



## بررسی تجربی و عددی سازه‌های ساندویچی با اتصال دو طرفه تحت بارگذاری استاتیکی

شیدخت رشیدداداش<sup>1</sup>، مجتبی صدیقی<sup>2</sup>، سهیل داریوشی<sup>3\*</sup>

1- دانشجو، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14977-13115، [s.dariushi@ippi.ac.ir](mailto:s.dariushi@ippi.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 96/7/24	سازه‌های ساندویچی به طور گسترده در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوا فضا، کشتی سازی، ساخت ناوگان ریلی و غیره کاربرد دارند.
پذیرش: 96/10/4	این سازه‌ها عموماً در ابعاد محدود ساخته شده و با استفاده از اتصالات فلزی، چسب و یا پیچ به یکدیگر متصل می‌گردند. در مقاله حاضر، دو نوع اتصال فلزی با جنس یکسان و هندسه متفاوت بین سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت اپوکسی- شیشه و هسته لانه زنبوری آلومینیومی در نظر گرفته شده است که این اتصالات با استفاده از رزین اپوکسی به سازه ساندویچی متصل گردیده‌اند. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون‌های خمش سه نقطه بر روی تیر و خمش ورق بر روی نمونه‌ها انجام شدند. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحت گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از کار عددی با نتایج تجربی مشاهده گردید. سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.
<b>کلیدواژگان:</b> سازه ساندویچی اتصالات لانه زنبوری آزمون استاتیکی	

## Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading

Shidokht Rashiddadash<sup>1</sup>, Mojtaba Sadighi<sup>1</sup>, Soheil Dariushi<sup>2\*</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran.

2- Composite group, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14977-13115, Tehran, Iran, [s.dariushi@ippi.ac.ir](mailto:s.dariushi@ippi.ac.ir)

### Keywords

Sandwich panel  
 Connection  
 Honeycomb  
 Static tests

### Abstract

Sandwich structures are used in applications that required a combination of high rigidity and low weight same as aerospace, marine and automotive. Large and/or complicated sandwich structures are often manufactured by connecting pre-fabricated sandwich panels by means of connections, adhesive or bolts. In present study, two types of metallic connections were used to join two sandwich panels with glass-epoxy face-sheets and aluminum honeycomb core. Connections have the same material and different geometries and were bonded to the sandwich structures using the same epoxy as used to manufacture the face-sheets. Two groups of specimens were made and tested under bending loading. Also, a finite element simulation using LS-DYNA were performed to predict the behavior of sandwich structures. A good compliance between numerical and experimental results was observed. The effects of increasing the length and the thickness of the connections on the maximum force and energy absorption were investigated to examine the influences of involved parameters on bending response of a sandwich plates.

### 1-مقدمه

در بین هسته‌های مختلف، هسته‌های لانه زنبوری به علت داشتن ظرفیت جذب انرژی بالا از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشند. همچنین در این هسته‌ها، با تغییر پارامترهای هندسی از قبیل ضخامت، ارتفاع، اندازه سلول و زاویه داخلی می‌توان خواص مختلفی بدست آورد [5]. سازه‌های ساندویچی بزرگ و یا پیچیده غالباً با ساخت سازه‌های ساندویچی از قبل ساخته‌شده و سپس اتصال آن‌ها به هم تولید می‌شوند. برای مثال، در کشتی‌های ساخته‌شده با اجزاء ساندویچی، دیوارها به تنه کشتی با این روش متصل می‌گردند. [6]

یک سازه ساندویچی متشکل است از دو رویه نازک، مستحکم و سفت که توسط یک هسته ضخیم و کم وزن از هم جدا شده‌اند. رویه‌ها با چسب به هسته چسبانده می‌شوند تا امکان انتقال بار بین اجزاء حاصل گردد. [1-3] در سال‌های اخیر استفاده از سازه‌های ساندویچی در صنایع مختلف به علت داشتن استحکام و سفتی نسبت به وزن کم، مقاومت خمشی بالا و بسیاری خواص دیگر مانند مقاومت به خوردگی و مقاومت به ضربه بالا افزایش یافته است. [4]

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Rashiddadash, S. sadighi, M. and Dariushi, S., "Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 415-426, 2018.

تحلیلی استفاده شد و انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و عددی مشاهده گردید. سپس یک اینسرت دایره‌ای در یک پنل ساندویچی عرشه کشتی در نظر گرفته شد و مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. نیکلاس<sup>8</sup> روش پیدا کردن هندسه بهینه یک اتصال پنل به پنل در چیدمان طولی که با استفاده از نرم افزار انسیس انجام شد را ارائه داد [11]. پارامترهایی که مقادیر تا حد امکان پایین ضرایب تمرکز تنش هندسی در جرم و تغییرشکل‌های قابل قبول سازه را تضمین می‌کردند، پیدا شدند. با تحلیل نتایج بدست آمده، هندسه بهینه اتصال موردنظر ارائه شد.

همبزر، پین<sup>9</sup> رفتار شکست انواع مختلف اینسرت‌های گلدانی یا محفظه‌ای<sup>10</sup> و اتصالات گوشه را در سازه ساندویچی‌های با هسته لانه زنبوری نومکس مورد بررسی قرار دادند [12]. آزمون‌های بیرون کشیدن<sup>11</sup> روی اینسرت‌ها نشان داد که در ابتدا شکست برشی هسته اتفاق افتاد و پس از آن سلول‌های گلدانی تحت پارگی کششی دچار شکست شدند. تحت بارگذاری برش بیرون<sup>12</sup>، سلول‌های گلدانی و رویه بالایی در برش دچار شکست شدند و در این آزمون موقعیت اینسرت داخل ناحیه گلدانی تاثیر چشمگیری روی نتایج داشت ولی نوع اینسرت هیچ تاثیری نداشت. در هر دو آزمایش تنش-های شکست تحت تاثیر نوع بارگذاری بودند. رفتار شکست اتصالات گوشه تحت بارهای خمشی یا برشی در ابتدا با جدایش سطوح اتصال مربوطه بدست آمد. تحلیل المان محدود هم با نرم افزار ال اس داینا انجام شد و نتایج دو روش فوق انطباق خوبی با هم داشتند. سانگ و همکاران<sup>13</sup> یک مطالعه تجربی روی بارهای شکست برشی و کشش بیرون اتصالات ساندویچی‌های کامپوزیتی انجام دادند [13]. جهت ساخت نمونه‌ها از هسته لانه زنبوری نومکس و کامپوزیت کربن-اپوکسی استفاده شد. 80 نمونه که 16 نوع آن‌ها بسته به ارتفاع هسته، دانسیته هسته، ضخامت رویه، لقی اینسرت و جهت بارگذاری متفاوت بودند، مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای بارگذاری کشش بیرون گرچه بار شکست اتصال تحت تاثیر دانسیته و ارتفاع هسته است ولی آن‌ها شدیداً از ضخامت رویه‌ها تاثیر می‌پذیرند. اتصال‌هایی که در آن لقی قرار داده شده بود و آن لقی با مواد معدنی پر شده بود، بار شکست بیشتری را نسبت به حالتی که اینسرت بدون لقی نصب شده بود، نشان داد. در بارگذاری برشی، بارهای شکست اتصالات تحت تاثیر ضخامت رویه بود و خواص هسته نظیر ارتفاع و جهت هسته تاثیر ناچیزی روی بار شکست داشت. دملیو و همکاران<sup>14</sup> یک پروژه تجربی جهت تعیین رفتار استاتیکی و خستگی نمونه‌های ساخته شده از ورق‌های فولادی و سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی که با اتصالات مکانیکی یا کور به هم متصل شده بودند انجام دادند [14]. از داده‌های حاصل از آزمون استاتیکی و خستگی می‌توان ملاحظاتی جهت استفاده از سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی متصل شده با اتصال‌دهنده‌ها بدست آورد. عملیات مته‌زنی (که معمولاً بحرانی می‌باشد و نیازمند ابزار خاص و راه‌حل‌های فنی اصلاح شده است) احتمالاً به علت اثر محکم‌کنندگی چسب بین هسته و پوسته، کمتر از حد انتظار بحرانی بود. در آزمون‌های استاتیکی، اتصالات در بارگذاری برشی بهتر عمل کردند. پیرسازی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی فقط تنزل جزئی ویژگی‌های مکانیکی اتصال را سبب شد. هم الیاف رویه‌ها و هم ضخامت هسته سازه ساندویچی روی

