژی پس از شروع تخریب رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شد که در حالت بارگذاری در جهت پوسته، سازه بار بیش‌تری را نسبت به بارگذاری در راستای تقویت کننده تحمل می‌کند [8].

جاده‌ها و همکاران نیز در دو تحقیق مجزا به بهینه‌سازی و بررسی جذب انرژی ورق مشبک کامپوزیتی تحت بار جانبی پرداختند. در تحقیق اول [2] به بهینه‌سازی هندسی پل‌های کامپوزیتی مشبک با شکل شبکه مثلثی، تقویت‌شده با الیاف شیشه تحت بار جانبی شبه استاتیکی و بار دینامیکی ضربه سرعت بالا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پرداختند. همچنین رفتار برخی از پل‌های کامپوزیتی به‌صورت تجربی تحت بار ضربه سرعت بالا تحلیل و نتایج با استفاده از مدلسازی عددی بهینه سازی شد. هدف از بهینه‌سازی بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص پل‌های کامپوزیتی مشبک بود. فان و همکارانش به بررسی ساندویچ پانل‌ها با هسته مشبک شش‌ضلعی تقویت‌شده با الیاف کربن پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که سازه مشبک تقویت‌شده با الیاف کربن، سفت‌تر و مستحکم‌تر از فوم‌ها و لانه زنبوری‌ها می‌باشد [9].

جاده‌ها و همکاران در تحقیق دوم [10] مشخصات جذب انرژی پل‌های کامپوزیتی ایزوگرید تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی را بررسی کردند. آن‌ها تست و شبیه‌سازی‌های المان محدود را بر روی پل‌های ایزوگرید تحت بار خمشی سه نقطه‌ای انجام دادند. نتایج نشان داد که بارگذاری در راستای تقویت‌کننده‌ها نسبت به بارگذاری در راستای پوسته منجر به جذب انرژی مخصوص و جابجایی بزرگ‌تر می‌شود. ژانگ و همکاران [11] روش شکست پیشرفته‌ای را به منظور شبیه‌سازی و پیشرفت مدهای شکست چندگانه صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده، بر اساس یک مدل المان تقویت شده مثلثی توسعه دادند. هر دو شکست تقویت‌کننده‌ها و پوسته در این تحقیق بررسی شد که شامل ترک در ماتریس، شکست الیاف، شکست برشی الیاف-ماتریس، لایه لایه شدن پوسته و شکست الیاف در تقویت‌کننده بود. آن‌ها تمام این معیارهای شکست را با استفاده از مجموعه‌ای از معیارهای شکست چندجمله‌ای مبتنی بر تنش تعریف کردند که در آن تنش‌های برشی عرضی در مرکز المان تقویت شده با به کارگیری یک روش یکپارچه المان محدود و روش تفاوت محدود محاسبه شد. همچنین رفتار کاهش خواص ماده پس از شروع مکانیزم‌های شکست نیز معرفی شد. آن‌ها نقش سختی کاهش یافته معادل را بررسی کردند و استنباط کردند که این کاهش سختی، مقاومت کماتشی سازه را کاهش می‌دهد، اما تأثیر کمی بر روی توانایی انتقال بار درون صفحه‌ای دارد. رحیمی و همکاران در تحقیقاتی جداگانه‌ای به تحلیل ارتعاشی، کماتشی و خستگی سازه‌های مشبک نیز پرداخته‌اند [12-15]. آن‌ها [16, 17] اثر سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها بر مقاومت کماتشی

جابجایی این مواد بجای فلزات به ذهن طراحان و مهندسان رسید. خواص مکانیکی ایده‌آل، نظیر استحکام بالا و وزن کم، مواد کامپوزیتی را به‌ویژه برای کاربردهای هوافضا ایده‌آل کرده‌است. با افزایش استفاده از این نوع مواد، ایده‌هایی به منظور تقویت کامپوزیت‌ها و بهبود کارایی آن‌ها به ذهن طراحان و مهندسان رسید، ایده‌هایی که منجر به ساخت سازه‌های گوناگون با زمینه کامپوزیتی از قبیل پل‌های ساندویچی¹ و سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک² شد.

مفهوم سازه‌های کامپوزیتی مشبک یکی از پیشرفت‌ها در زمینه استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف می‌باشد. ساختارهای کامپوزیتی مشبک مزایای بسیار زیادی نسبت به ساختارهای کامپوزیتی معمولی دارند از جمله این مزایا می‌توان به مقاومت بالا در برابر خستگی و ضربه، سفتی ویژه و استحکام بالا در برابر ضربه اشاره کرد [1]. بدلیل ویژگی‌های اشاره شده، امروزه این سازه‌ها به طور وسیعی در صنایع هواپیماسازی، موشکی، دریایی و فضایی استفاده می‌شود [2]. سازه‌های مشبک، مجموعه‌ای از تقویت‌کننده‌های متصل بهم هستند که تشکیل یک ساختار پیوسته می‌دهد. این مجموعه از تقویت‌کننده‌ها که شکل شبکه‌ای به سازه می‌دهند از الیاف پیوسته چقرمه سفت و مستحکم تشکیل شده‌اند و در مقایسه با ساختارهای کامپوزیتی دیگر مزایایی بسیاری از جمله هزینه تولید پایین و وزن کمتر دارند. از کاربردهای عملی سازه‌های مشبک می‌توان به استفاده از این سازه‌ها در بدنه موتور هواپیما، بدنه هواپیما، فضاپیماها و همچنین صنایع کشتی سازی اشاره نمود. به دلیل همین کاربردهای بسیار زیاد، این سازه‌ها به طور گسترده، مورد توجه محققین و صنعتگران در دهه اخیر قرار گرفته‌اند [2]. در شکل 1 نمونه‌ای از یک ورق کامپوزیتی مشبک نشان داده شده است.

