



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## بررسی تجربی و عددی اثر تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی مشبک

داود شاه‌قلیان قهفرخی<sup>۱</sup>، وحید طحانی<sup>۲</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>۳\*</sup>

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

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

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

تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۱۵، rahimi\_gh@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۲/۲۶

پذیرش: ۹۵/۳/۲۵

### کلیدواژگان:

خمش سه نقطه‌ای

ورق کامپوزیتی مشبک

تقویت‌کننده‌های طولی

تقویت‌کننده‌های عرضی

سازه‌های مشبک به علت خواص مکانیکی ایده‌آل، سفتی مخصوص و استحکام بالا؛ یکی از سازه‌های پرکاربرد در صنایع هوایی، موشکی و دریایی می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی اثر تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. برای این منظور چهار نوع ورق مشبک با تقویت‌کننده‌های مثلثی، لوزی، مربعی درشت و ریز در نظر گرفته شد. برای ساخت این ورق‌ها، قالب سیلیکونی طراحی و ساخته شد. 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. از حل عددی مسئله و مقایسه با نتایج تجربی مشاهده شد که اختلاف بسیار کمی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که تقویت‌کننده‌های طولی اثر بسیار زیادی بر بار بیشینه مخصوص ورق دارا می‌باشند، به طوری که با اضافه کردن یک تقویت‌کننده‌ی طولی، استحکام ورق ۵۹۴٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که تقویت‌کننده‌های عرضی به دلیل افزایش وزن، نه تنها باعث افزایش بار بیشینه مخصوص و سفتی مخصوص نمونه نمی‌شوند بلکه باعث کاهش ۷/۱۴٪ استحکام و ۲۶/۹٪ سفتی مخصوص می‌گردند. اولویت قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها از لحاظ بیشینه استحکام به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، نمونه مثلثی و نمونه لوزی شکل و از لحاظ حداکثر سفتی مخصوص به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، نمونه لوزی و نمونه مثلثی شکل می‌باشد.

## Experimental and numerical investigation of the effect of longitudinal and horizontal ribs on flexural behavior of grid stiffened composite plates

Davoud Shahgholian Ghahfarokhi, Vahid Tahani, Gholam Hossein Rahimi\*

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

\*P.O.B. 141115- 111, Tehran, Iran, rahimi\_gh@modares.ac.ir

### Keywords

Three-point bending

Grid composite plate

Longitudinal ribs

Horizontal ribs

### Abstract

Grid structures most widely used in the aerospace, missile and Marine industry because have made: ideal mechanical properties, special stiffness and high strength. In this research, experimental and numerical investigations of the effect of longitudinal and horizontal ribs have been on flexural behavior of grid composite plates. For this purpose, four types of grid plates were considered with triangle, rhombus, large square, small square ribs. For the building these plates, silicone mold was designed and built and also was used for making plates from hand lay-up and hand-wound layer technique. Samples were subjected to a three-point bending test that for this purpose, the fixture was designed and built. From the numerical solution of the problem and compared with experimental results was observed that there is very little difference between experimental and numerical results. Results show that longitudinal ribs had a tremendous effect on the specific maximum load So that by adding a horizontal rib increase in plate strength to 594%. However, the horizontal ribs not only increases specific maximum load and specific stiffness, but also reduces the 14.7% strength and 9.26% specific stiffness because of increased weight. Priority to the ribs in terms of maximum strength is a large square, small square, triangular and rhombus and in terms of maximum stiffness is a large square, small square, rhombus and triangular.

### ۱- مقدمه

کارآمدتر ادامه دارد. هدف اصلی این تلاش‌ها بهبود کیفیت، کارایی و دوام

ساختارهای تولید شده با این مواد جدید می‌باشد. یکی از این مواد جدید،

تلاش‌های بین‌المللی به‌طور مداوم برای جست‌جوی مواد جدید، بهتر و

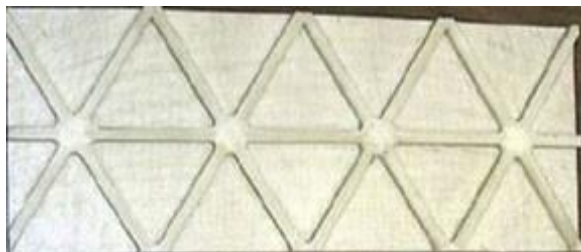
### Please cite this article using:

Shahgholian Ghahfarokhi, D. Tahani, V. and Rahimi, G. H., "Experimental and numerical investigation of the effect of longitudinal and horizontal ribs on flexural behavior of grid stiffened composite plates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 333-342, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

شد که در حالت بارگذاری در جهت پوسته، سازه بار بیش‌تری را نسبت به بارگذاری در راستای تقویت‌کننده تحمل می‌کند [۹].

ماریچلا [۱۰] در پایان نامه خود به بررسی رفتار خمشی سازه‌های کامپوزیتی مشبک تقویت شده پرداخت. جادهاو و همکاران نیز در دو تحقیق مجزا به بهینه‌سازی و بررسی جذب انرژی ورق مشبک کامپوزیتی تحت بار جانبی پرداختند.



شکل ۱ ورق کامپوزیتی مشبک [۲]

در تحقیق اول [۲] 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 به‌صورت تجربی تحت بار ضربه سرعت بالا تحلیل و نتایج با استفاده از مدلسازی عددی بهینه‌سازی شد. هدف از بهینه‌سازی بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص پنل‌های 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 [۱۱].

جادهاو و همکاران در تحقیق دوم [۱۲] مشخصات جذب انرژی پنل‌های کامپوزیتی ایزوگرید تحت بارگذاری جانبی شبه استاتیکی را بررسی کردند. آن‌ها تست و شبیه‌سازی‌های المان محدود را بر روی پنل‌های 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. لی و چنگ یک مدل تحلیلی بر اساس تئوری کلاسیک لایه‌ها، به‌منظور پیش‌بینی رفتار استاتیکی سازه مشبک، بدون استفاده از روش معادلسازی ارائه داد [۱۳]. هو و گرامول به بررسی مودهای تخریب پوسته‌های مشبک کامپوزیتی مخروطی و استوانه‌ای پرداختند و بیان داشتند که کمانش عمومی پوسته و تنش برشی دو مود بحرانی سازه می‌باشند [۱۴]. ژانگ و همکاران بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، یک المان صفحه‌ای تقویت شده مثلثی شکل به‌منظور تحلیل سازه‌های مشبک ارائه شد [۱۵]. ژانگ و همکاران [۱۶] 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