این اتصالات عموماً فلزی بوده و با استفاده از چسب و یا پیچ و یا هر دو به سازه ساندویچی متصل می‌شوند. برخی از مشکلات چسباندن قطعات فلزی و کامپوزیت‌ها به یکدیگر مربوط به اختلاف زیاد بین خواص مکانیکی این دو و ناهمسانگردی زیاد کامپوزیت‌ها می‌باشد. عدم تطابق سفتی<sup>1</sup> عموماً منجر به تمرکز تنش زیاد و اتصال ضعیف می‌شود. [7] در بخش زیر به برخی از کارهای انجام شده در این حوزه اشاره شده است:

تفتگارد، لیستروپ<sup>2</sup> چندین اتصال T-شکل بین سازه‌های ساندویچی که در کاربردهای نیروی دریایی استفاده می‌شوند را مورد بررسی قرار دادند [8]. در طرح موجود سازه‌ها توسط فیلر و لمینیت‌های خارجی که دارای ضخامت مشابه با لمینیت‌های رویه‌ها هستند، به هم متصل شده‌اند. همچنین، یک مدل‌سازی المان محدود و مقایسه تنش‌ها در شکل‌های مختلف اتصال T انجام شد.

سانو، گرنستد<sup>3</sup> دو نوع اتصال چسبی-پیچی و اتصال سوراخ‌دار همراه با تزریق<sup>4</sup> بین مقطعی از فولاد ضدزنگ از یک طرف و از طرف دیگر سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته از جنس فوم را مورد بررسی قرار دادند [6]. نمونه‌های تیر شامل اتصال ساخته شد و تحت بارهای خمشی و برشی، مورد آزمایش قرار گرفتند. دو نوع تیر مرجع ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت: تیر ساندویچی کامپوزیتی و تیر مرجع فولادی. نتایج آزمون‌ها نشان داد هر دو نوع اتصال استحکام خوبی دارند و در هیچ کدام شکست اتصال اتفاق نیفتاد. خرابی همیشه دورتر از اتصال و در بخش کامپوزیتی تیر ساندویچی و عموماً در رویه تحت بار فشاری اتفاق می‌افتد.

بنیواوینچاکول و همکاران<sup>5</sup> تحلیل عددی و تجربی بر روی اینسرت‌های مورد استفاده در سازه‌های ساندویچی را انجام دادند [9]. در مورد سازه ساندویچی چرخ‌های هواپیما، نقطه اتصال با استفاده از یک تقویت موضعی که اینسرت نامیده می‌شود، ساخته می‌شود. این اینسرت با رزین ریخته شده در هسته نومکس ساخته می‌شود. آزمون‌های کشش به بیرون<sup>6</sup> به طور متناوب بر روی اینسرت انجام گرفته و جابجایی سه بعدی با روش‌های نوری اندازه‌گیری شده است. مدهای خرابی بالقوه (لایه‌لایه‌شدگی، شکست موضعی الیاف، جدایش هسته و پوسته، له‌شدگی هسته و کمناش برشی هسته) زیاد بودند. آزمایشات نشان داد برای بارهای کمتر اثرات غیرخطی و هیستریزس عمدتاً به علت کمناش برشی هسته است. سپس قانون خرابی مدول برشی روی یک مدل المان محدود غیر خطی انجام شد.

بوژه ولنایا و همکاران<sup>7</sup> اثرات خمشی موضعی را در مجاورت اینسرت‌های داخل ساندویچ پنل مورد بررسی قرار دادند [10]. این اثرات خمشی موضعی به علت افزایش تنش‌های خمشی در رویه‌های سازه ساندویچی و تنش‌های نرمال و برشی در هسته بوجود می‌آیند. یک مدل تحلیلی قبلاً توسعه یافته (مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی سازه‌های ساندویچی 551 (2002) (ICSS-6)) برای حالت یک سازه ساندویچی با اینسرت‌های دایره‌ای با خواص الاستیک متفاوت با هسته اصلاح شد. تنش‌های موضعی ایجادشده در رویه‌ها و هسته به علت وجود اینسرت از طریق روابط تحلیلی ساده بیان می‌شوند. از روش المان محدود جهت اثبات کارآمد بودن مدل