تحقیقات گوناگونی بر تحلیل‌های مختلف ورق‌های کامپوزیتی مشبک انجام شده است. هوسومورا و همکاران [3] به بررسی واماندگی ورق مشبک با شکل شبکه مثلثی پرداخت. او دریافت که اگرچه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف از نظر استحکام و مدول ویژه نسبت به فلزات و یا مواد ایزوتروپ بالاتر است اما این مزیت تنها در جهت الیاف می‌باشد. چن و گیبسون [4] اثر پارامترهای مختلفی نظیر مواد سازنده و ارتفاع ریب‌ها، بر روی آنالیز مودال پل‌های کامپوزیتی مشبک، با استفاده از روش المان محدود را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه پارامتری نشان داد که پل‌های کامپوزیتی با شکل شبکه مثلثی، در شکل مودها مشابه یک سازه همسانگرد رفتار می‌کنند. کیدانه [5] به بررسی کماتش سازه مشبک پرداخت و نیروی کماتش بحرانی عمومی استوانه‌های تقویت شده مشبک را تعیین نمود. ایشان



Fig. 1 Grid composite plate [2]

شکل 1 ورق کامپوزیتی مشبک [2]

¹ Sandwich Panels

² Composite Grid Stiffened Structures

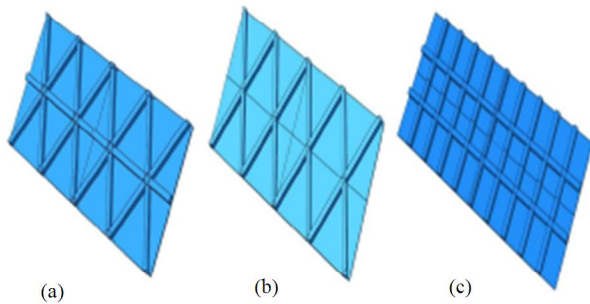


Fig. 2 Composite plates are considered (a) triangular rib (b) rhombic rib (c) square rib

شکل 2 ورق‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده (a) تقویت‌کننده مثلثی (b) تقویت-کننده لوزی (c) تقویت‌کننده مربعی

ورق کامپوزیتی بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 7264²، 125×300 میلی-متر در نظر گرفته شده است. شکل 2، هندسه سه نوع ورق در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.

3- ساخت نمونه‌ها

روش‌های گوناگونی به منظور ساخت کامپوزیت‌های مشبک وجود دارد، که می‌توان به روش‌های شکل‌دهی آزاد، رشته پیچی درون یک هسته فومی سبک وزن، رشته پیچی درون شیارهای پلاستیکی و رشته پیچی درون شیارهای فلزی اشاره کرد. روش شکل‌دهی آزاد هزینه پایینی داشته و منجر به کیفیت پایین تقویت‌کننده‌ها می‌شوند. در روش رشته پیچی درون یک هسته فومی سبک وزن، سازه مشبک دارای پوسته خارجی می‌باشد. ابتدا هسته فومی ایجاد شده و در ادامه رشته پیچی درون شیارها انجام می‌گیرد و بر روی آن پوسته خارجی رشته پیچی می‌شود. این روش هزینه نسبتاً بالایی دارد و کیفیت تقویت‌کننده‌ها مناسب است. روش استفاده شده در ساخت نمونه‌ها در این تحقیق، روش رشته پیچی درون شیارهای پلاستیکی است. در این روش شیارها درون یک پوشش الاستیک که در این جا لاستیک سیلیکونی است، ایجاد شده است. پس از قرار دادن الیاف درون شیارها و ساخت تقویت‌کننده بافاصله پارچه‌های کامپوزیتی بر روی تقویت‌کننده‌ها قرار داده می‌شود و با ترکیب رزین و هاردنر آغشته می‌شود. مزیت این روش ساخت همزمان تقویت‌کننده و پوسته می‌باشد که به علت این همزمانی امکان جدایش ریب از پوسته تقریباً به صفر می‌رسد. در شکل 3، نمونه‌ای از قالب سیلیکونی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.



Fig. 3 Silicone molds

شکل 3 قالب سیلیکونی

پوسته‌های کامپوزیتی مشبک تقویت شده تحت بار محوری را بررسی کردند. رحیمی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود افزایش 10 تا 36 درصدی در بار کماتش و هم چنین افزایش 42 تا 52 درصدی در بار ویژه نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده را مشاهده کردند.

موضوع بررسی معیارهای تخریب در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، توجه محققان متعددی را در طول دهه‌های گذشته به خود جذب کرده است. تعدد روش‌ها و معیارهای پیشنهادی در این رابطه، به وضوح نشان‌دهنده این موضوع است که معیارهای تخریب کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف هنوز هم موضوع تحقیقاتی مهمی است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه، به نظر نمی‌رسد که هنوز هم معیاری وجود داشته باشد که به‌عنوان یک معیار تحت شرایط بارگذاری عمومی کاملاً مورد پذیرش طراحان قرار گرفته باشد. در این تحقیق به منظور بررسی شروع آسیب در لایه‌های کامپوزیتی و هم‌چنین ریب‌ها از معیار هشین سه بعدی استفاده شده است. در این معیار چهار مود مختلف تخریب برای لایه تک جهته در بارگذاری استاتیکی مطرح می‌شود. تخریب الیاف در کشش و فشار و تخریب ماتریس در کشش و فشار شکل مودهای تخریب هستند. تخریب لایه در اثر شکست الیاف در کشش و فشار شکل مود نهایی لایه محسوب می‌شود؛ بدین معنی که از آن پس، لایه دیگر قادر به تحمل بار نخواهد بود. اما در خصوص سایر شکل مودها لایه با وجود تخریب در یک راستا هم‌چنان می‌تواند در سایر جهات بار اعمالی را تحمل کند، هرچند این بار کم‌تر از بار نهایی است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تجربی و عددی اثر شکل تقویت‌کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق‌های مشبک می‌باشد. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت‌کننده‌های مثلثی، مربعی و لوزی شکل در نظر گرفته خواهد شد. برای ساخت این ورق‌ها قالب سیلیکونی طراحی و ساخته خواهد شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار خواهند گرفت که برای این منظور نیز فیکسچری طراحی و ساخته خواهد شد. برای بررسی درستی نتایج بدست آمده تحلیل عددی نیز انجام خواهد شد و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