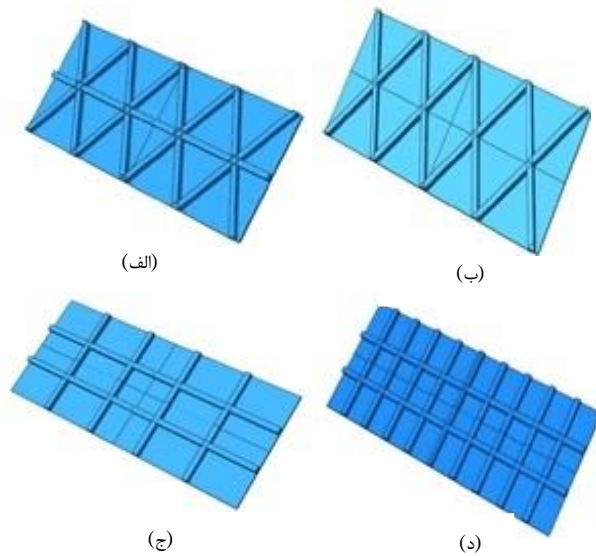
کامپوزیت‌ها هستند که به علت خواص منحصربه‌فرد خود، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. خواص مکانیکی ایده‌آل، نظیر استحکام بالا و وزن کم، این مواد را برای کاربردهای فضایی ایده‌آل کرده است. با افزایش استفاده از این نوع مواد، ایده‌هایی به منظور تقویت کامپوزیت‌ها و بهبود کارایی آن‌ها به ذهن طراحان و مهندسان رسید، ایده‌هایی که منجر به ساخت سازه‌های گوناگون با زمینه کامپوزیتی از قبیل پنل‌های ساندویچی<sup>۱</sup> و سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک<sup>۲</sup> 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 مخصوص و استحکام بالا در برابر ضربه اشاره کرد [۱]. بدلیل ویژگی‌های اشاره شده، امروزه این سازه‌ها به‌طور وسیعی در صنایع هواپیماسازی، موشکی، دریایی و فضایی استفاده می‌شود [۲]. سازه‌های مشبک، مجموعه‌ای از تقویت‌کننده‌ها 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، فضایماها و همچنین صنایع کشتی‌سازی اشاره نمود. به دلیل همین کاربردهای بسیار زیاد، این سازه‌ها به‌طور گسترده، مورد توجه محققین و صنعتگران در دهه اخیر قرار گرفته‌اند [۲]. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک ورق کامپوزیتی مشبک نشان داده شده است.

تحقیقات گوناگونی بر تحلیل‌های مختلف ورق‌های کامپوزیتی مشبک انجام شده است. هوسومورا و همکاران [۳] به بررسی واماندگی ورق مشبک با شکل شبکه مثلثی پرداخت. آن‌ها دریافتند 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 گیسیون [۴] اثر پارامترهای مختلفی نظیر مواد سازنده و ارتفاع تقویت‌کننده-ها، بر روی آنالیز مودال پنل‌های کامپوزیتی مشبک، با استفاده از روش المان محدود 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 [۵، ۶] به بررسی کمانش سازه مشبک پرداخت و نیروی کمانش بحرانی عمومی استوانه‌های تقویت شده مشبک را تعیین نمود. ایشان با ارائه مدلی تحلیلی، مطالعه پارامتری عوامل مؤثر بر کمانش پوسته تقویت را انجام داد. قنگشنگ [۷] 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 گیسیون و همکاران [۸] نتایج یک بررسی تجربی-تحلیلی بر روی مشخصات جذب انرژی و تخریب پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک تحت بار شبه استاتیکی خمشی سه نقطه‌ای 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 را می‌دهد. همچنین مشاهده

1. Sandwich Panels  
2. Grid stiffened composite structures

را دارند و باعث افزایش بار بیشینه مخصوص و سفتی مخصوص ورق به خصوص در بارگذاری خمشی می‌شود.



شکل ۲ ورق‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده در این تحقیق: (الف) تقویت‌کننده مثلثی، (ب) تقویت‌کننده لوزی، (ج) تقویت‌کننده مربعی درشت، (د) تقویت‌کننده مربعی ریز

به منظور بررسی اثر تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک، ورق‌هایی با چهار نوع تقویت‌کننده‌ی مختلف ساخته شد و تحت آزمون خمش سه نقطه ای قرار گرفت. ابعاد ورق کامپوزیتی بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۷۲۶۴، ۳۰۰×۱۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۲، هندسه چهار نوع ورق در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.

### ۳- ساخت نمونه‌ها

روش‌های گوناگونی به منظور ساخت کامپوزیت‌های مشبک وجود دارد، که می‌توان به روش‌های شکل دهی آزاد، رشته پیچی درون یک هسته فومی سبک وزن، رشته پیچی درون شیارهای پلاستیکی و رشته پیچی درون شیارهای فلزی اشاره کرد. روش شکل دهی 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 بلافاصله 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 ۳، نمونه‌ای از قالب

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 کمانشی سازه را کاهش می‌دهد، اما تأثیر کمی بر توانایی انتقال بار درون صفحه‌ای دارد. رحیمی و همکاران در تحقیقاتی جداگانه‌ای به تحلیل ارتعاشی، کمانشی و خستگی سازه‌های مشبک نیز پرداخته‌اند [۱۷-۲۰]. آن‌ها [۲۱، ۲۲] اثر سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها بر مقاومت کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی مشبک تقویت شده تحت بار محوری را بررسی کردند. رحیمی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود افزایش ۱۰ تا ۳۶ درصدی در بار کمانش و هم‌چنین افزایش ۴۲ تا ۵۲ درصدی در بار مخصوص نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده را مشاهده کردند. خسروی و اسلامی [۲۳] به بررسی اثر افزودن نانو سیلیکای اصلاح شده سطحی بر رفتار خمشی و جذب انرژی ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده ایزوگرید پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که افزودن نانو سیلیکا رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خسروی و اسلامی بیان داشتند که بیشترین میزان بهبود در مقادیر بار حداکثر خمشی و جذب انرژی ویژه پنل مشبک کامپوزیتی با افزودن ۳ درصد نانو سیلیکا به ترتیب با ۱۴ و ۲۵ درصد افزایش به دست می‌آید. آن‌ها در نهایت نتیجه‌گیری کردند که افزودن نانو ذرات سیلیکا می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی تحت خمش کمک شایانی کند. طهرانی [۲۴] به بررسی عددی رفتار خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده توسط الیاف ترد و انعطاف پذیر پرداخت. طهرانی بیان داشت زمانی که نمونه به نقطه تسلیم خود می‌رسد، لایه‌های بیرونی از مقدار بیشینه تنش طولی خود برای مقاومت در برابر خمش استفاده می‌کنند اما در همین لحظه لایه‌های میانی از ۳۰ درصد ظرفیت خود استفاده می‌کنند.