<sup>8</sup> K Niklas

<sup>9</sup> S Heims, M Pein

<sup>10</sup> potted

<sup>11</sup> Pull out

<sup>12</sup> Shear out

<sup>13</sup> K-I Song, J-Y Choi, J-H Kweon, J-H Choi, K-S Kim

<sup>14</sup> G Demelio, K Genovese, C Pappalettere

<sup>1</sup> Stiffness mismatch

<sup>2</sup> H. Toftegaard, A. Lystrup

<sup>3</sup> J. Cao, J.L. Grenestedt

<sup>4</sup> co-infused perforated

<sup>5</sup> P. Bunyawanchakul, B. Castanie, J.-J. Barrau

<sup>6</sup> Pull out

<sup>7</sup> E Bozhvolnaya, A Lyckegaard, O.T Thomsen, V Skvortsov

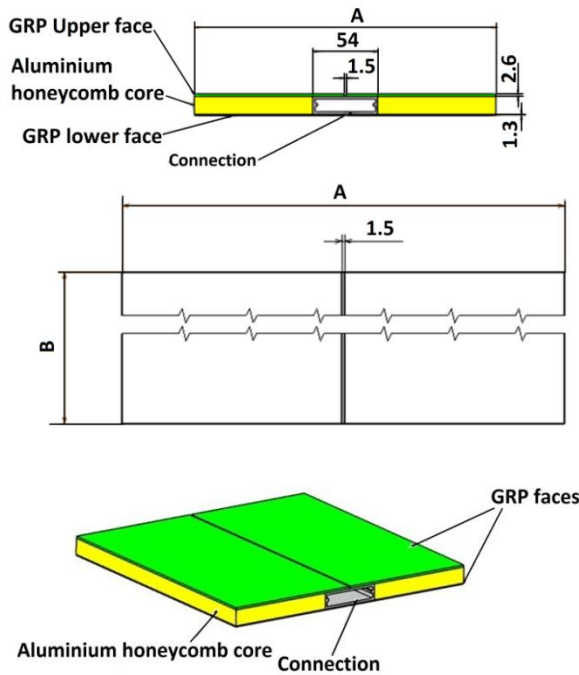


Fig. 2 Schematic Figure of connection type 2

شکل 2 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع دوم

### 2-2- ساخت نمونه‌ها

مواد مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها الیاف شیشه تک جهته ( E-Glass, Axson, Epolam 2002 resin with Epolam )، رزین اپوکسی (350 g/m<sup>2</sup> hardener 2002) و لانه زنبوری آلومینیومی (40 kg/m<sup>3</sup>) می‌باشد. در ابتدا رویه‌های ساندویچ‌پنل با روش تزریق در خلاء (VIP) ساخته شده و به ابعاد مناسب بریده شدند. سپس لانه زنبوری آلومینیومی به ابعاد مناسب برش داده شد و آلودگی‌های آن با استفاده از محلول هیدروکسید سدیم زدوده شد. به این ترتیب که 30 گرم هیدروکسید سدیم در 1 لیتر آب حل کرده و لانه زنبوری به مدت 5 دقیقه در این محلول قرار داده شد. به این عمل اصلاح سطح<sup>2</sup> گفته می‌شود. پس از اصلاح سطح لانه زنبوری‌ها ظرف مدت 24 ساعت باید عمل اتصال به رویه‌ها انجام شود تا اثر اصلاح سطح از بین نرود. اتصال رویه‌ها به هسته در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول رزین با استفاده از قلم‌مو، به رویه زیرین اعمال شد و لانه زنبوری در محل مناسب روی رویه زیرین قرار گرفت. یک وزنه 5 کیلوگرمی به شکل صفحه فلزی صاف به منظور ایجاد فشار بر روی سطح هسته قرار داده شد. پس از گذشت 12 ساعت و پخت رزین موجود بین رویه و هسته، رزین بر رویه بعدی اعمال شد و لانه زنبوری و بر روی آن قرار گرفت و دوباره وزنه روی کل مجموعه به مدت 12 ساعت قرار داده شد. سپس با داشتن هر یک از سازه‌های ساندویچی عملیات اتصال آن‌ها به هم با استفاده از پروفیل اتصال آلومینیومی انجام شد. برای این منظور ابتدا پروفیل آلومینیومی به روش گفته شده اصلاح سطح گردید و سپس رزین اپوکسی بر روی آن اعمال شد و دو سازه ساندویچی در محل‌های مناسب روی پروفیل قرار گرفت و بر روی مجموعه به مدت 24 ساعت وزنه 5 کیلوگرمی قرار داده شد. نمونه‌های نهایی در شکل 3 نشان داده شده است. در کل 12 نمونه ساخته شدند، 3 تیر با اتصال نوع اول، 3 تیر با اتصال نوع دوم، 3 ورق با اتصال نوع اول و 3 ورق با اتصال نوع دوم.

<sup>2</sup> Etching

استحکام خستگی اتصالات آزمون شده تاثیر داشت. دودکینز و همکاران<sup>1</sup> طراحی اتصالات در سازه‌های FRP کشتی را مورد بررسی قرار دادند و طرح‌های اتصالات پهنه‌شده که دارای استحکام بالاتر و با وزن کاهش یافته می‌باشند، را ارائه دادند [15].

در این پروژه دو نوع اتصال فلزی با هندسه‌های متفاوت جهت اتصال سازه‌های ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون خمش بر روی نمونه‌های اتصال انجام شد و اتصال دارای استحکام بالاتر تعیین گردید. بعلاوه به منظور شبیه سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحنه گذاری نتایج شبیه سازی نرم افزاری انجام گرفت و سپس برای هر دو اتصال، تاثیر افزایش طول و ضخامت بر حداکثر نیرو و جذب انرژی از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.

### 2-تحلیل تجربی

#### 1-2- شکل شماتیک اتصالات

در این پروژه دو نوع اتصال بین سازه‌های ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل شماتیک دو نوع اتصال در شکل 1 و شکل 2 نشان داده شده است. مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی در جدول 1 قید گردیده است.

جدول 1 مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی

Table 1 characteristic of each of the sandwich components

اجزاء	جنس
اتصالات	Al 6063 T5
رویه فوقانی	کامپوزیت رزین اپوکسی و الیاف شیشه UD 350 gr/m <sup>2</sup> با چیدمان [0/90/0/90/0/90/0] با ضخامت 2.6 mm
رویه تحتانی	کامپوزیت رزین اپوکسی و الیاف شیشه UD 350 gr/m <sup>2</sup> با چیدمان [0/90/0] با ضخامت 1.3 mm
هسته	لانه زنبوری آلومینیومی با ضخامت دیواره 0.05 mm و اندازه سلول 6 mm و ارتفاع 15 mm

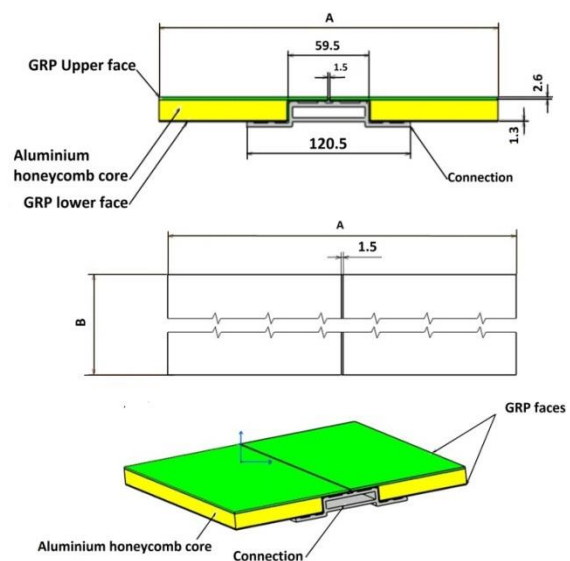
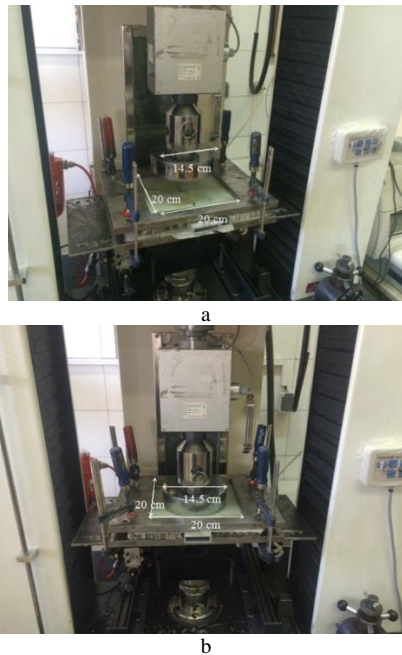


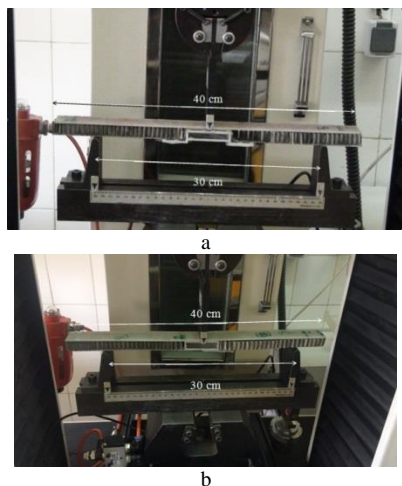
Fig. 1 Schematic Figure of connection type 1

شکل 1 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع اول

<sup>1</sup> A.R. Dodkins, R.A. Sheno, G.L. Hawkins



**Fig. 4** bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2  
 شکل 4 آزمون خمش بر روی ورق- (a) اتصال نوع اول، (b) اتصال نوع دوم

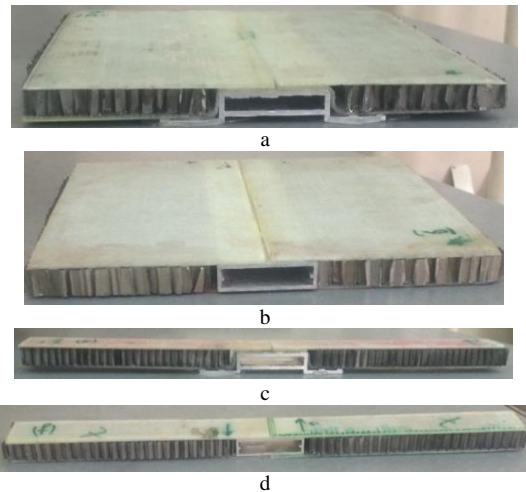


**Fig.5** Bending test on the plate- a) connection 1, b) connection 2  
 شکل 5 آزمون خمش بر روی ورق- (a) اتصال نوع اول، (b) اتصال نوع دوم

### 3-نتایج و بحث

نمودار نیرو- جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در شکل 6 نشان داده شده است، نمودار نیرو- جابجایی همانطور که در شکل 6 نشان داده شده است به 4 بخش می‌تواند تقسیم شود. بخش اول (I) غیرخطی است و مربوط به شروع تماس بین نمونه و سمبه (فک اعمال بار) می‌باشد. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود. بخش سوم (III) به علت شروع خرابی‌ها غیرخطی می‌باشد. بین بخش سوم و چهارم، افت ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود که علت آن گسترش خرابی می‌باشد و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی‌های گسترده کاهش می‌یابد.

