ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

 * وحيد طحانى 1 ، داو د شاھقليان قھفرخى 2 ، غلامحسين رحيمى *

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 rahimi_gh@modares.ac.ir، 14115- 111

| چکیدہ | اطلاعات مقاله |
|---|--|
| با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی، بدلیل ویژگیهای منحصربفردشان، 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 پرکاربرد در صنایع هوایی، موشکی و دریایی تبدیل نموده است. ورقهای کامپوزیتی مشبک، از یک پوسته نازک کامپوزیتی متصل | مقاله پژوهشی کامل دریافت: 19 فروردین 1395 پذیرش: 13 خرداد 1395 ارائه در سایت: 12 تیر 1395 |
| به یک سری تقویت کنندههای کامپوزیتی تشکیل شده است. شبکه تقویت کنندهها منجر به افزایش قابل توجه سفتی و استحکام سازه میشود. در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی اثر شکل تقویت کنندهها بر رفتار خمشی ورقهای کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت کنندههای 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 تشده است. طلی و ساخته 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 1.8 برابر ورق با تقویت کننده مثلثی و لوزی شکل میباشد. همچنین استحکام خمشی ورق با تقویت کننده مربعی 3.8 برابر ورق مایشه با نتایج تجربی و ایش مشد که اختلاف بسیار | <i>کلید واژگان:</i> خمش ورق کامپوزیتی مشبک تقویت کننده مثلی شکل تقویت کننده لوزی شکل |
| 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*

ABSTRACT

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

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 threepoint 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

Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 303-311, 2016 (in Persian)

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

Please cite this article using: V. Tahani, D. Shahgholian Ghahfarokhi, Gh. H. Rahimi, Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite plates, Modares

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جایگزینی 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 پنلهای 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 می توان 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 می شود [2]. سازه های مشبک، مجموعه ای از تقویت کننده های متصل بهم هستند که تشکیل یک ساختار پیوسته میدهد. این مجموعه از تقویت کننده ها که شکل شبکه ای به سازه می دهند 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 گرفته اند [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 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 پنلهای کامپوزیتی مشبک، با استفاده از روش المان محدود را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه پارامتری نشان داد که پنلهای کامپوزیتی با شکل شبکه مثلثی، در شکل مودها مشابه یک سازه همسانگرد رفتار میکنند. کیدانه [5] به بررسی کمانش سازه مشبک پرداخت و نیروی کامانش 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

با ارائه مدلی تحلیلی، مطالعه پارامتری عوامل مؤثر بر کمانش پوسته تقویت را انجام داد. قنگشنگ [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 مراخی مشخصات جذب انرژی و تخریب پنلهای کامپوزیتی تقویت شده مشبک تحت بار شبه استاتیکی خمش سهنقطهای را ارائه کردند و روشی به منظور مدلسازی چنین ساختارهایی، تحت بار شبه استاتیکی را ارائه دادند. نتایج آزمایش و شبیهسازیها برای پنلهای 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].

جادهاو 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 پنلهای 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 پنلهای کامپوزیتی به صورت تجربی تحت بار ضربه سرعت بالا تعلیل و نتایج با استفاده از مدلسازی عددی بهینه سازی شد. هدف از بهینه-سازی بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص پنلهای کامپوزیتی مشبک بود. فان و همکارانش به بررسی ساندویچ پانلها با هسته مشبک شش ضلعی تقویتشده با الیاف کربن پرداختند. نتایج تجربی نشان می دهد که سازه مشبک تقویتشده با الیاف کربن، سفت ر و مستحکم تر از فومها و لانه زنبوریها می باشد [9].

جادهاو و همکاران در تحقیق دوم [10] مشخصات جذب انرژی پنلهای کامپوزیتی ایزوگرید تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی را بررسی کردند. آنها تست و شبیه سازی های المان محدود را بر روی پنل های ایزو گرید تحت بار خمش سه نقطهای انجام دادند. نتایج نشان داد که بارگذاری در راستای تقویت کننده ها نسبت به بارگذاری در راستای پوسته منجر به جذب انرژی مخصوص و جابجایی بزرگتر می شود. ژانگ و همکاران [11] روش شکست پیشرفتهای را به منظور شبیهسازی و پیشرفت مدهای شکست چندگانه صفحات و پوسته های کامپوزیتی تقویت شده، بر اساس یک مدل المان تقویت شده مثلثی توسعه دادند. هر دو شکست تقویت کنندهها و پوسته در این تحقیق بررسی شد که شامل ترک در ماتریس، شکست الیاف، شکست برشی الياف- ماتريس، لايه لايه شدن پوسته و شكست الياف در تقويت كننده 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. هم چنین 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 کمانشی سازه را کاهش میدهد، اما تأثیر کمی بر روی توانایی انتقال بار درون صفحهای دارد. رحیمی و همکاران در تحقیقاتی جداگانهای به تحلیل ارتعاشی، کمانشی و خستگی سازههای مشبک نیز پرداختهاند [15-12]. آنها [17,16] اثر سطح مقطع تقويت كنندهها بر مقاومت كمانشي