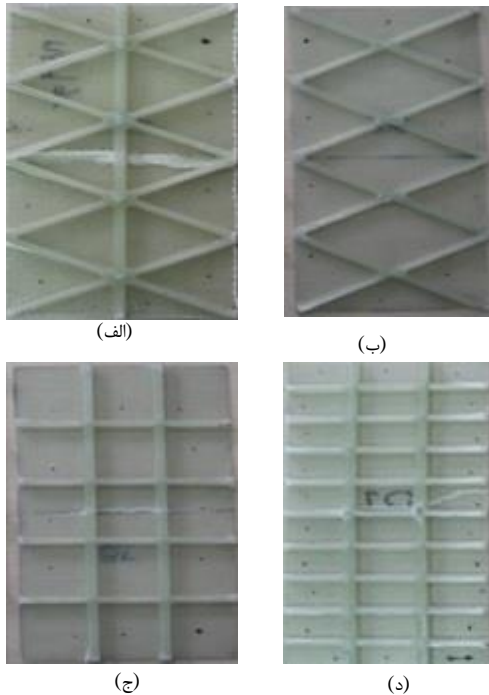
هدف اصلی این تحقیق بررسی تجربی و عددی اثر تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق‌های مشبک می‌باشد. برای این منظور چهار نوع ورق مشبک با تقویت‌کننده‌های مثلثی، لوزی، مربعی درشت و مربعی ریز در نظر گرفته خواهد شد. برای ساخت این ورق‌ها قالب سیلیکونی طراحی و ساخته خواهد شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش 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.

### ۲- مشخصات هندسی ورق‌های مشبک

سازه‌های کامپوزیتی مشبک، از یک پوسته نازک یکپارچه کامپوزیتی، متصل به یک سری از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی طولی و عرضی 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 [۲۵]. 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 روئینگ از جنس شیشه و از نوع ایی<sup>۱</sup> و به منظور ساخت پوسته از الیاف پارچه‌ای از جنس شیشه استفاده شده است. شبکه تقویت‌کننده‌ها نقش تقویت‌کننده پوسته کامپوزیتی

2. ASTM D7264

1. E



شکل ۵ ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق: (الف) تقویت‌کننده مثلثی، (ب) تقویت‌کننده لوزی، (ج) تقویت‌کننده مربعی درشت، (د) تقویت‌کننده مربعی ریز

#### ۴- آزمایش‌های 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 ۷۲۶۴ 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 ۶ این فیکسچر نشان داده شده است. در این فیکسچر بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۷۲۶۴، قطر تکیه‌گاه‌ها و سنبه بارگذاری ۶ میلی‌متر است. فاصله تکیه‌گاه‌ها از هم ۲۵۵ میلی‌متر می‌باشد همچنین سرعت سنبه بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه است، که شرایط بارگذاری شبه استاتیکی را فراهم می‌کند. آزمون خمش سه نقطه‌ای، توسط دستگاه تست فشار شرکت اینسترون<sup>۳</sup> موجود در آزمایشگاه ضربه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. در شکل ۷ نمونه‌ای از تست خمش انجام گرفته شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بارگذاری در راستای پوسته انجام شده است.

#### ۵- شبیه سازی اجزا محدود

به منظور بررسی صحت نتایج تجربی شبیه سازی اجزا محدود توسط نرم افزار آباکوس نسخه ۶/۱۴ انجام شده است که به مراحل آن در ادامه اشاره می‌شود.

##### ۵-۱- مدل سازی

مدل سازی اجزا محدود به این صورت انجام پذیرفته است که در ابتدا هندسه ورق کامپوزیتی در نرم‌افزار ایجاد شد. سپس تقویت‌کننده‌ها ساخته شده و با توجه به شکل شبکه تقویت‌کننده‌ها، بر روی پوسته خارجی ایجاد گردیدند. ابعاد ورق مشبک ۱۲۵×۳۰۰ میلی‌متر است و سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها ۶×۶ میلی‌متر است. طول آن با توجه به شکل شبکه متغیر است.

سیلیکونی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است. روش ساخت به این صورت است که در ابتدا رزین و هاردنر به نسبت جرمی ۲ به ۱ به منظور ساخت فاز زمینه کامپوزیت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. رزین استفاده شده سی‌وای<sup>۱</sup> ۲۱۹ و هاردنر استفاده شده اچ‌وای<sup>۲</sup> ۵۱۶۱ می‌باشد.



شکل ۳ قالب سیلیکونی

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 میخ‌هایی که رو قالب چوبی نصب شده است، پیچانده می‌شود تا کشش در ریب حفظ شود. این قالب در شکل ۴ نشان داده شده است. قالب سیلیکونی در مرکز قالب چوبی قرار داده می‌شود و محل اتصال میخ‌ها روی قالب چوبی برای هر شکل شبکه تقویت‌کننده‌ای 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.

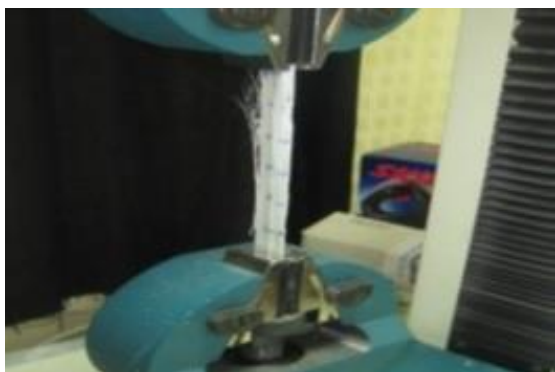
بدین منظور، ابتدا یک لایه از پارچه بر روی ریب‌ها قرار داده می‌شود و به ترکیب رزین و هاردنر آغشته می‌شود. سپس لایه‌های بعدی به همین صورت بر روی لایه اول قرار داده شده و هر لایه به ترکیب رزین و هاردنر کاملاً آغشته می‌شود. لازم به توضیح است که پارچه‌ها بصورت بافته شده ۰ و ۹۰ درجه می‌باشند و همگی نمونه‌های ساخته شده شامل ۶ لایه می‌باشد. پس از ساخت، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط قرار داده می‌شود تا کاملاً خشک شوند. در شکل ۵ ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.