مدهای خرابی مشاهده شده، در شکل 7 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا، تغییر شکل پلاستیک اتصال و تغییر شکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد.



**Fig. 3** specimens a) plate with connection type 1 b) plate with connection type 2 c) beam with connection type 1 d) beam with connection type 2

شکل 3 نمونه‌های نهایی- (a) ورق شامل اتصال نوع اول، (b) ورق شامل اتصال نوع دوم، (c) تیر شامل اتصال نوع اول، (d) تیر شامل اتصال نوع دوم

### 2-3-آزمون‌های تجربی

در این تحقیق دو نوع آزمون بر روی هر یک از دو اتصال انجام شد. این آزمون‌ها به قرار زیر می‌باشند:

آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر با ابعاد  $40 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$   
 آزمون خمش ورق بر روی ورق با ابعاد  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$   
 تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق ( $25^\circ\text{C}$ ) و رطوبت نسبی محیط (65%) انجام شدند. دستگاه مورد استفاده، دستگاه آزمون کشش سنتام (STM-150) با ظرفیت 15 تن می‌باشد.

### 2-3-1- آزمون خمش بر روی ورق‌های با ابعاد $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$

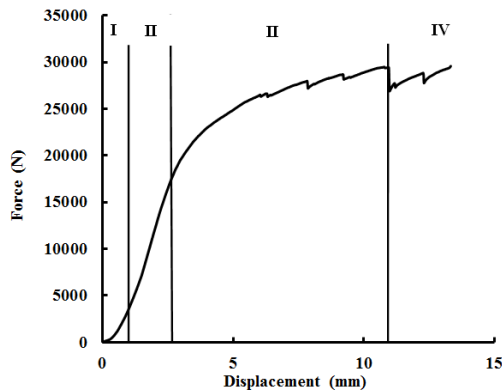
برای آزمون خمش ورق‌ها، نمونه آزمون بین دو فیکسچر فلزی به شکل قاب (هم از بالا و هم از پایین) قرار داده شد به طوریکه فقط  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  آن تحت بار قرار گرفت و نمونه آزمون و این صفحات توسط شش گیره به هم محکم شدند.

سمبه دارای قطر 145 mm در این آزمون استفاده شد به منظور اینکه تمامی اجزاء (اتصال، لانه زنبوری و رویه‌ها) در پاسخ شرکت نمایند. آزمون‌ها به صورت شبه‌استاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. لازم به ذکر است که سرعت انجام آزمون  $5 \text{ mm/min}$  بود. آزمون خمش بر روی صفحات طبق شکل 4 برای اتصال نوع اول و اتصال نوع دوم انجام شد.

### 2-3-2- آزمون خمش سه نقطه بر روی تیرهای با ابعاد $40 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$

برای هر اتصال سه تیر ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت. طول تیرها 40 cm و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها 30 cm در نظر گرفته شد. سرعت انجام آزمون  $5 \text{ mm/min}$  می‌باشد. آزمون‌ها به صورت شبه‌استاتیک انجام شدند تا بار خرابی نهایی حاصل گردد. خرابی زمانی است که نمونه نتواند افزایش بیشتر در بار را تحمل نماید. نمونه و دستگاه آزمون برای اتصال نوع اول و برای اتصال نوع دوم در شکل 5 نشان داده شده است.

در کل 12 نمونه تحت خمش مورد آزمون قرار گرفت: 3 ورق با اتصال نوع اول، 3 ورق با اتصال نوع دوم، 3 تیر با اتصال نوع اول و 3 تیر با اتصال نوع 2.



**Fig. 8** Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 9 نشان داده شده است و شامل گسیختگی رویه بالا و تغییرشکل پلاستیک اتصال می‌باشد. با اعمال نیرو بر مرکز تیر و روی اتصال، به علت آنکه اتصال دارای استحکام و صلبیت بالایی می‌باشد، نیروی اعمال شده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییرشکل برشی و کمانش می‌گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمی‌شود. در نمودار شکل 10 ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. همچنانکه جابجایی بیشتری اعمال گردید، افت نیرو به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می‌شود. مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 11 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 10 نشان داده شده است. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم در شکل 12 نشان داده شده است.



a

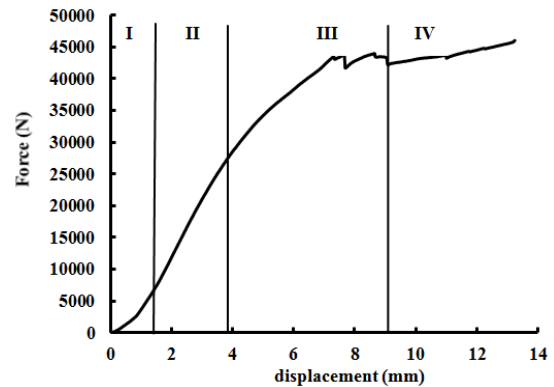


b

**Fig. 9** Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2, a) failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection

شکل 9 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع دوم (a) گسیختگی رویه بالا، (b) تغییرشکل پلاستیک اتصال

نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 8 نشان داده شده است. مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع I، نمودار نیرو-جابجایی در شکل 8 را می‌توان به 4 بخش تقسیم نمود. بخش اول (I) به علت شروع تماس بین نمونه و سمبه غیرخطی است. در بخش دوم (II) به علت کامپوزیت بودن رویه‌ها قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود. بخش سوم (III) غیرخطی است که علت آن شروع خرابی‌ها می‌باشد. بین بخش سوم و چهارم به علت گسترش خرابی‌ها افت ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود و در بخش چهارم (IV) سفتی نمونه به علت وجود خرابی‌های گسترده کاهش می‌یابد.



**Fig. 6** Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



a



b



c

**Fig. 7** Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1, a) failure of the upper skin, b) plastic deformation of the connection, c) shear deformation and buckling of honeycomb

شکل 7 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی صفحه دارای اتصال نوع اول (a) گسیختگی رویه بالا، (b) تغییرشکل پلاستیک اتصال، (c) تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری



که به علت استحکام و صلبیت بالای اتصال، نیروی اعمال شده توسط لانه زنبوری تحمل گردیده و لانه زنبوری دچار تغییرشکل برشی و کمانش می‌گردد و هیچگونه آثار خرابی بر روی اتصال مشاهده نمی‌شود. مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 13 نشان داده شده است و شامل تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری می‌باشد. مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجایی‌های مربوط به آن‌ها برای تیرها و ورق‌ها در جدول 2 نشان داده شده است.