² Composite Grid Stiffened Structures

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 کمانش 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 نشان دهنده 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 نمی رسد که هنوز هم معیاری وجود داشته باشد که بهعنوان یک معیار تحت شرایط بارگذاری عمومی کاملا 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 شدهاست. 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 می شود؛ 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 تقویت کنندهها بر رفتار خمشی ورقهای مشبک میباشد. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت کنندههای 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 ورق های مشبک

سازههای کامپوزیتی مشبک، از یک پوسته نازک یکپارچه کامپوزیتی، متصل به یک سری از تقویت کنندههای 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. معمولا هر سازه از تکرار چند سلول واحد تشکیل شده و استحکام سازه کامپوزیتی رابطه مستقیم با این واحدها دارد، در ضمن محل برخورد تقویت کنندهها، گره نامیده میشود [18]. تقویت کنندهها با استفاده از رزین به پوسته متصل میشوند و به علت اینکه طول تقویت کنندهها در مقایسه با سایر ابعاد آن بزرگتر است، رفتاری شبیه تیرها از خود بروز از نوع ایی¹ و به منظور ساخت پوسته از الیاف رووینگ از جنس شیشه و استفاده شده است. شبکه ریبها نقش تقویت کننده 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



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

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

ورق کامپوزیتی بر اساس استاندارد ای استیام دی²7264³، 300×125 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، رشتهپیچی درون شیارهای پلاستیکی و رشتهپیچی درون شیارهای فلزی اشاره کرد. روش شکلدهی آزاد هزینه پایینی داشته و منجر به کیفیت پایین تقویت کنندهها می شوند. 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 می گیرد و بر روی آن پوسته خارجی رشته پیچی میشود. این روش هزینه نسبتا بالایی دارد و کیفیت تقویت کننده ها مناسب است. روش استفاده شده در ساخت نمونهها در این تحقیق، روش رشتهپیچی 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 تقویت کننده بلافاصله پارچههای کامپوزیتی بر روی تقویت کنندهها قرار داده می شود و با ترکیب رزین و هاردنر آغشته می شود. مزیت این روش ساخت همزمان تقویت کننده و پوسته می باشد که به علت این همزمانی امکان جدایش ریب از پوسته تقریبا به صفر میرسد. در شکل 3، نمونهای از قالب سیلیکونی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.



Fig. 3 Silicone molds

شكل 3 قالب سيليكونى

 ^{1}E

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.41.4

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 سیوای¹219 و هاردنر استفاده شده اچوای ²5161 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 شده ای دور میخهایی 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 کننده ای متفاوت است.

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



Fig. 4 Molds for making samples

شكل 4 قالب مخصوص ساخت نمونهها



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

شکل 5ورق های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق (a) تقویتکننده لوزی (b) تقویتکننده مثلثی (c) تقویتکننده مربعی

¹ CY219 ² HY5161

4- آزمایش های تجربی

پس از ساخت نمونهها، بهمنظور بررسی رفتار خمشی، تست خمش سهنقطهای انجام شد. تست خمش سه نقطهای ورق کامپوزیتی مشبک بر اساس استاندارد ای اس تی ام 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 ای اس تی ام دی 7264، قطر تکیه گاهها و سنبه بارگذاری 6 میلی متر است. فاصله تکیه گاهها از هم 255 میلی متر می باشد؛ همچنین سرعت سنبه بارگذاری 2 میلی متر بر دقیقه است که شرایط بارگذاری شبه استانیکی را فراهم می کند.

آزمون خمش سه نقطهای، توسط دستگاه تست فشار شرکت اینستریون³ 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 بهصورت زیر است.