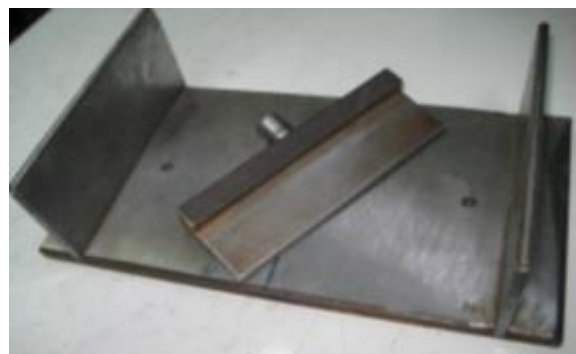
شکل ۴ قالب مخصوص ساخت نمونه‌ها

1. CY219  
2. HY5161

3. Instiron

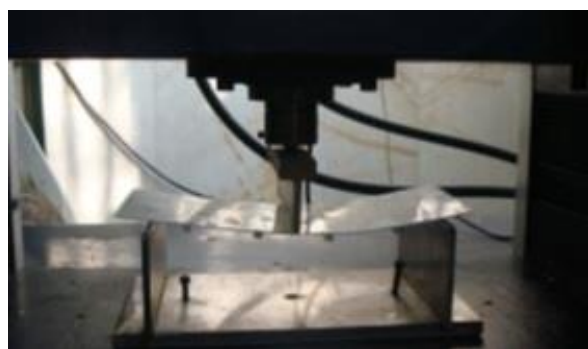


شکل ۹ تست کشش



شکل ۶ فیکسچر خمش سه نقطه‌ای

ابعاد نمونه‌های تست کشش تقویت‌کننده و پوسته مطابق با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام-دی ۳۰۳۹ ام-۰۰، ۱۰۰×۲۵ میلی‌متر می‌باشد. فک پایینی دستگاه ثابت است و فک بالایی با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت بالا حرکت داده می‌شود، تا نمونه گسیخته شود. مدول الاستیسیته تقویت‌کننده‌ها و پوسته در راستای الیاف ( $E_1$ ) و همچنین استحکام کششی در راستای الیاف تقویت‌کننده‌ها و پوسته ( $X_t$ ) با استفاده از تست کشش بدست آمد و بقیه ثوابت مهندسی از مقالات با مواد مشابه [۲۶،۲] بدست آمد که در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۷ تست خمش سه نقطه‌ای

جدول ۱ خواص مکانیکی تقویت‌کننده [۲۶،۲]

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
۵۰۱ MPa	$X_t$	۲/۴ GPa	$E_1$
۶۰/۴۸ MPa	$X_c$	۵/۵ GPa	$E_2$
۵۳/۱۸۶ MPa	$Y_t$	۵/۵ GPa	$E_3$
۷۶/۲۴ MPa	$Y_c$	۱/۹ GPa	$G_{12}$
۵۳/۱۸۶ MPa	$Z_t$	۱/۹ GPa	$G_{13}$
۷۶/۲۴ MPa	$Z_c$	۲/۵ GPa	$G_{23}$
۸۰ MPa	$S_{32}$	۰/۲۷۵	$\nu_{12}$
-	$S_{13}$	۰/۲۷۵	$\nu_{13}$
۸۰ MPa	$S_{12}$	۰/۰۷۹۸	$\nu_{23}$

\* به‌دست آمده از آزمایش انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

جدول ۲ خواص مکانیکی پوسته [۲۶،۲]

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
۲۸۷ MPa	$X_t$	۱۳/۷ GPa	$E_1$
۱۴۴/۵ MPa	$X_c$	۱۳/۷ GPa	$E_2$
۲۸۷ MPa	$Y_t$	۶ GPa	$E_3$
۱۴۴/۵ MPa	$Y_c$	۱/۴۹ GPa	$G_{12}$
۲۰ MPa	$Z_t$	۱/۴۹ GPa	$G_{13}$
۱۲۵ MPa	$Z_c$	۱/۸۶ GPa	$G_{23}$
۱۸/۸۳ MPa	$S_{32}$	۰/۳	$\nu_{12}$
-	$S_{13}$	۰/۳	$\nu_{13}$
۱۸/۸۳ MPa	$S_{12}$	۰/۲۱	$\nu_{23}$

\* به‌دست آمده از آزمایش انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

### ۳-۵- 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 شده است.

### ۲-۵- خواص مواد

به منظور مدل کردن نمونه‌ها در نرم افزار المان محدود آباکوس، نیاز به ثوابت مهندسی تقویت‌کننده‌ها و پوسته می‌باشد. آزمون کشش پوسته کامپوزیتی و تقویت‌کننده‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش موجود در آزمایشگاه مواد پیشرفته دانشگاه خواجه نصیر و بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام -دی ۳۰۳۹ ام-۰۰ انجام شده است. مدول الاستیسیته تقویت‌کننده‌ها، 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 ۵ نمونه از پوسته و ۵ نمونه از ریب مطابق شکل ۸ آماده شده‌است. در شکل ۸ نمونه‌های مربوط به تست کشش نشان داده شده‌است. در شکل ۹ تست کشش انجام شده بر روی نمونه نشان داده شده است.



شکل ۸ نمونه‌های تست کشش

1. ASTM-D3039M-00

فرایند تخریب سازه از المانی 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 مدلسازی عددی انجام گرفته در نرم‌افزار آباکوس ۶ مؤلفه تنش مربوط به هر المان یعنی  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$  و  $\tau_{23}$  در گام‌های متعدد تا لحظه اتمام حل عددی از نرم‌افزار 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 جهت در بارگذاری استاتیکی مطرح می‌شود که به صورت روابط (۱) تا (۴) می‌باشد [۲۷].

۱ - کشش الیاف ( $\sigma_{11} > 0$ ):

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

۲ - فشار الیاف ( $\sigma_{11} < 0$ ):

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

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

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

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

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

در معادلات (۱) تا (۴)،  $X_t$  بیانگر استحکام کشش طولی در راستای الیاف،  $X_c$  بیانگر استحکام فشاری در راستای الیاف  $Y_t$  و نیز استحکام‌های کششی عرضی و  $Y_c$  نیز بیانگر استحکام‌های فشاری عرضی می‌باشند. مقادیر  $(e_1^t)^2$ ،  $(e_1^c)^2$ ،  $(e_2^t)^2$ ،  $(e_2^c)^2$  در روابط مفهوم خاصی ندارد و فقط با مقادیر سمت راست تساوی برابری دارند. نحوه تحلیل به این صورت است اگر حداقل یکی از روابط (۱) تا (۴) 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 می‌کند و بسیاری از المان‌ها نیز در هیچ یک از گام‌های تحلیل عددی دچار تخریب نمی‌شود. به‌طور کلی تخریب از المانی شروع می‌شود که در گام زودتری از تحلیل عددی بر اساس معیار هشین شروع به تخریب کند.

#### ۷- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از تست‌های تجربی و مدلسازی عددی اثر تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق‌های کامپوزیتی ارائه خواهد

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.