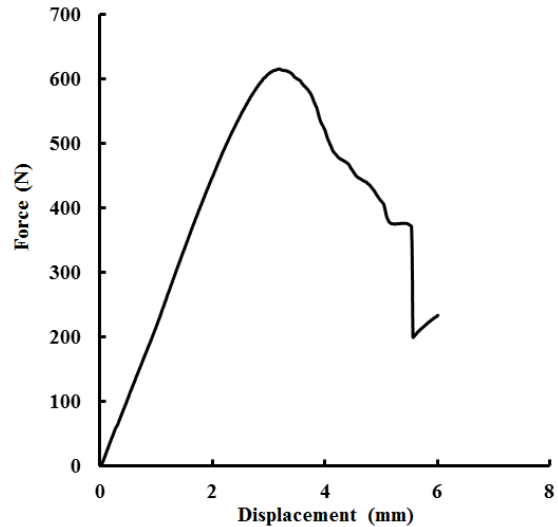
**Fig. 13** Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 2

شکل 13 تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع دوم

جدول 2 مقایسه بین نیروی ماکزیمم و نیروی شکست و جابجایی‌های مربوط

**Table 2** Comparison between maximum force and failure load and their corresponding displacements

تیر با اتصال نوع ۲	تیر با اتصال نوع ۱	ورق با اتصال نوع ۲	ورق با اتصال نوع ۱	
0.022	0.053	0.145	0.353	جرم اتصال (Kg)
557.7±0	495.9±119.7	21971.3±64.3	45410.4±144 5.7	نیروی ماکزیمم (N)
25350±0	9356.6±225 8.5	151526.5±44 3.4	128641.5±40 95.5	نیروی ماکزیمم بر واحد جرم (N/Kg)
4.904±0.784	2.814±0.383	3.285±0.0126	8.934±0.286	جابجایی مربوط به نیروی ماکزیمم (mm)
236.65±66.9 5	268.05±44.3 5	32983.7±341 3.9	47645.3±160 9.5	نیروی شکست (N)
10756.8±30 43.2	5057.5±836. 8	227473.8±23 544.1	134972.7±45 59.5	نیروی شکست بر واحد جرم (N/Kg)
39.731±3.24 9	32.066±0.29 22	13.503±0.175	13.812±0.567	جابجایی مربوط به نیروی شکست (mm)



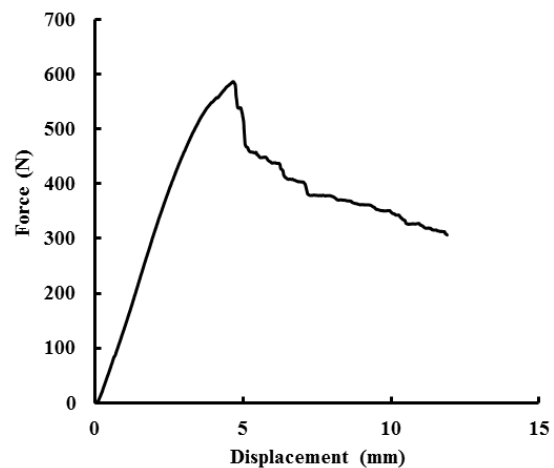
**Fig. 10** Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending

شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش



**Fig. 11** Shear deformation and buckling of honeycomb after performing bending test on the beams with connection type 1

شکل 11 تغییرشکل برشی و کمانش لانه زنبوری پس از انجام آزمون خمش بر روی تیر دارای اتصال نوع اول



**Fig. 12** Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش

مشابه نمودارهای مربوط به اتصال نوع 1، در بخش اول نمودار شکل 12، ابتدا به دلیل کامپوزیت بودن رویه‌ها، قبل از خرابی رفتار الاستیک خطی مشاهده می‌شود تا بار ماکزیمم حاصل گردد. با اعمال جابجایی بیشتر، افت نیرو به علت کمانش و پارگی لانه زنبوری مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است

در طول حل، اندازه مرحله زمانی جدید با در نظر گرفتن حداقل مقدار در تمامی المان‌ها و با استفاده از رابطه (1) بدست می‌آید.

$$\Delta t^{n+1} = TSSFAC \times \min \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N\} \quad (1)$$

که در رابطه (1)، N تعداد المان‌ها و TSSFAC طبق پیشنهاد راهنمای نرم‌افزار برای حالاتی که انفجار وجود ندارد، مقدار 0.9 در نظر گرفته می‌شود. شرایط تماس contact surface to surface بین سمبه و رویه فوقانی اعمال گردید و شرایط تماس contact tied nodes to surface بین لانه زنبوری و رویه‌های فوقانی و تحتانی و اتصال با رویه‌های فوقانی و تحتانی اعمال گردید. شکل 15 و شکل 16 شرایط مرزی و بارگذاری را برای ورق‌ها و تیرها نشان می‌دهند.

خواص رویه‌های ساندویچ در سه جهت با استفاده از آزمون تجربی بر اساس استاندارد ASTM D638 بدست آمد [16] و رفتار پلاستیک اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش- کرنش دو خطی<sup>1</sup> مدل شد [17]. خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری در جدول 3 و خواص مکانیکی رویه‌های GRP در جدول 4 قید شده است.

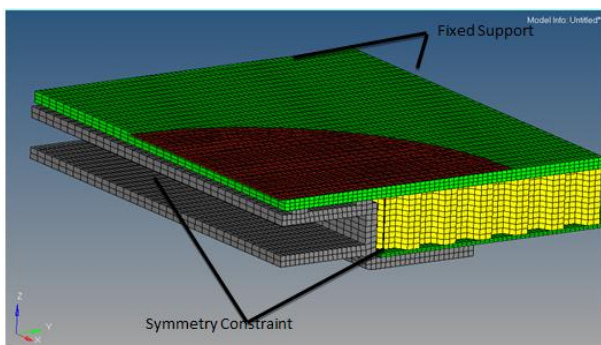


Fig. 15 Boundary conditions and loading for plates

شکل 15 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق‌ها

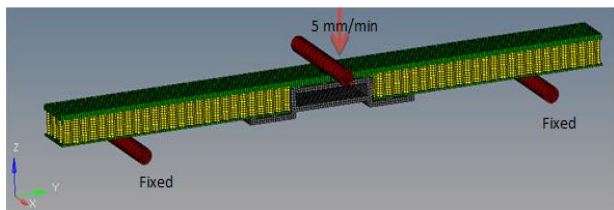


Fig. 16 Boundary conditions and loading for plates

شکل 16 شرایط مرزی و بارگذاری برای ورق‌ها

جدول 3 خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری

Table 3 Mechanical properties of honeycomb and connections

اجزاء	جنس	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پوآسون	تنش تسلیم (MPa)
اتصالات	آلومینیوم 6063-T5	2690	68.3	0.330	145.0
لانه زنبوری	آلومینیوم 5052-O	2680	69.3	0.330	90.0

<sup>1</sup> bilinear

با توجه به جدول 2، به علت آنکه نیروی ماکزیمم و نیروی شکست نمونه‌های دارای اتصال نوع اول (ورق و تیر) بیشتر از نمونه‌های دارای اتصال نوع دوم است، اتصال نوع اول استحکام بیشتری را از اتصال نوع دوم فراهم می‌کند. اما نمونه‌های دارای اتصال نوع دوم دارای حداکثر نیرو بر واحد جرم و نیروی خرابی بر واحد جرم بیشتری می‌باشند.

بنابراین در صورتی که در طراحی، کاهش وزن حائز اهمیت نباشد (مانند صنعت ریلی)، استفاده از اتصال نوع اول منطقی به نظر می‌رسد، در غیر اینصورت (مانند صنایع هوا فضا) استفاده از اتصال نوع دوم پیشنهاد می‌شود.

#### 4- تحلیل عددی

##### 4-1- توصیف مدل عددی

در این پروژه یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA 971- R7 برای شبیه‌سازی آزمون‌ها پیشنهاد گردید.

جهت انجام تحلیل عددی در این پروژه، پس از ایجاد مدل هندسی در هر یک از حالات، برای ایجاد شبکه، مدل در نرم‌افزار هایپر مش وارد گردید. لازم به ذکر است که تکیه‌گاه‌ها و سمبه نیز در هر حالت مدل شدند. به منظور کاهش تعداد المان‌ها و کاهش زمان حل، با استفاده از تقارن کافی است که فقط 1/4 ورق مدل گردید و قيود تقارن اعمال گردید در حالی که تیرها به طور کامل مدل شدند. شبکه مربعی دوبعدی برای لانه زنبوری ایجاد گردید و برای سایر اجزاء شبکه هشت‌وجهی سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت (لانه زنبوری shell و بقیه اجزاء solid مدل شدند). مراحل بررسی همگرایی نتایج تحلیل عددی انجام شده برای ورق با اتصال نوع اول به صورت نمودار در شکل 14 آورده شده است. این نمودار پیش حداکثر میزان جابجایی نقطه مرکز ورق، بر حسب تعداد کل المان‌های موجود در مدل را نشان می‌دهد.