2- مشخصات هندسی ورق‌های مشبک

سازه‌های کامپوزیتی مشبک، از یک پوسته نازک یکپارچه کامپوزیتی، متصل به یک سری از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی جانبی و طولی تشکیل شده است و این پتانسیل را دارد تا بسیاری از مشکلات مربوط به ساختارهای کامپوزیتی معمولی را از بین ببرد. معمولاً هر سازه از تکرار چند سلول واحد تشکیل شده و استحکام سازه کامپوزیتی رابطه مستقیم با این واحدها دارد، در ضمن محل برخورد تقویت‌کننده‌ها، گره نامیده می‌شود [18]. تقویت‌کننده‌ها با استفاده از رزین به پوسته متصل می‌شوند و به علت اینکه طول تقویت‌کننده‌ها در مقایسه با سایر ابعاد آن بزرگ‌تر است، رفتاری شبیه تیرها از خود بروز می‌دهند. به منظور ساخت تقویت‌کننده‌ها از الیاف رووینگ از جنس شیشه و از نوع ایی¹ و به منظور ساخت پوسته از الیاف پارچه‌ای از جنس شیشه استفاده شده است. شبکه ریب‌ها نقش تقویت‌کننده پوسته کامپوزیتی را دارند و باعث افزایش بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه ورق به خصوص در بارگذاری خمشی می‌شود.

به منظور بررسی اثر شکل تقویت‌کننده‌ها بر روی رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک، ورق‌هایی با سه نوع شکل شبکه مختلف مثلثی شکل مربعی و لوزی ساخته شد و تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت. ابعاد

² ASTM D7264

¹ E

4- آزمایش های تجربی

پس از ساخت نمونه‌ها، به منظور بررسی رفتار خمشی، تست خمش سه نقطه‌ای انجام شد. تست خمش سه نقطه‌ای ورق کامپوزیتی مشبک بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 7264 صورت پذیرفته است. برای این منظور و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری مورد نیاز برای تست خمش سه نقطه‌ای، فیکسچری طراحی و ساخته شد. در شکل 6 این فیکسچر نشان داده شده است. در این فیکسچر بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 7264، قطر تکیه‌گاه‌ها و سنبه بارگذاری 6 میلی‌متر است. فاصله تکیه‌گاه‌ها از هم 255 میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین سرعت سنبه بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه است که شرایط بارگذاری شبه استاتیکی را فراهم می‌کند.

آزمون خمش سه نقطه‌ای، توسط دستگاه تست فشار شرکت اینسترون³ موجود در آزمایشگاه ضربه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. در شکل 7 نمونه‌ای از تست خمش انجام گرفته شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بارگذاری در راستای پوسته انجام شده است.

5- شبیه سازی اجزا محدود

به منظور بررسی صحت نتایج تجربی شبیه سازی اجزا محدود توسط نرم افزار آباکوس نسخه 6.14 انجام شده است که مراحل آن به صورت زیر است.

5-1- مدل سازی

مدل سازی اجزا محدود به این صورت انجام پذیرفته است که در ابتدا هندسه



Fig. 6 Fixture of three-point bending

شکل 6 فیکسچر خمش سه نقطه‌ای

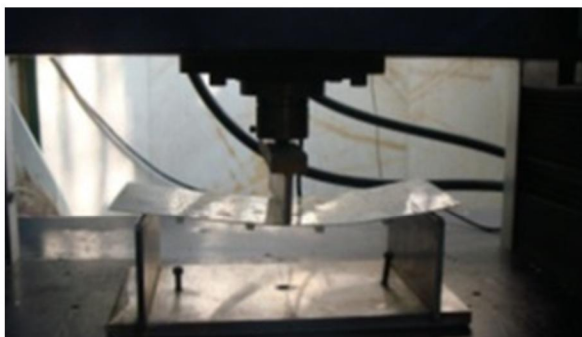


Fig. 7 Three-point bending test

شکل 7 تست خمش سه نقطه‌ای

روش ساخت به این صورت است که در ابتدا رزین و هاردنر به نسبت جرمی 2 به 1 به منظور ساخت فاز زمینه کامپوزیت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. رزین استفاده شده سی‌وای 219¹ و هاردنر استفاده شده اچ‌وای 5161² می‌باشد.

در مرحله بعد یک ردیف از الیاف رووینگ درون قالب سیلیکونی قرار داده می‌شود و به ترکیب رزین و هاردنر آغشته می‌شود. الیاف از مسیر از پیش تعیین شده‌ای دور می‌خوابی که روی قالب چوبی نصب شده است، پیچانده می‌شود تا کشش در ریب حفظ شود. این قالب در شکل 4 نشان داده شده است. قالب سیلیکونی در مرکز قالب چوبی قرار داده می‌شود و محل اتصال میخ‌ها روی قالب چوبی برای هر شکل شبکه تقویت کننده‌ای متفاوت است.

پس از قرار دادن یک ردیف از الیاف، ردیف بعدی الیاف با طی همان مسیر قبلی درون قالب سیلیکونی قرار داده می‌شود و به ترکیب رزین و هاردنر نیز آغشته می‌شود. این مراحل آن قدر ادامه پیدا می‌کند تا شیارهای قالب کاملاً از الیاف پر شود. پس از انجام این مراحل، پارچه‌های بریده شده به منظور ساخت پوسته استفاده می‌شود. بدین منظور، ابتدا یک لایه از پارچه بر روی ریب‌ها قرار داده می‌شود و به ترکیب رزین و هاردنر آغشته می‌شود. سپس لایه‌های بعدی به همین صورت بر روی لایه اول قرار داده شده و هر لایه به ترکیب رزین و هاردنر کاملاً آغشته می‌شود. پس از ساخت، نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در دمای محیط قرار داده می‌شود تا کاملاً خشک شوند. در شکل 5 ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.



Fig. 4 Molds for making samples

شکل 4 قالب مخصوص ساخت نمونه‌ها

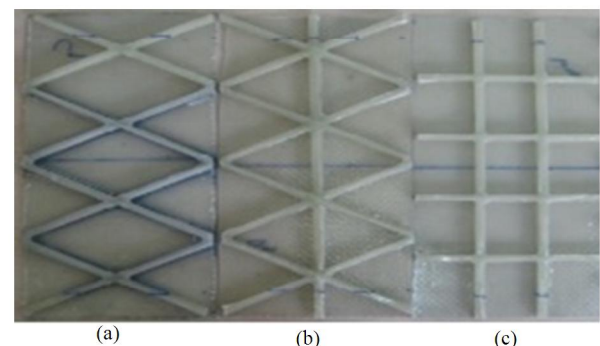


Fig. 5 Composite plates built in this research (a) rhombic rib (b) triangular rib (c) square rib

شکل 5 ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق (a) تقویت کننده لوزی (b) تقویت کننده مثلثی (c) تقویت کننده مربعی

³ Instiron

¹ CY219

² HY5161

ورق کامپوزیتی در نرم‌افزار ایجاد شد. سپس تقویت کننده‌ها ساخته شده و با توجه به شکل شبکه تقویت کننده‌ها، بر روی پوسته خارجی ایجاد گردیدند. ابعاد ورق مشبک 125×300 میلی‌متر است و سطح مقطع تقویت کننده‌ها 6×6 میلی‌متر است. طول آن با توجه به شکل شبکه متغیر است.