#### ۴-۵- 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 (۲ میلی‌متر بر دقیقه) و هم‌چنین شبه استاتیکی بودن مسأله، در مرحله تعیین نوع تحلیل، تحلیل بصورت استاتیکی انتخاب شد و در ادامه به‌منظور اتصال بین و تقویت‌کننده‌ها از اتصال چسبناک<sup>۱</sup> استفاده شد.

#### ۵-۵- المان بندی

برای پوسته از المان غیرخطی ۸ گره اس ۸ آر<sup>۲</sup> و برای تقویت‌کننده‌ها از المان ۲۰ گره غیرخطی سی ۳ دی ۸ آر<sup>۳</sup> استفاده شده است. اندازه مناسب مش برای المان‌های پوسته و تقویت‌کننده با چندین بار المان‌بندی سازه و همگرایی نتایج آن‌ها بدست آمده‌است. 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 ۱۰ نشان داده شده‌است.

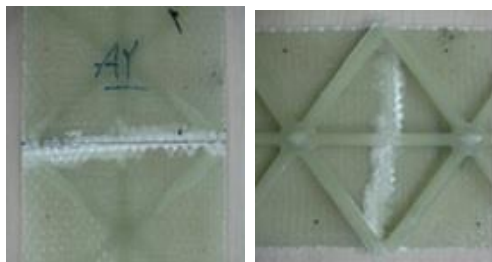


شکل ۱۰ نمونه‌ای از مش بندی انجام شده

#### ۶- تحلیل شروع تخریب

در این تحقیق پاسخ ماده سالم الاستیک خطی فرض شده‌است و مدل به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که رفتار مواد تقویت شده با الیاف را پیش‌بینی کند؛ بدون آن که تغییرشکل قابل ملاحظه‌ای 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 می‌شود. تعداد المان‌ها 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 هر المان 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 ورودی‌های آن تنش‌ها در هر المان است، استفاده شده است. بر اساس این تحلیل،

1. Cohesive  
2. S8R  
3. C3D8R



شکل ۱۲ نمونه مثلثی شکل پس از انجام تست تجربی

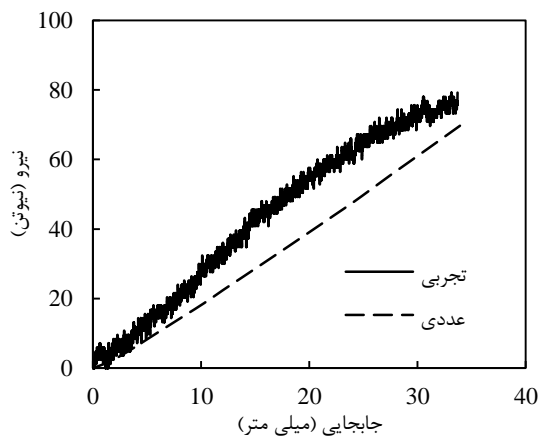
همچنین در شکل ۱۳ نیز نمودار نیرو-جابجایی، تجربی و عددی یکی از نمونه‌ها آزمایش شده، قابل مشاهده است. این نمونه ۱۳۶ گرمی در آزمایش تجربی، ۸۰ نیوتن نیرو تحمل کرده است. در قسمت بار بیشینه مخصوص، ۱۰ درصد و در قسمت سفتی مخصوص، ۱۴ درصد اختلاف بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل ۱۳ نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است.

### ۷-۳- ورق کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مربعی درشت

یکی از الگوهای جدید ساختارهای مشبک، الگوی مربعی یا ارتوگرید می‌باشد. در قسمت تجربی برای این نوع تقویت‌کننده نیز سه مرتبه آزمایش تکرار شد تا نتایج بدست آمده دارای اعتبار کافی باشند. در جدول ۵ میانگین نتایج تجربی و عددی این سه نمونه آورده شده است. همچنین در شکل ۱۴ نیز نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی یکی از نمونه‌ها تست شده، قابل مشاهده است. این نمونه ۱۴۱ گرمی ۹۷۲ نیوتن نیرو تحمل کرده است. در قسمت بار بیشینه مخصوص ۶ درصد و در قسمت سفتی مخصوص ۱۴ درصد اختلاف بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل ۱۴ نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است. در شکل ۱۵ نمونه مربعی شکل پس از انجام تست تجربی نشان داده شده است.

جدول ۴ میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه لوزی شکل

سفتی مخصوص (N/mm.gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
۰/۲۱	۰/۵۸۶	تجربی
۰/۱۸	۰/۵۲۲	عددی
٪۱۴	٪۱۰	اختلاف بین تجربی و عددی



شکل ۱۳ نتایج عددی و تجربی نمونه لوزی

شد، که به منظور مقایسه بهتر نتایج، دو پارامتر بار بیشینه مخصوص و سفتی مخصوص بصورت زیر تعریف می‌شود:

**بار بیشینه مخصوص:** نسبت بیشترین نیروی وارد شده به ورق به جرم ورق می‌باشد که واحد آن N/gr می‌باشد.

**سفتی مخصوص:** 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؛ نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که ورق دارای رفتار خمشی بهتری است.

### ۷-۱- ورق کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مثلثی شکل

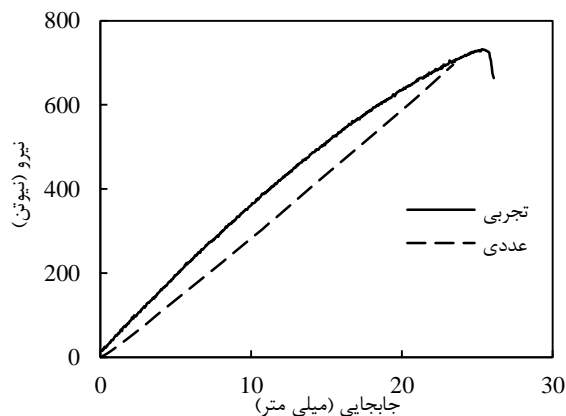
متداولترین شکل شبکه تقویت‌کننده‌ها ساختار مثلثی یا ایزوگرید می‌باشد. که سه نمونه از آن ساخته و آزمایش تجربی گرفته شد. در جدول ۳ میانگین نتایج تجربی و عددی این سه نمونه آورده شده است. همچنین در شکل ۱۱ نیز نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی یکی از نمونه‌های تست شده، قابل مشاهده است. این نمونه ۱۶۳ گرمی در تست تجربی ۷۳۲ نیوتن نیرو بار تحمل کرده است. همانگونه که در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود؛ نتایج تجربی و عددی با یکدیگر دارای اختلاف بسیار کمی می‌باشد بطوریکه در قسمت بار بیشینه مخصوص ۱۴ درصد و در قسمت سفتی مخصوص ۱۷ درصد اختلاف وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل ۱۱ نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است. در شکل ۱۲ نمونه مثلثی شکل پس از انجام تست تجربی نشان داده شده است.