تمامی تحلیل‌ها با استفاده از روش explicit انجام شدند. در آزمون‌های خمش، جابجایی برحسب زمان که از آزمایشات بدست آمد، به عنوان ورودی کار عددی مورد استفاده قرار گرفت و نیرو برحسب زمان بدست آمد. سمبه برای شبیه‌سازی آزمون خمش ورق، یک ورق صلب مدل گردید که دارای جابجایی با سرعت ثابت 5 mm/min می‌باشد. برای شبیه‌سازی آزمون خمش تیر، تکیه‌گاه‌ها و سمبه استوانه‌هایی صلب با قطر 5 mm مدل شدند و به سمبه جابجایی ثابت 5 mm/min اعمال گردید. با توجه به حداکثر جابجایی مشاهده شده در آزمون‌ها (15 mm) و سرعت انجام آزمون‌ها (5 mm/min)، زمان حل 180 s در نظر گرفته شد. بازه زمانی اولیه توسط نرم‌افزار تعیین گردید.

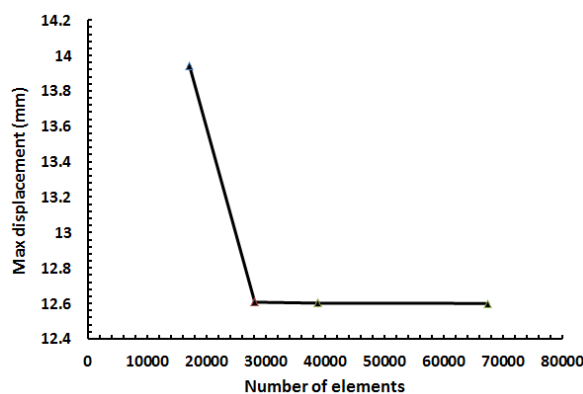


Fig. 14 FEM convergence analysis of plate with connection type 1

شکل 14 آنالیز همگرایی تحلیل المان محدود ورق با اتصال نوع اول

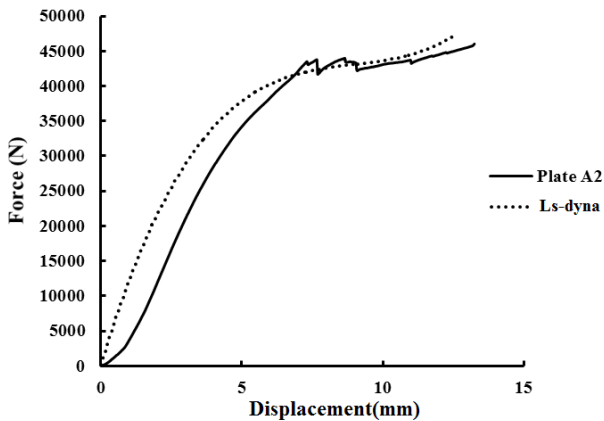


Fig. 17 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending (Numerical and experimental)

شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی (تجربی و عددی)

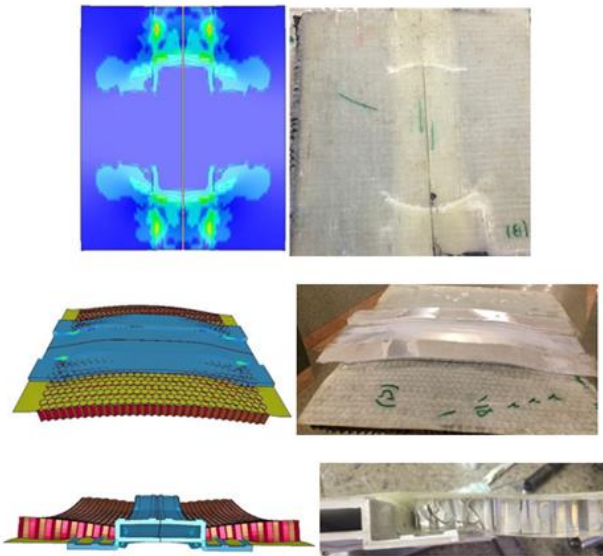


Fig. 18 Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 1 (Numerical and experimental)

شکل 18 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمشی بر روی صفحه دارای اتصال نوع اول (تجربی و عددی)

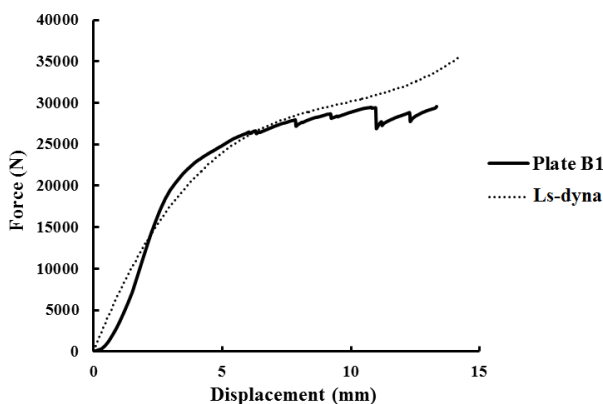


Fig. 19 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending (Numerical and experimental)

شکل 19 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمشی (تجربی و عددی)

جدول 4 خواص مکانیکی GRP

Table 4 Mechanical properties of GRP

مقدار	خاصیت
1540	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
44.6	مدول الاستیک در جهت 1 (GPa)
17.0	مدول الاستیک در جهت 2 (GPa)
16.7	مدول الاستیک در جهت 3 (GPa)
0.079	ضریب پواسون 12
0.090	ضریب پواسون 13
0.353	ضریب پواسون 23
3.49	مدول برشی در جهت 1 (GPa)
3.46	مدول برشی در جهت 2 (GPa)
3.2	مدول برشی در جهت 3 (GPa)
55.8	استحکام برشی (Mpa)
1240	استحکام کششی طولی (Mpa)
43.9	استحکام کششی عرضی (Mpa)
179.0	استحکام فشاری عرضی (Mpa)

رفتار رویه‌های کامپوزیتی تحت بار خمشی توسط معیار چانگ-چانگ<sup>1</sup> بررسی شده است که در نرم افزار از طریق تعریف ماده mat composite damage وارد گردید. ماده mat composite damage یک ماده اورتوتروپ با شکست ترد انتخابی برای کامپوزیت‌ها می‌باشد. 5 خاصیت ماده در سه معیار مورد استفاده قرار می‌گیرند که این پارامترها در جدول 4 قید شده‌اند. رفتار اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش-کرنش دوخطی معادل شدند که ماده Mat plastic kinematic از نرم افزار انتخاب گردید و خواص مکانیکی آن‌ها طبق جدول 3 قرار داده شدند و مدول تانژانت صفر قرار داده شد. معیار خرابی مورد استفاده، معیار کرنش ماکزیمم می‌باشد. در نرم افزار، مقدار  $f_3$  (elongation at break = failure strain)، با توجه به شبهه-استاتیک بودن مسئله و این که المان‌ها در این حالت دچار شکست نمی‌شوند و فقط دچار تغییرشکل می‌شوند (اتصال فقط تغییرشکل پلاستیک دارد و دچار ترک و گسیختگی نمی‌شود)، عدد بزرگی قرار داده شد.