5-1-مدلسازى

مدلسازی 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

³ Instiron

راستای الیاف تقویت کنندهها و پوسته (X_t) با استفاده از تست کشش بدست

آمد و بقیه ثوابت مهندسی از مقالات با مواد مشابه [19,2] بدست آمد که در

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 شده است.

شرایط مرزی ورق کامپوزیتی به این صورت است که سنبه بارگذاری تنها در

راستای محور z میتواند حرکت کند. برای تکیه گاهها قید به این صورت

تعریف می شود که حرکت در تمام راستاها برای آن ها محدود می شود. به

منظور اعمال قید روی پوسته و جلوگیری از لغزش ورق روی تکیه گاهها دو

قید اعمال شده است. 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

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 بهمنظور اتصال بین تقویت کنندهها از اتصال چسبناک ُ

Table 1 Mechanical properties of rib

خواص مكانيكي

Χ.

 X_c

Υ.

 Y_c

 Z_t

 Z_c

 S_{32}

 S_{13}

 S_{12}

خواص مكانيكي X_t

 X_c

Υ.

 Y_c

 Z_t

 Z_c

 S_{32}

 S_{13}

 S_{12}

Table 2 Mechanical properties of shell

مقدار

501 MPa

60.48 MPa

53.186 MPa

76.24 MPa

53.186 МРа

76.24 MPa

80 MPa

80 MPa

مقدار

287 мРа

144.5 MPa

287 MPa

144.5 MPa

20 мРа

125 MPa 18.83 MPa

18.83 MPa

راستای عرضی ورق در راستای محور y محدود شده است.

مقدار

24 GPa

5.5 GPa

5.5 GPa

1.9 GPa

1.9 GPa

2.5 GPa

0.275

0.275

0.0798

مقدار

13.7 GPa

13.7GPa

6 GPa

1.49 GPa

1.49 GPa

1.86 GPa

0.3

0.3

0.21

5-4- تعريف نوع تحليل و تماس

جدول 1 خواص مكانيكي تقويتكننده

جدول 2 خواص مكانيكي يوسته

استفاده شد.

خواص مكانيكى

 E_1

 E_2

 E_3

 G_{12}

 G_{13}

 G_{23}

 v_{12}

 v_{13}

 v_{23}

 E_1

 E_2

 E_3

 G_{12}

 G_{13}

 G_{23}

 v_{12}

 v_{13}

*v*₂₃

خواص مكانيكي

جداول 1 و 2 آورده شده است.

3-5- شرايط مرزى

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

2-5- خواص مواد

به منظور مدل کردن نمونه ها در نرم افزار المان محدود آباکوس، نیاز به ثوابت مهندسی تقویت کننده ها و پوسته می باشد. آزمون کشش پوسته کامپوزیتی و تقویت کننده ها با استفاده از دستگاه تست کشش موجود در آزمایشگاه مواد پیشرفته دانشگاه خواجه نصیر و بر اساس استاندارد اى استى ام -دى 3039 ام -¹00 انجام شده است. مدول الاستيسته تقويت-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 شده است. به منظور تست کشش و مطابق استاندارد 5 نمونه از پوسته و 5 نمونه از ریب مطابق شکل 8 آماده شدهاست. در شکل 8 نمونههای مربوط به تست کشش نشان داده شدهاست. در شکل 9 تست کشش انجام شده بر روی نمونه نشان داده شده

ابعاد نمونههای تست کشش تقویت کننده و پوسته مطابق با استاندارد اىاستىام-دى 3039 ام-00، 25×100 مىلىمتر مىباشد. فك پايىنى دستگاه ثابت است و فک بالایی با سرعت ثابت 5 میلیمتر بر دقیقه به سمت بالا حركت داده مى شود تا نمونه گسيخته شود. مدول الاستيسيته تقويت-کنندهها و پوسته در راستای الیاف (E1) و همچنین استحکام کششی در

| | 5) | | | | | |
|----|----|---|--|---|----|--|
| | S2 | - | | - | F. | |
| 5 | 1 | | | | | |
| St | | | | 1 | | |
| | 2 | | | | | |

Fig. 8 Samples of tensile test

شکل 8 نمونههای تست کشش



Fig. 9 Tensile test

شکل 9 تست کشش

1 ASTM-D3039M-00

² Cohesive

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.41.4

 $(\sigma)^2$

5-5- المان بندى

برای پوسته از المان غیرخطی 8 گره اس8آر 1 و برای تقویت کنندهها از المان 20 گره غیرخطی سی3دی8آر² استفاده شده است. اندازه مناسب مش برای المان های یوسته و تقویت کننده با چندین بار المان بندی سازه و همگرایی نتايج آنها بدست آمدهاست. تعداد المانهای استفاده شده وابسته به تعداد ریبهای در نظرگرفتهشده برای سازه تقویت شده، متفاوت میباشد. نمونهای از المان بندی انجام شده در شکل 10 نشان داده شدهاست.