### ۷-۲- ورق کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های لوزی شکل

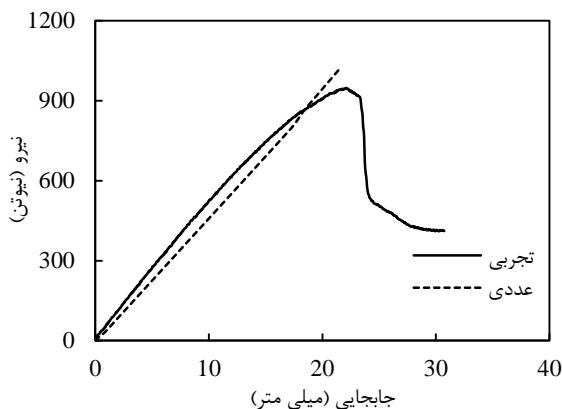
ورق‌های کامپوزیتی مشبک با تقویت‌کننده‌های لوزی شکل یکی از پرکاربردترین این نوع ورق‌ها می‌باشد. در جدول ۴ میانگین نتایج تجربی و عددی سه نمونه مورد آزمایش آورده شده است.

جدول ۳ میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه مثلثی

سفتی مخصوص (N/mm.gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
۰/۲۰۶	۴/۰۷	تجربی
۰/۱۷۰	۳/۴۸	عددی
٪۱۷	٪۱۴	اختلاف بین تجربی و عددی



شکل ۱۱ نتایج عددی و تجربی نمونه مثلثی



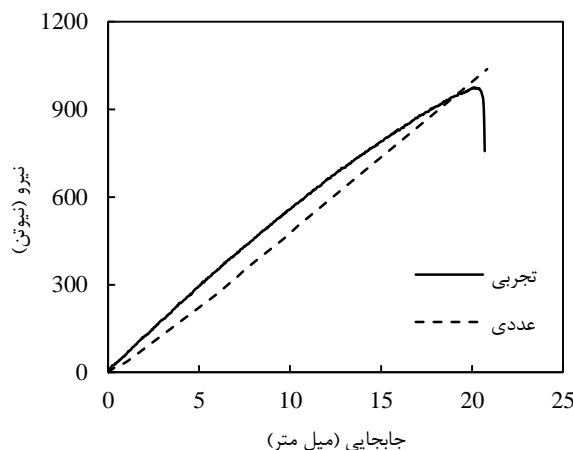
شکل ۱۶ نتایج عددی و تجربی نمونه مربعی ریز



شکل ۱۷ نمونه مربعی ریز پس از انجام تست تجربی

جدول ۵ میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه مربعی درشت

سفتی مخصوص (N/mm.gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
۰/۳۹۶	۶/۴۵	تجربی
۰/۳۳۸	۶/۰۸	عددی
٪۱۴	٪۶	اختلاف بین تجربی و عددی



شکل ۱۴ نتایج عددی و تجربی نمونه مربعی درشت



شکل ۱۵ نمونه مربعی درشت پس از انجام تست تجربی

۷-۵- مقایسه اثر تقویت‌کننده‌های طولی

یکی از عوامل مؤثر بر افزایش بار بیشینه و سفتی مخصوص ورق‌های کامپوزیتی مشبک تحت بار خمشی، وجود تقویت‌کننده‌ها طولی می‌باشد. برای بررسی این عامل دو نمونه مثلثی و لوزی شکل بررسی و مقایسه شدند. همانگونه که در شکل ۵ دیده شد، تفاوت این دو نمونه در وجود یک تقویت‌کننده طولی در سازه مثلثی می‌باشد. با توجه به جدول ۳ و ۴، نتایج به دست آمده از تست تجربی و مدلسازی عددی نشان می‌دهد که اختلاف بسیار زیادی در بار بیشینه مخصوص تقویت‌کننده‌های مثلثی با تقویت‌کننده‌های لوزی شکل وجود دارد که این مطلب تأثیر تقویت‌کننده‌ی طولی در تحمل بار خمشی را نشان می‌دهد. از جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که افزودن یک تقویت‌کننده‌ی طولی به نمونه لوزی شکل باعث افزایش ۵۹۴٪ در بار بیشینه مخصوص می‌شود. این مطلب بیانگر آن است که عدم وجود تقویت‌کننده‌ی طولی در ورق مشبک، بار بیشینه کاهش می‌دهد و عملاً سازه، بسیار مشابه نمونه تقویت نشده عمل می‌کند که فقط وجود تقویت‌کننده‌های مایل اندکی بار بیشینه و سفتی مخصوص را افزایش می‌دهد. شایان ذکر است که سفتی مخصوص نمونه مثلثی با لوزی شکل اختلاف ناچیزی دارد و نشان‌دهنده‌ی این مطلب می‌باشد که تقویت‌کننده‌ی طولی تأثیر چندانی بر سفتی مخصوص ندارد و فقط اثر مهم آن بر باربیشینه مخصوص می‌باشد.

۷-۶- مقایسه اثر تقویت‌کننده‌های عرضی

برای بررسی اثر تقویت‌کننده‌های عرضی بر بار بیشینه و سفتی مخصوص، دو الگوی مربعی درشت و ریز مورد بررسی قرار گرفته شد. همانگونه که در شکل ۵ دیده شد، هردو نمونه دارای دو تقویت‌کننده‌ی طولی می‌باشند ولی نمونه مربعی درشت دارای ۴ تقویت‌کننده‌ی عرضی و نمونه مربعی ریز دارای ۹ تقویت‌کننده عرضی می‌باشند. با توجه به جدول ۵ و ۶ دیده می‌شود که افزودن تقویت‌کننده‌های عرضی نه تنها باعث افزایش باربیشینه و سفتی مخصوص نمونه نمی‌شود بلکه در آزمایش انجام شده در این تحقیق باعث

۷-۴- ورق کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های مربعی ریز

با افزایش تعداد تقویت‌کننده‌های عرضی می‌توان الگوی تقویت‌کننده‌های مربعی ریز را بوجود آورد. در جدول ۶ میانگین نتایج تجربی و عددی، سه نمونه تست گرفته شده آورده شده است. همچنین در شکل ۱۶ نیز نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی یکبار یکبار نمونه‌های تست شده، قابل مشاهده می‌باشد. این نمونه ۱۷۳ گرمی ۱۰۵۰ نیوتن نیرو تحمل کرده است. در قسمت بار بیشینه مخصوص ۴ درصد و در قسمت سفتی مخصوص ۹ درصد اختلاف بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. لازم به ذکر است که در شکل ۱۶ نمودار عددی تا نقطه شروع تخریب یا عبارتی تا نقطه‌ای که ورق کامپوزیتی بیشترین بار را تحمل می‌کند، رسم شده است. در شکل ۱۷ نمونه مربعی شکل پس از انجام تست تجربی نشان داده شده است.