#### 2-4- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی

##### 1-2-4- ورق با اتصال نوع اول

نمودار نیرو-جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 17 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 18 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

##### 2-2-4- ورق با اتصال نوع دوم

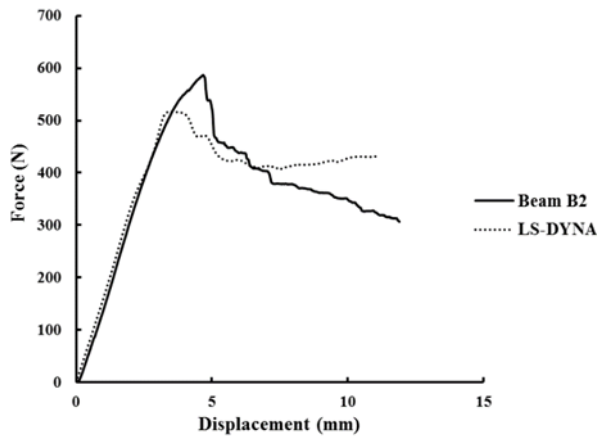
نمودار نیرو-جابجایی ورق با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 19 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 20 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

##### 3-2-4- تیر با اتصال نوع اول

نمودار نیرو-جابجایی تیر با اتصال نوع اول تحت آزمون خمشی در شکل 21 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 22 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

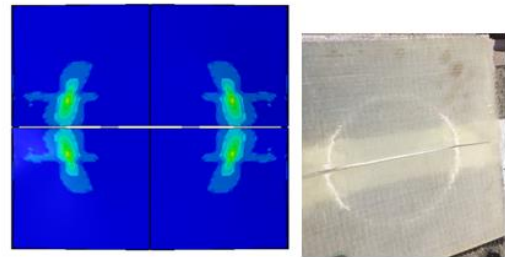
<sup>1</sup> Chang- Chang composite failure model





**Fig. 23** Force-displacement curve for beams with connection type 2 under bending (Numerical and experimental)

شکل 23 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش (تجربی و عددی)



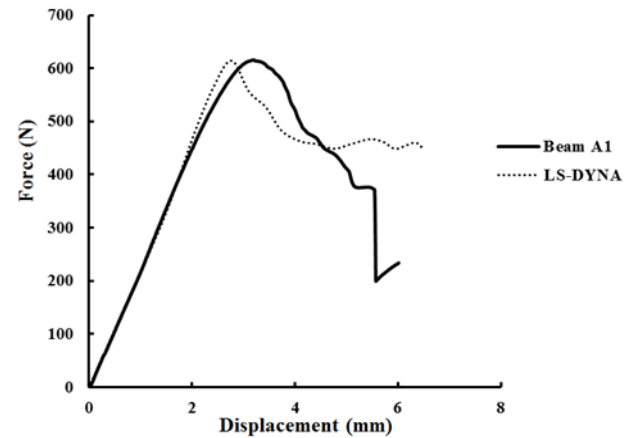
**Fig. 20** Failure modes after performing bending test on the plates with connection type 2 (Numerical and experimental)

شکل 20 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع دوم (تجربی و عددی)



**Fig. 24** Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 2 (Numerical and experimental)

شکل 24 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع دوم (تجربی و عددی)



**Fig. 21** Force-displacement curve for beams with connection type 1 under bending (Numerical and experimental)

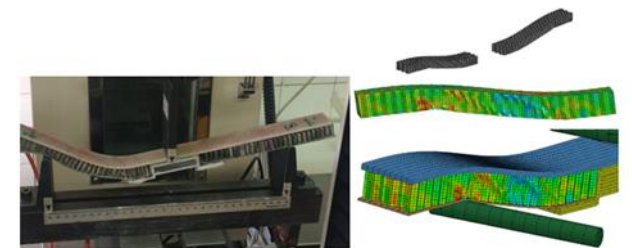
شکل 21 نمودار نیرو-جابجایی برای تیرهای با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش (تجربی و عددی)

### 5-تحلیل پارامتری

برای هر یک از بارگذاری‌های خمش و ضربه سرعت پایین و برای هر یک از اتصالات، دو تحلیل پارامتری روی طول اتصال و ضخامت اتصال انجام شده است.

برای تحلیل پارامتری روی ضخامت، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر  $t$  در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار  $0.25 \text{ mm}$  افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو-جابجایی در آزمون خمش ورق استخراج شدند. برای تحلیل پارامتری روی طول، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر فقط مقدار پارامتر  $l$  در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار  $5 \text{ mm}$  افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو-جابجایی در آزمون خمش استخراج شدند.

نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 1 در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 25 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 25 مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی نیرو-جابجایی در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت اتصال، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش  $16.7\%$  در ضخامت، جرم به مقدار  $9.34\%$  و جذب انرژی به میزان  $7.36\%$  افزایش می‌یابند. نمودار نیرو-جابجایی حاصل



**Fig. 22** Failure modes after performing bending test on the beams with connection type 1 (Numerical and experimental)

شکل 22 مدهای خرابی حاصل از آزمون خمش بر روی ورق دارای اتصال نوع اول (تجربی و عددی)

### 4-2-4- تیر با اتصال نوع دوم

نمودار نیرو-جابجایی تیر با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در شکل 23 و مدهای خرابی مشاهده شده در شکل 24 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و عددی در انطباق مناسبی با هم می‌باشند.

در بخش انتهایی نمودارها در شکل 26، در ضخامت‌های بالا، شیب نمودارها به شدت افزایشی می‌شود که علت آن این است که قسمت‌های بالا و پایین اتصال به هم رسیده و روی هم فشرده می‌شوند و پدیده‌ای مانند چگالش در لانه زنبوری‌ها اتفاق می‌افتد که باعث بالا رفتن شدید نیرو می‌شود.

نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام بارگذاری خمشی در طول‌های مختلف اتصال برای نمونه شامل اتصال نوع 1 در شکل 27 و برای اتصال نوع 2 در شکل 28 ارائه گردیده است.

همانطور که در شکل 27 و شکل 28 مشاهده می‌شود، افزایش طول اتصال تاثیر قابل توجهی بر نمودار نیرو-جابجایی در هیچ یک از دو اتصال ندارد.

جدول 6 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع دوم

Table 6 mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 2		ضخامت (mm)
2.5	2	
0.178	0.145	جرم (Kg)
321.1732	305.0765	جذب انرژی (J)
1804.38	2103.97	جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)

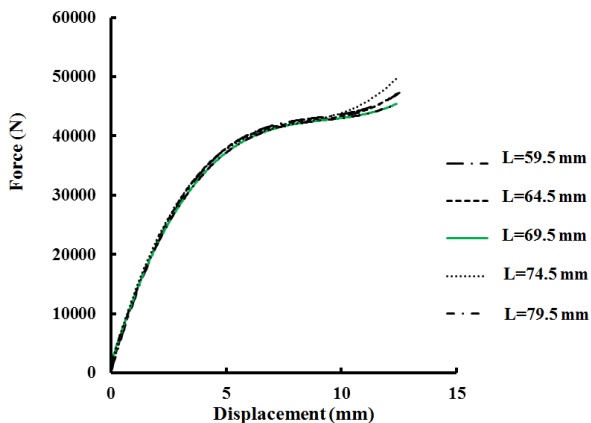


Fig. 27 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection lengths

شکل 27 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در طول‌های مختلف اتصال

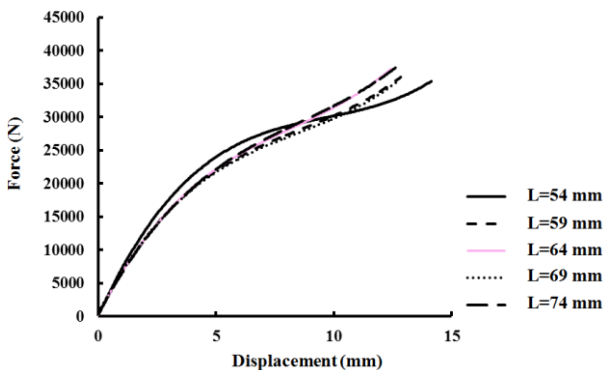


Fig. 28 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection lengths

شکل 28 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در طول‌های مختلف اتصال

از انجام بارگذاری خمشی بر روی ورق شامل اتصال نوع 2 در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 26 ارائه گردیده است. همانطور که در شکل 26 مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت اتصال، شیب منحنی تنش-کرنش در بخش خطی و همچنین ماکزیمم نیرو افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، سطح زیر منحنی افزایش یافته است که این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ضخامت اتصال، ممان اینرسی مقطع افزایش یافته و در پی آن، مقاومت خمشی نمونه تحت آزمون بالاتر رفته است. جدول 6 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش 25% در ضخامت، جرم به مقدار 22.76% و جذب انرژی به میزان 5.28% افزایش می‌یابند.