6- تحليل شروع تخريب

در این تحقیق پاسخ ماده سالم الاستیک خطی فرض شدهاست و مدل به گونهای در نظر گرفته می شود که رفتار مواد تقویت شده با الیاف را پیشبینی کند؛ بدون آن که تغییرشکل قابل ملاحظهی پلاستیکی در ماده دیده شود. نحوه بررسی شروع تخریب در ورق به این صورت است که ابتدا تحلیل عددی تست خمش سهنقطهای در نرمافزار آباکوس انجام گرفته و تا زمان اتمام تحلیل عددی طی گامهای متعدد مقادیر مؤلفههای تنش هر المان در نرمافزار استخراج و ذخیره می شود. تعداد المان ها با توجه به شکل شبکه مختلف، متفاوت است. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرمافزار محاسباتی متلب و بر اساس معیار هشین، شروع تخریب در هرالمان تحلیل و بررسی میشود. امکان استفاده از معیار هشین به صورت سهبعدی در نرمافزار 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، فرايند تخريب سازه از الماني آغاز ميشود كه بر اساس معيار هشين و روابط مربوط به این معیار تخریب که در معادلات آورده شده؛ شروع تخریب در آن المان نسبت به المان های دیگر در مرحله زودتری اتفاق بیافتد. پس از شروع تخريب بارى كه سازه تحمل مىكند، كاهش مىيابد. معيار تخريب هشين 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 مدلسازی عددی انجام گرفته در نرمافزار آباکوس 6 مؤلفه تنش مربوط به هر المان يعني σ_{11} ، σ_{23} ، σ_{23} ، τ_{12} ، τ_{23} و τ_{23} در گامهاي متعدد تا لحظه اتمام حل عددی از نرمافزار استخراج شده و ذخیره می شود. 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 تکجهته در بارگذاری استاتیکی مطرح می شود که به صورت روابط



Fig. 10 An example of meshing

شکل 10 نمونهای از مش بندی

¹ S8R ² C3D8R

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

:($\sigma_{11} < 0$) فشار الناف ($\sigma_{11} < 0$):

$$(e_1^c)^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)$$
(2)
$$:(\sigma_{22} + \sigma_{33} > \mathbf{0}) = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{V^2} + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{V^2}$$

$$P^{2} = \frac{12}{Y_{t}^{2}} + \frac{12}{S_{23}^{2}} + \frac{\sigma_{22}^{2} + \sigma_{33}^{2}}{S_{12}^{2}}$$
(3)

$$(e_{2}^{c})^{2} = \left[\left(\frac{Y_{c}}{2S_{23}}\right)^{2} - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_{c}}\right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^{2}}{4S_{23}^{2}} + \frac{(\sigma_{23}^{2} - \sigma_{22}\sigma_{33})}{s_{23}^{2}} + \frac{\sigma_{22}^{2} + \sigma_{33}^{2}}{s_{12}^{2}}$$
(4)
$$: \sigma_{33} > 0 - 5$$

$$(\boldsymbol{e}_3^t)^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2$$

$$(5)$$

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

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

در معادلات (1) تا (6)، X_t بیانگر استحکام کشش طولی در راستای الیاف، بیانگر استحکام فشاری در راستای الیاف و Y_t و Z_t نیز استحکامهای X_c کششی عرضی و Y_c و Z_c نیز بیانگر استحکامهای فشاری عرضی میباشند. مقادير $(e_1^c)^2_{a_1}$ $(e_2^c)^2_{a_2}$ $(e_2^c)^2_{a_2}$ $(e_2^c)^2_{a_2}$ $(e_1^c)^2_{a_2}$ $(e_1^c)^2_{a_2}$ خاصی ندارد و فقط با مقادیر سمت راست تساوی برابرند. 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 مدلسازی عددی بررسی شد و هر المان در گام مشخصی بر اساس معیار هشین شروع به تخریب شدن می کند و بسیاری از المانها نیز در هیچ یک از گامهای تحلیل عددی دچار تخریب نمی شود. به طور کلی تخریب از المانی شروع می شود که در گام زودتری از تحلیل عددی بر اساس معیار هشین شروع به تخريب كند.