3-5- شرایط مرزی

سیستم مختصات عمومی برای ورق به صورتی انتخاب شده‌است که طول ورق در راستای محور x و عرض آن در راستای مثبت محور y قرار گرفته‌است. همچنین جهت z نیز در راستای ضخامت ورق در نظر گرفته شده‌است. شرایط مرزی ورق کامپوزیتی به این صورت است که سنبه بارگذاری تنها در راستای محور z می‌تواند حرکت کند. برای تکیه‌گاه‌ها قید به این صورت تعریف می‌شود که حرکت در تمام راستاها برای آن‌ها محدود می‌شود. به منظور اعمال قید روی پوسته و جلوگیری از لغزش ورق روی تکیه‌گاه‌ها دو قید اعمال شده‌است. در قید اول حرکت محور مرکزی، عمود بر راستای طولی ورق، در راستای محور x و در قید دوم نیز حرکت محور مرکزی، عمود بر راستای عرضی ورق در راستای محور y محدود شده‌است.

4-5- تعریف نوع تحلیل و تماس

پس از مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی، در مدول اسمبلی با توجه به اعمال بارگذاری با یک نرخ ثابت جابه‌جایی (2 میلی‌متر بر دقیقه) و همچنین شبه استاتیکی بودن مسأله، در مرحله تعیین نوع آنالیز، تحلیل بصورت استاتیکی انتخاب شد و در ادامه به منظور اتصال بین تقویت کننده‌ها از اتصال چسبناک² استفاده شد.

جدول 1 خواص مکانیکی تقویت کننده

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
501 MPa	X_t	24 GPa	E_1
60.48 MPa	X_c	5.5 GPa	E_2
53.186 MPa	Y_t	5.5 GPa	E_3
76.24 MPa	Y_c	1.9 GPa	G_{12}
53.186 MPa	Z_t	1.9 GPa	G_{13}
76.24 MPa	Z_c	2.5 GPa	G_{23}
80 MPa	S_{32}	0.275	ν_{12}
—	S_{13}	0.275	ν_{13}
80 MPa	S_{12}	0.0798	ν_{23}

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
287 MPa	X_t	13.7 GPa	E_1
144.5 MPa	X_c	13.7 GPa	E_2
287 MPa	Y_t	6 GPa	E_3
144.5 MPa	Y_c	1.49 GPa	G_{12}
20 MPa	Z_t	1.49 GPa	G_{13}
125 MPa	Z_c	1.86 GPa	G_{23}
18.83 MPa	S_{32}	0.3	ν_{12}
—	S_{13}	0.3	ν_{13}
18.83 MPa	S_{12}	0.21	ν_{23}

² Cohesive

ورق کامپوزیتی در نرم‌افزار ایجاد شد. سپس تقویت کننده‌ها ساخته شده و با توجه به شکل شبکه تقویت کننده‌ها، بر روی پوسته خارجی ایجاد گردیدند. ابعاد ورق مشبک 125×300 میلی‌متر است و سطح مقطع تقویت کننده‌ها 6×6 میلی‌متر است. طول آن با توجه به شکل شبکه متغیر است.

2-5- خواص مواد

به منظور مدل کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، نیاز به ثوابت مهندسی تقویت کننده‌ها و پوسته می‌باشد. آزمون کشش پوسته کامپوزیتی و تقویت کننده‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش موجود در آزمایشگاه مواد پیشرفته دانشگاه خواجه نصیر و بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام - دی 3039 ام-100 انجام شده‌است. مدول الاستیسیته تقویت کننده‌ها، پوسته و همچنین استحکام کششی در راستای الیاف بدست آمده‌است. ثوابت مهندسی دیگر با استفاده از نمونه‌ها در پروژه‌ها و مقالاتی که از مواد مشابه این تحقیق استفاده کرده‌اند، حاصل شده‌است. به منظور تست کشش و مطابق استاندارد 5 نمونه از پوسته و 5 نمونه از ریب مطابق شکل 8 آماده شده‌است. در شکل 9 تست کشش انجام شده بر روی نمونه نشان داده شده‌است.

ابعاد نمونه‌های تست کشش تقویت کننده و پوسته مطابق با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام- دی 3039 ام-100، 100×25 میلی‌متر می‌باشد. فک پایینی دستگاه ثابت است و فک بالایی با سرعت ثابت 5 میلی‌متر بر دقیقه به سمت بالا حرکت داده می‌شود تا نمونه گسیخته شود. مدول الاستیسیته تقویت کننده‌ها و پوسته در راستای الیاف (E_1) و همچنین استحکام کششی در



Fig. 8 Samples of tensile test

شکل 8 نمونه‌های تست کشش

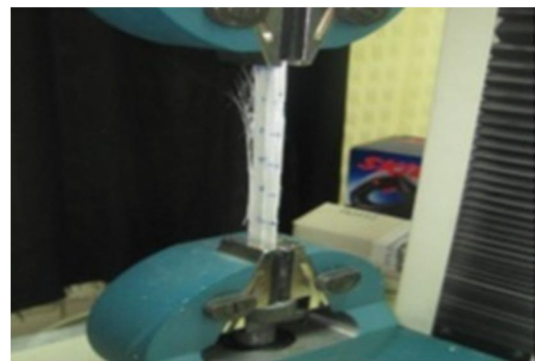


Fig. 9 Tensile test

شکل 9 تست کشش

¹ ASTM-D3039M-00

5-5- المان بندی

برای پوسته از المان غیر خطی 8 گره اس 8 آر¹ و برای تقویت کننده‌ها از المان 20 گره غیر خطی سی 3 دی 8 آر² استفاده شده است. اندازه مناسب مش برای المان‌های پوسته و تقویت کننده با چندین بار المان بندی سازه و همگرایی نتایج آن‌ها بدست آمده است. تعداد المان‌های استفاده شده وابسته به تعداد ریب‌های در نظر گرفته شده برای سازه تقویت شده، متفاوت می‌باشد. نمونه‌ای از المان بندی انجام شده در شکل 10 نشان داده شده است.