جدول ۶ میانگین نتایج تجربی و عددی نمونه مربعی ریز

سفتی مخصوص (N/mm.gr)	بار بیشینه مخصوص (N/gr)	
۰/۳۱۲	۶/۰۲	تجربی
۰/۲۸۵	۵/۷۸	عددی
٪۹	٪۴	اختلاف بین تجربی و عددی



سه نمونه دیگر ندارد، چرا که بار بیشینه مخصوص تحمل شده توسط آن فقط ۰/۰۹ بار بیشینه مخصوص نمونه با تقویت کننده مربعی درشت می‌باشد. بنابراین اولویت بندی این چهار تقویت کننده از لحاظ استحکام به ترتیب مربعی درشت، مربعی ریز، مثلثی و لوزی شکل می‌باشد.

در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که سفتی مخصوص نمونه مربعی درشت نسبت به سه نمونه دیگر بیشتر می‌باشد. این بدین معنی می‌باشد که در یک جابجایی یا خیز ثابت، ورق با تقویت کننده مربعی درشت نیروی بیشتری را تحمل می‌کند. البته عکس این موضوع را نیز می‌توان اشاره کرد که در یک نیروی ثابت، نمونه مربعی درشت دارای خیز کمتری می‌باشد که این دو مطلب دارای کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارا می‌باشند. سفتی مخصوص نمونه مربعی درشت از لحاظ تجربی ۱/۹۲ و از لحاظ عددی ۱/۹۸ برابر سفتی مخصوص نمونه مثلثی می‌باشد. نکته قابل توجهی که از این نمودار دریافت می‌شود این است که برخلاف بار بیشینه مخصوص کم نمونه لوزی شکل، این نمونه دارای سفتی مخصوص نسبتاً مناسبی می‌باشد چرا که سفتی مخصوص این نمونه ۰/۵۳ نمونه مربعی درشت می‌باشد. بنابراین اولویت بندی این چهار تقویت کننده از لحاظ سفتی مخصوص به ترتیب مربعی درشت، مربعی ریز، لوزی و مثلثی شکل می‌باشد.

#### ۸- نتیجه‌گیری

با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی به دلیل 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 مخصوص و استحکام بالا و مقاومت در برابر ضربه و خستگی این نوع سازه را منحصربفرد کرده است. در این تحقیق رفتار خمشی ورق‌های مشبک بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی اثر تقویت کننده‌های طولی و عرضی چهار نمونه ورق مشبک با تقویت کننده‌های مثلثی، لوزی، مربعی درشت و ریز 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 تقویت کننده‌های طولی و عرضی چهار نوع الگو، دو پارامتر بار بیشینه مخصوص که نشان‌دهنده استحکام ورق می‌باشد و همچنین پارامتر سفتی مخصوص که در واقع نشان‌دهنده شیب نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد، تعریف شد. بطور کلی نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

۱- تقویت کننده‌های طولی اثر بسیار زیادی در استحکام خمشی ورق مشبک دارد؛ بطوریکه در ورق مشبک با تقویت کننده‌های لوزی شکل با افزودن یک تقویت کننده‌ی طولی و ایجاد ساختار مثلثی، استحکام آن ۵۹۴٪ افزوده می‌شود.

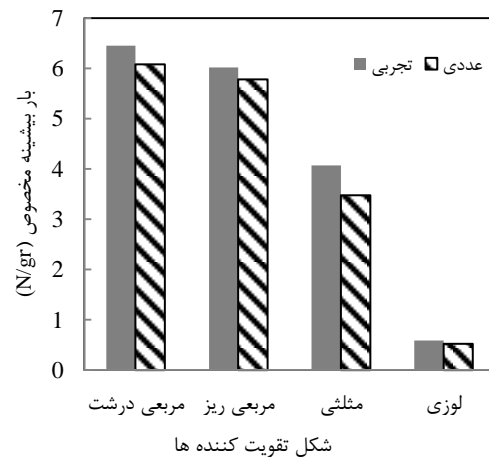
۲- تقویت کننده‌های طولی اثر بسیار ناچیزی در سفتی مخصوص ورق مشبک دارا می‌باشد.

۳- تقویت کننده‌های عرضی نه تنها باعث افزایش بار بیشینه و سفتی مخصوص نمونه نمی‌شود بلکه در آزمایش انجام شده در این تحقیق باعث کاهش ۷/۱۴٪ استحکام و ۲۶/۹٪ سفتی مخصوص می‌گردد که علت آن افزایش وزن ورق در اثر اضافه کردن تقویت کننده‌های عرضی می‌باشد.

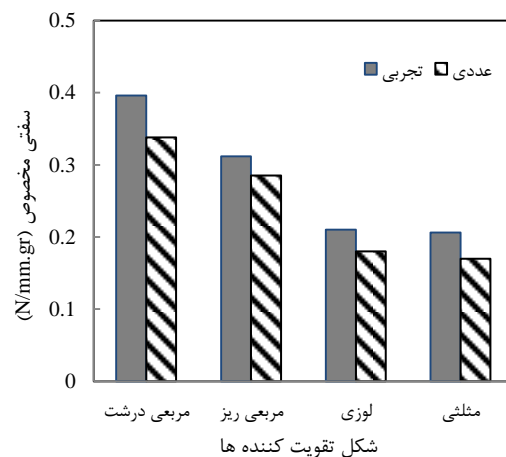
کاهش بار بیشینه و سفتی مخصوص می‌گردد که علت آن افزایش وزن ورق در اثر اضافه کردن تقویت کننده‌های عرضی می‌باشد. با توجه به جدول ۵ و ۶، افزایش تقویت کننده‌های عرضی باعث کاهش ۷/۱۴٪ بار بیشینه مخصوص و ۲۶/۹٪ سفتی مخصوص می‌شود.

#### ۷-۷- مقایسه تجربی و عددی بار بیشینه و سفتی مخصوص نمونه‌های مختلف

به منظور مقایسه بهتر و اولویت بندی تقویت کننده‌ها از نظر بار بیشینه و سفتی مخصوص، در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمودار تقویت کننده‌های مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود؛ ورق با تقویت کننده مربعی درشت، بیشترین و ورق با تقویت کننده‌ی لوزی شکل کمترین استحکام و سفتی خمشی را دارا می‌باشند. این بدین دلیل است که تقویت کننده مربعی دارای دو تقویت کننده‌ی طولی می‌باشد در حالی که سازه لوزی شکل بدون تقویت کننده‌ی طولی می‌باشد.