7- نتايج

در این قسمت نتایج حاصل از تستهای تجربی و مدلسازی 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 می گردد:

بار بیشینه ویژه: نسبت بیشترین نیروی وارد شده به ورق به جرم ورق می-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 می آید و واحد آن N/mm.gr مىباشد.

با توجه به دو تعريف فوق، هر چه مقدار اين پارامترها بيش تر باشد؛ نشان-

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

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

1-7- ورق كامپوزیتی با تقویتكننده های مثلثی شكل

متداول ترین شکل شبکه تقویت کننده ها ساختار مثلثی یا ایزو گرید می باشد 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 نمونه های 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 می شود؛ نتایج تجربی و عددی با یکدیگر دارای اختلاف بسیار کمی می باشد 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 بعبارتی تا نقطه ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می-کند، 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

 Table 3 Average of experimental and numerical results of a triangular sample

| | بار بيشينه ويژه | سفتى ويژه |
|-------------------------|-----------------|-----------|
| | (N/gr) | (N/mm·gr) |
| تجربى | 4.07 | 0.206 |
| عددى | 3.48 | 0.170 |
| اختلاف بین تجربی و عددی | 14% | 17% |
| | | |



Fig. 11 Numerical and experimental results of a triangular sample شكل 11 نتايج عددى و تجربى نمونه مثلثى



Fig. 12 Triangular samples after experimental test شکل 12 نمونه مثلثی شکل پس از انجام تست تجربی

7-2- ورق كامپوزیتی با تقویت كننده های مربعی شكل

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 بعبارتی 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 کننده های لوزی شکل

ورقهای کامپوزیتی مشبک با تقویتکنندههای 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



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

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 بعبارتی تا نقطهای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل میکند، رسم شده است.

7-4- مقايسه اثر شكل تقويت كنندهها

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 می شود؛ ورق با تقویت کننده مربعی شکل، بیشترین استحکام و سفتی خمشی را دارا می باشد.

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 1.04 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 بار گذاری خمش سه نقطه، بخش اعظمی از بار توسط ریبهای افقی تحمل میباشد. 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 تقویتکننده 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

| ample | Ţ. | | |
|-------|----------|------------------|--|
| وص | سفتى مخص | بار بيشينه مخصوص | |
| (N | /mm·gr) | (N/gr) | |

| | (N/gr) | (N/mm·gr) |
|-------------------------|--------|-----------|
| تجربى | 0.586 | 0.21 |
| عددى | 0.522 | 0.18 |
| اختلاف بین تجربی و عددی | 10% | 14% |



Fig. 15 Numerical and experimental results of a rhombic sample

شکل 15 نتایج عددی و تجربی نمونه لوزی

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 نسبتا مناسبی می-باشد 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.









شکل 17 مقایسه تجربی و عددی سفتی ویژه نمونه ها

Shap of ribs

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 andunstiffened 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.

8- نتیجه گیری

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی بدلیل ویژگیهای خاص این مواد، ایده-هایی بمنظور تقویت و بهبود کارایی آنها ارائه شد. ایدههایی که سبب ساخت سازههای کامپوزیتی مشبک شد. خواص مکانیکی ایدهآل، سفتی ویژه و استحكام بالا و مقاومت در برابر ضربه و خستكى اين نوع سازه را منحصربفرد كرده است. در این تحقیق رفتار خمشی ورق های مشبک بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور سه نوع ورق مشبک با تقویت کنندههای 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 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. 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 تقویت کننده، دو پارامتر بار بیشینه ویژه که نشان دهنده استحکام ورق می باشد 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 فیسکچر 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 می باشد.

4- ترتیب قرار گرفتن شکل تقویت کننده ااز لحاط ماکزیمم استحکام به ترتیب نمونه مربعی، نمونه مثلثی و نمونه لوزی شکل می باشد و نمونه مربعی بیشترین استحکام را دارا می باشد.

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 می-باشد.

7- ترتیب قرار گرفتن شکل تقویت کننده ها 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- ماكزيمم اختلاف بين نتايج تجربي و عددي 17 درصد ميباشد.

9- مراجع

- 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

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.41.4