6- تحلیل شروع تخریب

در این تحقیق پاسخ ماده سالم الاستیک خطی فرض شده است و مدل به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که رفتار مواد تقویت شده با الیف را پیش بینی کند؛ بدون آن که تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای پلاستیکی در ماده دیده شود. نحوه بررسی شروع تخریب در ورق به این صورت است که ابتدا تحلیل عددی تست خمش سه نقطه‌ای در نرم افزار آباکوس انجام گرفته و تا زمان اتمام تحلیل عددی طی گام‌های متعدد مقادیر مؤلفه‌های تنش هر المان در نرم افزار استخراج و ذخیره می‌شود. تعداد المان‌ها با توجه به شکل شبکه مختلف، متفاوت است. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار محاسباتی متلب و بر اساس معیار هشین، شروع تخریب در هر المان تحلیل و بررسی می‌شود. امکان استفاده از معیار هشین به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس وجود ندارد. به همین دلیل از کد نوشته شده در متلب که ورودی های آن تنش‌ها در هر المان است، استفاده شده است. بر اساس این تحلیل، فرایند تخریب سازه از آلامنی آغاز می‌شود که بر اساس معیار هشین و روابط مربوط به این معیار تخریب که در معادلات آورده شده؛ شروع تخریب در آن المان نسبت به المان‌های دیگر در مرحله زودتری اتفاق بیافتد. پس از شروع تخریب باری که سازه تحمل می‌کند، کاهش می‌یابد. معیار تخریب هشین ضمن داشتن دقت محاسباتی بالا، قابلیت تشخیص شکل مود تخریب را نیز در بارگذاری استاتیکی دارد. الگوریتم تخریب به این صورت است که اولین گام در بررسی شروع تخریب تحلیل تنش ورق کامپوزیتی مشبک است. بدین منظور با استفاده از مدل سازی عددی انجام گرفته در نرم افزار آباکوس 6 مؤلفه تنش مربوط به هر المان یعنی σ_{11} ، σ_{22} ، σ_{33} ، τ_{12} ، τ_{13} و τ_{23} در گام‌های متعدد تا لحظه اتمام حل عددی از نرم افزار استخراج شده و ذخیره می‌شود. سپس معیار هشین نوشته شده در نرم افزار متلب برای هر المان و در هر گام تحلیل عددی بررسی شده است. در این معیار چهار شکل مختلف تخریب برای لایه تک جهته در بارگذاری استاتیکی مطرح می‌شود که به صورت روابط

(1) تا (6) می باشد [20]:

1- کشش الیف ($\sigma_{11} > 0$):

$$(e_1^t)^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \quad (1)$$

2- فشار الیف ($\sigma_{11} < 0$):

$$(e_1^c)^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \quad (2)$$

3- کشش فاز زمینه ($\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$):

$$(e_2^t)^2 = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_t^2} + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2}{S_{12}^2} \quad (3)$$

4- فشار فاز زمینه ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$(e_2^c)^2 = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c}\right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2}{S_{12}^2} \quad (4)$$

5- $\sigma_{33} > 0$:

$$(e_3^t)^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 \quad (5)$$

6- $\sigma_{33} < 0$:

$$(e_3^c)^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_c}\right)^2 \quad (6)$$

در معادلات (1) تا (6)، X_t بیانگر استحکام کشش طولی در راستای الیف، X_c بیانگر استحکام فشاری در راستای الیف و Y_t و Y_c نیز استحکام‌های کششی عرضی و Z_t و Z_c نیز بیانگر استحکام‌های فشاری عرضی می‌باشند. مقادیر $(e_1^t)^2$ ، $(e_1^c)^2$ ، $(e_2^t)^2$ ، $(e_2^c)^2$ ، $(e_3^t)^2$ و $(e_3^c)^2$ در روابط مفهوم خاصی ندارد و فقط با مقادیر سمت راست تساوی برابری، نحوه تحلیل به این صورت است اگر حداقل یکی از روابط فوق برای تنش‌های هر المان در هر گام از تحلیل عددی مقداری بیش تر از یک داشته باشند بر اساس معیار هشین سازه در آن المان تخریب شده است. مرحله قبل برای تمام المان‌های مدل سازی عددی بررسی شد و هر المان در گام مشخصی بر اساس معیار هشین شروع به تخریب شدن می‌کند و بسیاری از المان‌ها نیز در هیچ یک از گام‌های تحلیل عددی دچار تخریب نمی‌شود. به طور کلی تخریب از آلامنی شروع می‌شود که در گام زودتری از تحلیل عددی بر اساس معیار هشین شروع به تخریب کند.

7- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از تست‌های تجربی و مدل سازی عددی اثر سه شکل شبکه مثلثی (ایزوگرید)، مربعی و لوزی شکل بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی ارائه خواهد شد که به منظور مقایسه بهتر نتایج، دو پارامتر بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه بصورت زیر تعریف می‌گردد:

بار بیشینه ویژه: نسبت بیشترین نیروی وارد شده به ورق به جرم ورق می‌باشد -
باشد که واحد آن N/gr می‌باشد.

سفتی ویژه: نسبت سفتی ورق به جرم ورق می‌باشد که در واقع از تقسیم شیب نمودار نیرو- جابجایی بر جرم ورق بدست می‌آید و واحد آن N/mm.gr می‌باشد.

با توجه به دو تعریف فوق، هر چه مقدار این پارامترها بیش تر باشد؛ نشان-

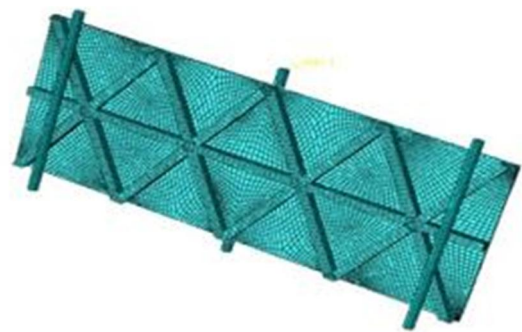


Fig. 10 An example of meshing

شکل 10 نمونه‌ای از مش بندی

¹ S8R
² C3D8R

دهنده این مطلب می‌باشد که ورق دارای رفتار خمشی بهتری است.