شکل ۱۸ مقایسه تجربی و عددی بار بیشینه مخصوص نمونه‌های مختلف



شکل ۱۹ مقایسه تجربی و عددی سفتی مخصوص نمونه‌های مختلف

بار بیشینه مخصوص تحمل شده توسط ورق با تقویت کننده مربعی درشت از لحاظ تجربی ۱/۵۸ برابر و از لحاظ عددی ۱/۷۵ برابر بار بیشینه تحمل شده توسط نمونه مثلثی می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود، ورق با تقویت کننده لوزی شکل بار بیشینه مخصوص تحمل شده مناسبی نسبت به

- of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011 .
- [19] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G. and Ansari, R., "On The Free Vibrations Of Grid-Stiffened Composite Cylindrical Shells ", *Acta Mechanica*, Vol. 225, No. 2, pp. 609-623, 2014 .
- [20] Hemmatnezhad, M. Rahimi, G. Tajik, M. and Pellicano, F. " Experimental, Numerical And Analytical Investigation Of Free Vibrational Behavior Of GFRP-Stiffened Composite Cylindrical Shells ", *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 509-518, 2015 .
- [21] Yazdani, M. and Rahimi, G., "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 .
- [22] Rahimi, G. Zandi, M. and Rasouli, S., "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 .
- [23] Khosravi, H. and Eslami Farsani, R., "An Experimental Investigation Into The Effect Of Surface-Modified Silica Nanoparticles On The Mechanical Behavior Of E-Glass/Epoxy Grid Composite Panels Under Transverse Loading ", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016 .
- [24] Tehrani Dehkordi, M., "Numerical Modeling Of Bending Behavior Of Intra-Ply Hybrid Composites Using Finite Element Method ", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 59-66, 2016 .
- [25] Higgins, P. J. Wegner, P. Viisoreanu, A. and Sanford, G., "Design And Testing Of The Minotaur Advanced Grid-Stiffened Fairing ", *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1, pp. 339-349, 2004 .
- [26] Hedayatian, M. Liaghat, G. H. Rahimi, G. H. and Pol, M. H., "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, 201 .
- [27] Hashin, Z., "Failure Criteria For Unidirectional Fiber Composites ", *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, No. 2, pp. 329-334, 1980 .
- ۴- بار بیشینه مخصوص تحمل شده توسط ورق با تقویت کننده مربعی درشت به ترتیب ۱/۰۷ و ۱/۵۸، ۱۰/۸۶ بار بیشینه تحمل شده توسط نمونه مربعی ریز، مثلثی و لوزی می‌باشد.
- ۵- اولویت قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها از لحاظ ماکزیمم استحکام به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، نمونه مثلثی و نمونه لوزی شکل می‌باشد و نمونه مربعی بیشترین استحکام را دارا می‌باشد.
- ۶- سفتی مخصوص نمونه مربعی درشت به ترتیب ۱/۲۷، ۱/۸۸، ۱/۹۲ برابر سفتی مخصوص نمونه مربعی ریز، لوزی و مثلثی می‌باشد.
- ۷- اولویت قرار گرفتن تقویت‌کننده‌ها از لحاظ ماکزیمم سفتی مخصوص به ترتیب نمونه مربعی درشت، مربعی ریز، نمونه لوزی و نمونه مثلثی شکل می‌باشد و نمونه مربعی بیشترین سفتی مخصوص را دارا می‌باشد.
- ۸- ماکزیمم اختلاف بین نتایج تجربی و عددی ۱۷ درصد می‌باشد.

## ۹- مراجع

- [1] Yang, L. Yan, Y. and Kuang, N., "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] Jadhav, P. and Mantena, P. R., "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] Hosomura, T. Kawashima, T. and Mori, D., "New CFRP Structural Elements (For Spacecraft) ", *Composite materials: Mechanics, mechanical properties and fabrication*, pp. 447-452, 1981 .
- [4] Gibson, R. F. Chen, Y. and Zhao, H., "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] Kidane, S., "Buckling Analysis Of Grid Stiffened Composite Structures," Thesis, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering in The Department of Mechanical Engineering By Samuel Kidane B. Sc., Addis Ababa University, 2002 .
- [6] Kidane, S. Li, G. Helms, J. Pang, S. S. and Woldesenbet, E., "Buckling Load Analysis Of Grid Stiffened Composite Cylinders ", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 2003 .
- [7] Gan, C., "Behavior of grid-stiffened composite structures under transverse loading", PhD Thesis, Wayne State University, USA, 2003.
- [8] Gan, C. Gibson, R. F. and Newaz, G. M., "Analytical/Experimental Investigation Of Energy Absorption In Grid-Stiffened Composite Structures Under Transverse Loading ", *Experimental mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004 .
- [9] Chen, Y. and Gibson, R. F., "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 .
- [10] Maricherla, D., "Advanced Grid Stiffened Composite Structures," Thesis, Louisiana State University, 2005 .
- [11] Fan, H. Meng, F. and Yang, W., "Sandwich Panels With Kagome Lattice Cores Reinforced By Carbon Fibers ", *Composite Structures*, Vol. 81, No. 4, pp. 533-539, 2007 .
- [12] Jadhav, P. Mantena, P. R. and Gibson, R. F., "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 .
- [13] Li, G. and Cheng, J., "A Generalized Analytical Modeling Of Grid Stiffened Composite Structures ", *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No. 24, pp. 2939-2969, 2007 .
- [14] Hou, A. and Gramoll, K., "Compressive Strength Of Composite Lattice Structures ", *Journal of Reinforced plastics and composites*, Vol. 17, No. 5, pp. 462-483, 1998 .
- [15] Zhang, Z. Chen, H. and Ye, L., "A Stiffened Plate Element Model For Advanced Grid Stiffened Composite Plates/Shells ", *Journal of composite materials*, Vol. 45, No. 2, pp. 187-202, 2011 .
- [16] Zhang, Z. Chen, H. and Ye, L., "Progressive Failure Analysis For Advanced Grid Stiffened Composite Plates/Shells ", *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1, pp. 45-54, 2008 .
- [17] Yazdani, M. Rahimi, H. Khatibi, A. A. and Hamzeh, S., "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 .
- [18] Yazdani, M. Rahimi, G., "The Behavior Of GFRP-Stiffened And-Unstiffened Shells Under Cyclic Axial Loading And Unloading ", *Journal*