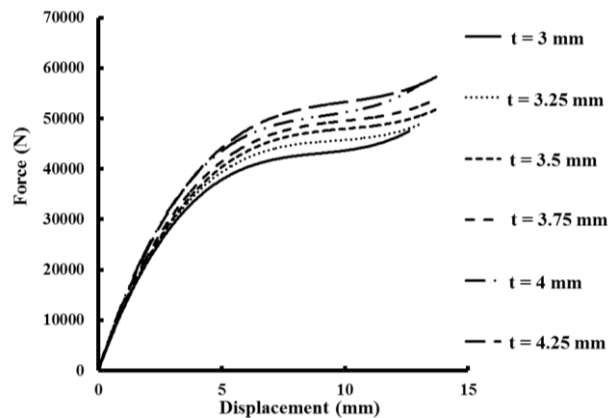


Fig. 25 Force-displacement curve for plates with connection type 1 under bending in different connection thicknesses

شکل 25 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع اول تحت آزمون خمش در ضخامت‌های مختلف اتصال

جدول 5 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت در اتصال نوع اول

Table 5 mass and energy absorption changes with increasing thickness for connection 1		ضخامت (mm)
3.5	3.25	3
0.386	0.37	0.353
495.8458	479.4984	461.8391
1284.57	1295.94	1308.33
		جرم (Kg)
		جذب انرژی (J)
		جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)

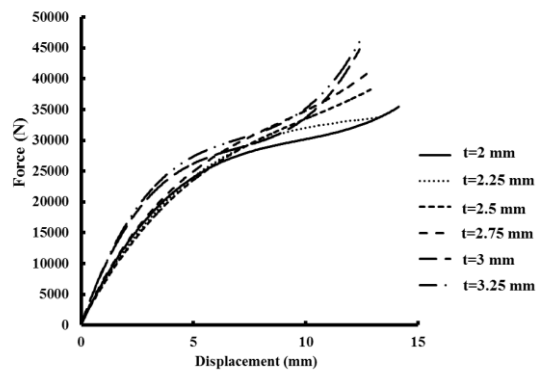


Fig. 26 Force-displacement curve for plates with connection type 2 under bending in different connection thicknesses

شکل 26 نمودار نیرو-جابجایی برای ورق‌های با اتصال نوع دوم تحت آزمون خمش در ضخامت‌های مختلف اتصال

Composite Panels Joined by Fasteners” Composites: Part B, Vol. 32, pp. 299-308, 2001.

- [15] Dodkins, A.R. Sheno, R.A. and Hawkins, G.L., “Design of Joints and Attachments in FRP Ships’ structures”, Marine structures, Vol. 7, pp. 365-398, 1994.
- [16] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638, 2016.
- [17] Hufnagel W., “Key to Aluminum Alloys: Designations, Compositions, Trade Names of Aluminum Materials”, the University of Michigan, 1982.

## 6- نتیجه‌گیری

در این پروژه دو نوع اتصال ساندویچی در نظر گرفته شد و بر روی هر دو اتصال، آزمون‌های خمش بر روی تیر و ورق انجام شدند. هر دو اتصال از آلیاژ AL 6063-T5 ساخته شدند اما هندسه آن‌ها متفاوت بود. نتایج نشان داد که استحکام اتصال نوع اول تقریباً 2 برابر استحکام اتصال نوع دوم می‌باشد ولی استحکام ویژه ورق با اتصال نوع اول کمتر از اتصال نوع دوم می‌باشد. البته با توجه به اینکه ممان اینرسی مقطع اتصال نوع اول بیشتر از ممان اینرسی مقطع اتصال نوع دوم است، بیشتر بودن استحکام اتصال نوع اول قابل پیش‌بینی می‌باشد.

تحلیل پارامتری روی طول و ضخامت دو اتصال انجام گرفت. در هر دو نوع اتصال، افزایش ضخامت اتصال منجر به استحکام بیشتر و جذب انرژی بیشتر می‌شود ولی استحکام ویژه و جذب انرژی ویژه کاهش می‌یابد. به علاوه، تغییر طول اتصال تاثیر چشمگیری بر روی استحکام نداشت.

## 7- مراجع

- [1] Safari, M. and Biglari, H., “Frequency Dependent Damped Vibration of Composite Sandwich Beam With Viscoelastic and Transverse Flexible core Based on GHM Method” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 397-408, 2017. (In Persian)
- [2] Pirmohammadi, N. and Liaghat, G.H. and Hossein-Pol, M., “Experimental Investigation on Ballistic Behavior of Sandwich Panels Made of Honeycomb Core” Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014. (In Persian)
- [3] Hassanpour Roudbeneh, F. and Liaghat, Gh. Sabouri, H. and Hadavinia, H., “Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading” Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 23-31, 2016. (In Persian)
- [4] Azarafza, R. Davar, A. and Mahmoodi, A., “Three-point Bending Test of Metal and Composite Sandwich panels with Grid Stiffened Core” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017. (In Persian)
- [5] Vahdatazad, N. Ebrahimi, S. and Liaghat, G. H., “Oblique Crashworthiness Optimization and Sensitivity Analysis of Tapered Sandwich Columns” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 25-34, 2017. (In Persian)
- [6] Cao, J. and Grenestedt, J.L., “Design and Testing of Joints for Composite Sandwich/Steel Hybrid Ship Hulls” Composites: Part A, Vol. 35, Issue 9, pp. 1091-1105, 2004.
- [7] Bitzer, T., “Honeycomb Technology”, 1st edition, Chapman & Hill, 1997.
- [8] Toftgaard, H. and Lystrup, A., “Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships” Composites: Part A, Vol. 36, pp. 1055-1065, 2005.
- [9] Bunyawanichakul, P. and Castanie, B. and Barrau, J. J., “Experimental and Numerical Analysis of Inserts in Sandwich Structures” Applied Composite Materials, Vol. 12, pp. 177-191, 2005.
- [10] Bozhevolnaya, E. Lyckegaard, A. Thomsen, O.T. and Skvortsov V., “Local Effects in the Vicinity of Inserts in Sandwich Panels”, Composites: Part B, Vol. 35, pp. 619-627, 2004.
- [11] Niklas, K., “Search for Optimum Geometry of Selected Steel Sandwich Panel Joints” Polish Maritime Research, N. 2(56), Vol 15, pp. 26-3, 2008.
- [12] Heimbs, S. and Pein, M., “Failure Behavior of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts” Composite Structures, Vol. 89, pp. 575-588, 2009
- [13] Song, K. Choi, JY. Kweon, JH. Choi, JH. and Kim, KS., “An Experimental Study of The Insert Joint Strength of Composite Sandwich Structures” Composite Structures, Vol. 86, pp. 107-113, 2008.
- [14] Demelio, G. Genovese, K. and Pappalettere, C., “An experimental Investigation of Static and Fatigue Behavior of Sandwich