1-7- ورق کامپوزیتی با تقویت کننده‌های مثلثی شکل

متداول‌ترین شکل شبکه تقویت کننده‌ها ساختار مثلثی یا ایزوگرید می‌باشد که سه نمونه از آن ساخته و آزمایش تجربی گرفته شد. در جدول 3 میانگین نتایج تجربی و عددی این سه نمونه آورده شده است. همچنین در شکل 11 نیز نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی یکی از نمونه‌های تست شده، قابل مشاهده است. این نمونه 163 گرمی در تست تجربی 732 نیوتن نیرو بار تحمل کرده است. همانگونه که در شکل 11 نیز مشاهده می‌شود؛ نتایج تجربی و عددی با یکدیگر دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشد بطوریکه در قسمت بار بیشینه 14 درصد و در قسمت سفتی مخصوص 17 درصد اختلاف وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل 11 نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است. در شکل 12 نمونه مثلثی شکل پس از انجام تست تجربی نشان داده شده است.

جدول 3 میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه مثلثی

سفتی ویژه (N/mm ² ·gr)	بار بیشینه ویژه (N/gr)	
0.206	4.07	تجربی
0.170	3.48	عددی
17%	14%	اختلاف بین تجربی و عددی

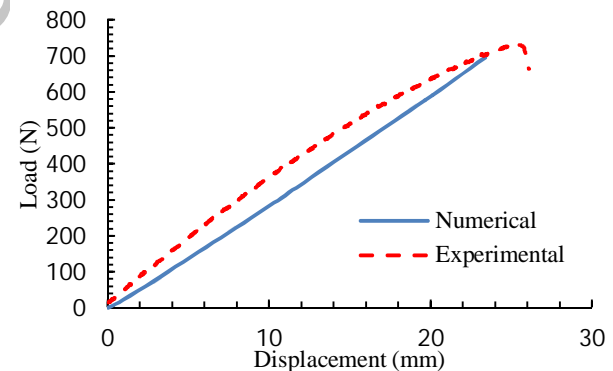


Fig. 11 Numerical and experimental results of a triangular sample

شکل 11 نتایج عددی و تجربی نمونه مثلثی

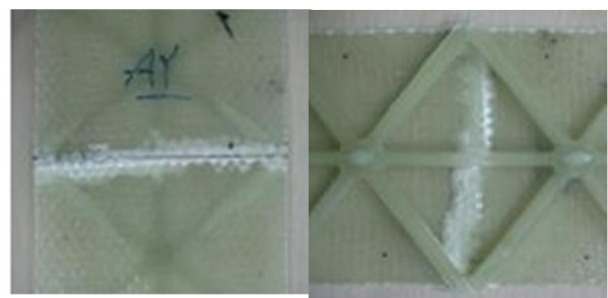


Fig. 12 Triangular samples after experimental test

شکل 12 نمونه مثلثی شکل پس از انجام تست تجربی

2-7- ورق کامپوزیتی با تقویت کننده‌های مربعی شکل

یکی از الگوهای جدید ساختارهای مشبک، الگوی مربعی یا ارتوگرید می‌باشد. در قسمت تجربی برای این نوع تقویت کننده نیز سه مرتبه آزمایش تکرار شد تا نتایج بدست آمده دارای اعتبار کافی باشند. در جدول 4 میانگین نتایج تجربی و عددی این سه نمونه آورده شده است. همچنین در شکل 13 نیز نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی یکی از نمونه‌ها تست شده، قابل مشاهده است. این نمونه 141 گرمی 972 نیوتن نیرو تحمل کرده است. در قسمت بار بیشینه 6 درصد و در قسمت سفتی مخصوص 14 درصد اختلاف بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل 13 نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است.

در شکل 14 نمونه مربعی شکل پس از انجام تست تجربی نشان داده شده است.

3-7- ورق کامپوزیتی با تقویت کننده‌های لوزی شکل

ورق‌های کامپوزیتی مشبک با تقویت کننده‌های لوزی شکل یکی از پرکاربردترین این نوع ورق‌ها می‌باشد. در جدول 5 میانگین نتایج تجربی و عددی سه نمونه مورد آزمایش آورده شده است.

جدول 4 میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه مربعی

Table 4 Average of experimental and numerical results of a square sample

سفتی مخصوص (N/mm ² ·gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
0.396	6.45	تجربی
0.338	6.08	عددی
14%	6%	اختلاف بین تجربی و عددی

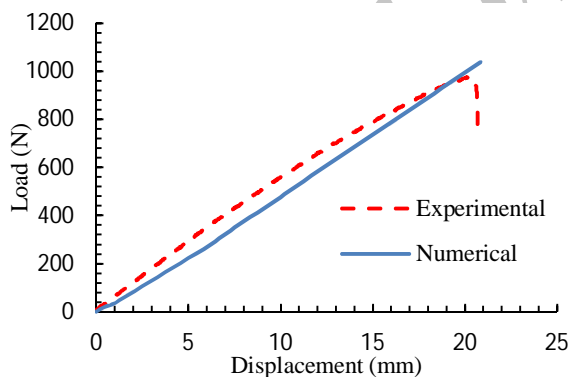


Fig. 13 Numerical and experimental results of a square sample

شکل 13 نتایج عددی و تجربی نمونه مربعی

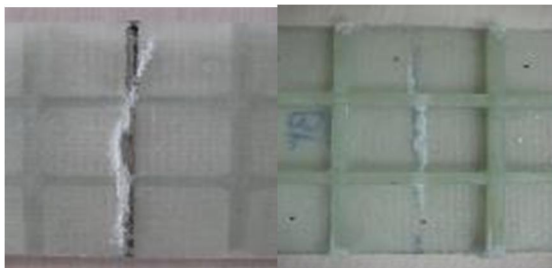


Fig. 14 Square samples after experimental test

شکل 14 نمونه مربعی شکل پس از انجام تست تجربی

البته عکس این موضوع را نیز می‌توان اشاره کرد که در یک نیروی ثابت، نمونه مربعی دارای خیز کمتری می‌باشد که این دو مطلب دارای کاربردهای زیادی در صنایع مختلف می‌باشند. سفتی ویژه نمونه مربعی از لحاظ تجربی 1.92 و از لحاظ عددی 1.98 برابر سفتی ویژه نمونه مثلثی می‌باشد. نکته قابل توجهی که از این نمودار دریافت می‌شود این است که برخلاف بار بیشینه ویژه کم نمونه لوزی شکل، این نمونه دارای سفتی ویژه نسبتاً مناسبی می‌باشد چرا که سفتی ویژه این نمونه 0.53 نمونه مربعی و 1.02 نمونه مثلثی می‌باشد. بنابراین اولویت بندی این سه تقویت کننده از لحاظ سفتی ویژه به ترتیب مربعی، لوزی و مثلثی شکل می‌باشد. شاید علت اینکه تقویت کننده مربعی شکل دارای سفتی بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر می‌باشد را بتوان در وجود تقویت کننده افقی بیشتر جست و جو کرد.

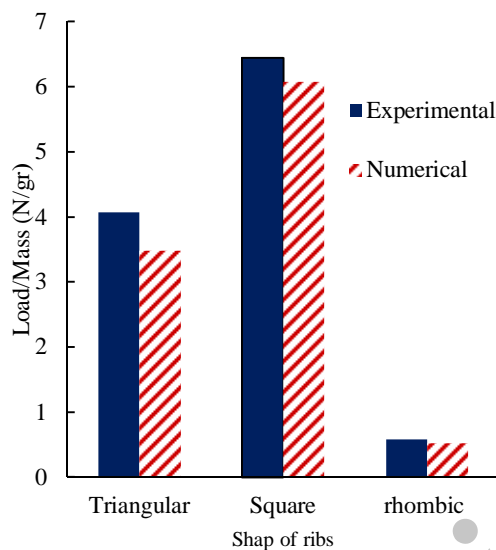


Fig. 16 Comparison of experimental and numerical of Load/Mass for different samples

شکل 16 مقایسه تجربی و عددی بار بیشینه ویژه نمونه‌های مختلف

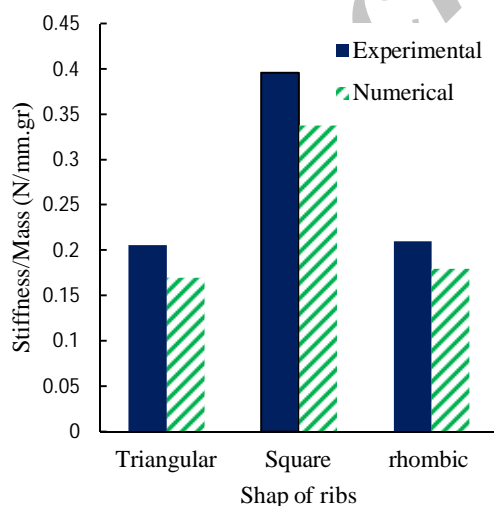


Fig. 17 Comparison of experimental and numerical of Stiffness/Mass for different samples

شکل 17 مقایسه تجربی و عددی سفتی ویژه نمونه‌ها

همچنین در شکل 15 نیز نمودار نیرو-جابجایی، تجربی و عددی یکی از نمونه‌ها آزمایش شده، قابل مشاهده است. این نمونه 135 گرمی در آزمایش تجربی، 80 نیوتن نیرو تحمل کرده است. در قسمت بار بیشینه مخصوص، 10 درصد و در قسمت سفتی مخصوص، 14 درصد اختلاف بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل 15 نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است.

4-7- مقایسه اثر شکل تقویت کننده‌ها

به منظور مقایسه بهتر و بررسی اثر شکل تقویت کننده‌ها، بار بیشینه ویژه و سفتی ویژه هر سه نوع تقویت کننده در شکل‌های 16 و 17 ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود؛ ورق با تقویت کننده مربعی شکل، بیشترین استحکام و سفتی خمشی را دارا می‌باشد.

بار بیشینه ویژه تحمل شده توسط ورق با تقویت کننده مربعی از لحاظ تجربی 1.58 برابر و از لحاظ عددی 1.75 برابر بار بیشینه تحمل شده توسط نمونه مثلثی می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود، ورق با تقویت کننده لوزی شکل بار بیشینه ویژه تحمل شده مناسبی نسبت به دو نمونه دیگر ندارد، چرا که بار بیشینه ویژه تحمل شده توسط آن فقط 0.09 بار بیشینه ویژه نمونه با تقویت کننده مربعی و 0.14 بار بیشینه ویژه نمونه مثلثی شکل می‌باشد. به این علت تقویت کننده مربعی شکل دارای استحکام بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر است که دارای تقویت کننده افقی بیشتری می‌باشد. در بارگذاری خمشی سه نقطه، بخش اعظمی از بار توسط ریب‌های افقی تحمل می‌شود و تقویت کننده‌های عمودی نقش کمتری در تحمل بار را دارا می‌باشند. در شکل 17 مشاهده می‌شود که سفتی ویژه نمونه مربعی شکل نسبت به دو نمونه دیگر بیشتر می‌باشد. این بدین معنی می‌باشد که در یک جابجایی یا خیز ثابت، ورق با تقویت کننده مربعی شکل نیروی بیشتری را تحمل می‌کند.

جدول 5 میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه لوزی شکل

Table 5 Average of experimental and numerical results of a rhombic sample

سفتی مخصوص (N/mm.gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
0.21	0.586	تجربی
0.18	0.522	عددی
14%	10%	اختلاف بین تجربی و عددی

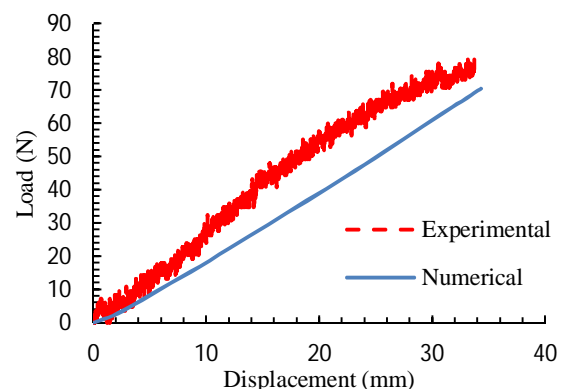


Fig. 15 Numerical and experimental results of a rhombic sample

شکل 15 نتایج عددی و تجربی نمونه لوزی

8- نتیجه‌گیری

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی بدلیل ویژگی‌های خاص این مواد، ایده‌هایی بمنظور تقویت و بهبود کارایی آن‌ها ارائه شد. ایده‌هایی که سبب ساخت سازه‌های کامپوزیتی مشبک شد. خواص مکانیکی ایده‌آل، سفتی ویژه و استحکام بالا و مقاومت در برابر ضربه و خستگی این نوع سازه را منحصر بفرد کرده است. در این تحقیق رفتار خمشی ورق‌های مشبک بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت‌کننده‌های مثلثی، مربعی و لوزی شکل در نظر گرفته شد. برای ساخت این ورق‌ها، قالب سیلیکونی طراحی و ساخته شد و سپس از روش لایه‌چینی و لایه‌پیچی دستی برای ساخت ورق‌ها استفاده شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند که برای این منظور نیز فیکسچری طراحی و ساخته شد. پس از انجام آزمایش برای بررسی درستی نتایج بدست آمده، مسئله بصورت عددی نیز حل گشته و نتایج مورد مقایسه قرار گرفتند. برای مقایسه بهتر اثر شکل سه نوع تقویت‌کننده، دو پارامتر بار بیشینه ویژه که نشان‌دهنده استحکام ورق می‌باشد و همچنین پارامتر سفتی ویژه که در واقع نشان‌دهنده شیب نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد، تعریف شد. بطور کلی نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

- 1- طراحی و ساخت قالب سیلیکونی و فیکسچر برای انجام آزمایش.
- 2- بار بیشینه ویژه تحمل شده توسط ورق با تقویت کننده مربعی از لحاظ تجربی 1.58 برابر و از لحاظ عددی 1.75 برابر بار بیشینه تحمل شده توسط نمونه مثلثی می‌باشد.
- 3- بار بیشینه ویژه تحمل شده توسط نمونه لوزی شکل 0.09 بار بیشینه ویژه نمونه با تقویت کننده مربعی و 0.14 بار بیشینه ویژه نمونه مثلثی شکل می‌باشد.
- 4- ترتیب قرار گرفتن شکل تقویت‌کننده‌ها از لحاظ ماکزیمم استحکام به ترتیب نمونه مربعی، نمونه مثلثی و نمونه لوزی شکل می‌باشد و نمونه مربعی بیشترین استحکام را دارا می‌باشد.
- 5- سفتی ویژه نمونه مربعی از لحاظ تجربی 1.92 و از لحاظ عددی 1.98 برابر سفتی ویژه نمونه مثلثی می‌باشد.
- 6- سفتی ویژه نمونه لوزی شکل 0.53 نمونه مربعی و 1.02 نمونه مثلثی می‌باشد.
- 7- ترتیب قرار گرفتن شکل تقویت‌کننده‌ها از لحاظ ماکزیمم سفتی ویژه به ترتیب نمونه مربعی، نمونه لوزی و نمونه مثلثی شکل می‌باشد و نمونه مربعی بیشترین سفتی ویژه را دارا می‌باشد.
- 8- ماکزیمم اختلاف بین نتایج تجربی و عددی 17 درصد می‌باشد.

9- مراجع

- [1] L. Yang, Y. Yan, N. Kuang, Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact, *Polymer Testing*, Vol. 32, No. 7, pp. 1163-1173, 2013.
- [2] P. Jadhav, P. R. Mantena, Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading, *Composite structures*, Vol. 77, No. 3, pp. 353-363, 2007.
- [3] T. Hosomura, T. Kawashima, D. Mori, New CFRP structural elements (for spacecraft), *Composite materials: Mechanics, mechanical properties and fabrication*, pp. 447-452, 1981.
- [4] R. F. Gibson, Y. Chen, H. Zhao, Improvement of vibration damping capacity and fracture toughness in composite laminates by the use of polymeric interleaves, *Journal of engineering materials and technology*, Vol. 123, No. 3, pp. 309-314, 2001.
- [5] S. Kidane, G. Li, J. Helms, S.-S. Pang, E. Woldesenbet, Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 2003.
- [6] C. Gan, *Behavior of grid-stiffened composite structures under transverse loading*, 2003.
- [7] C. Gan, R. F. Gibson, G. M. Newaz, Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading, *Experimental mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004.
- [8] Y. Chen, R. F. Gibson, Analytical and experimental studies of composite isogrid structures with integral passive damping, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 127-143, 2003.
- [9] H. Fan, F. Meng, W. Yang, Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers, *Composite Structures*, Vol. 81, No. 4, pp. 533-539, 2007.
- [10] P. Jadhav, P. R. Mantena, R. F. Gibson, Energy absorption and damage evaluation of grid stiffened composite panels under transverse loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 191-199, 2006.
- [11] Z. Zhang, H. Chen, L. Ye, Progressive failure analysis for advanced grid stiffened composite plates/shells, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1, pp. 45-54, 2008.
- [12] M. Yazdani, H. Rahimi, A. A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading, *Scientific Research and Essays*, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.
- [13] M. Yazdani, G. Rahimi, The behavior of GFRP-stiffened and-unstiffened shells under cyclic axial loading and unloading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.
- [14] M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, R. Ansari, On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells, *Acta Mechanica*, Vol. 225, No. 2, pp. 609-623, 2014.
- [15] M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, M. Tajik, F. Pellicano, Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 509-518, 2015.
- [16] M. Yazdani, G. Rahimi, The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010.
- [17] G. Rahimi, M. Zandi, S. Rasouli, Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading, *Aerospace science and technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 198-203, 2013.
- [18] P. J. Higgins, P. Wegner, A. Viisoreanu, G. Sanford, Design and testing of the Minotaur advanced grid-stiffened fairing, *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1, pp. 339-349, 2004.
- [19] M. Hedayatian, G. H. Liaghat, G. H. Rahimi, M. H. Pol, Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014.
- [20] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, No. 2, pp. 329-334, 1980.