



بررسی تجربی و عددی رفتار سازه‌های ساندویچی با اتصال دو طرفه تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین

شیدخت رشیدداداش¹، مجتبی صدیقی²، سهیل داریوشی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران
 * صندوق پستی 14977-13115، s.dariushi@ippi.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 10 دی 1396
 پذیرش: 21 بهمن 1396
 ارائه در سایت: 24 اسفند 1396
 کلید واژگان:
 سازه ساندویچی
 اتصال
 کامپوزیت شیشه / اپوکسی
 لانه زنبوری
 آزمون ضربه سرعت پایین

چکیده

ساختارهای ساندویچی با ابعاد بزرگ عموماً از اجزای کوچکتری تشکیل شده‌اند. این اجزا با نوع خاصی از اتصالات به یکدیگر متصل می‌شوند. این اتصالات می‌توانند فلزی یا چسبی بوده و از نظر هندسی به منظور تحمل بارهای مختلف طراحی شده باشند. این در حالی است که مطالعات محدودی روی رفتار مکانیکی اتصالات سازه‌های ساندویچی صورت پذیرفته است. مقاله حاضر به بررسی رفتار دو نوع اتصال آلومینیومی با هندسه متفاوت تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین می‌پردازد که این اتصالات بین دو سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیت شیشه / اپوکسی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی استفاده شده و با استفاده از رزین اپوکسی به سازه ساندویچی متصل گردیده است. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌های ساندویچی متشکل از دو نوع اتصال انجام شد و رفتار هر یک از اتصالات تحت این نوع بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. به‌علاوه به منظور شبیه‌سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم‌افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری با مقایسه نتایج عددی و تجربی، انجام شد و تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از کار عددی با نتایج تجربی مشاهده گردید. سپس برای هر دو نوع اتصال، تأثیر افزایش طول و ضخامت بر رفتار سازه از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود، مورد مطالعه قرار گرفت.

An experimental and numerical investigation on low velocity impact properties of sandwich panels with bilateral connection

Shidokht Rashiddadash¹, Mojtaba Sadighi¹, Soheil Dariushi^{2*}

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 31 December 2017
 Accepted 10 February 2018
 Available Online 15 March 2018

Keywords:
 Sandwich panel
 Connection
 Glass/epoxy composite
 Honeycomb
 Low velocity impact

ABSTRACT

Large and/or complicated sandwich structures are often manufactured by connecting pre-fabricated sandwich panels by means of connections, adhesive or bolts. In nearly all sandwich constructions certain types of joints have to be used for assembly but little is known about their mechanical behavior. This paper deals with the investigation of the behavior of two aluminum joints with different geometries under low velocity impact tests. These two joints are used to connecting sandwich panels with glass-epoxy skins and aluminum honeycomb core. The joints and sandwich panels are connected by means of epoxy resin. After construction of the specimens, low velocity impact tests were performed on the specimens. Finite element analysis were used to simulate the behavior of sandwich panels with connection. Verification of the numerical results was performed by comparing the numerical and experimental results. There was a good compliance between numerical and experimental results. Also, the effect of increasing the length and the thickness of the connections on the behavior of the sandwich panel was done through a parametric study using the FEM model.

1- مقدمه

هسته با خواص جهت‌دار می‌باشد [1].
 یک سازه ساندویچی متشکل از دو رویه و یک هسته انعطاف‌پذیر می‌باشد. رویه‌ها را معمولاً از ورق‌های مستحکم فلزی و یا ورق‌های چندلایه کامپوزیتی می‌سازند. هسته‌ها نیز غالباً از پلیمرهای سبک، فوم‌ها یا هسته‌های لانه زنبوری ساخته می‌شوند.

استفاده از سازه‌های ساندویچی به طور روز افزون در صنایع مختلف نظیر هوا فضا، صنعت ریلی و حمل و نقل جاده‌ای گسترش یافته است. دلیل اصلی این موضوع، نسبت استحکام به وزن زیاد، مقاومت خمشی بالا، مقاومت به خوردگی، مقاومت به ضربه بالا و امکان استفاده از رویه‌های کامپوزیتی و

Please cite this article using:

Sh. Rashiddadash, M. Sadighi, S. Dariushi, An experimental and numerical investigation on low velocity impact properties of sandwich panels with bilateral connection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 23-31, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رویه‌ها با چسب به هسته چسبانده می‌شوند تا امکان انتقال بار بین اجزاء حاصل گردد [2-4].

در بین هسته‌های مختلف، هسته‌های لانه زنبوری به علت داشتن قابلیت 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].

در سازه‌های ساندویچی بزرگ و یا پیچیده مانند بدنه کشتی‌ها، قطارها و هواپیماها و همچنین پنل‌های داخلی مانند کف و دیواره‌ها، پنل‌های ساندویچی از قبل ساخته شده باید با استفاده از اتصالات به هم متصل گردند. بنابراین استفاده از اتصالات بین سازه‌های ساندویچی در اکثر موارد اجتناب ناپذیر است [6].

اتصالات ساندویچی عموماً فلزی بوده و با استفاده از رزین و یا پیچ و مهره 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^۱ 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:

سائو، گرنستد دو نوع اتصال چسبی- پیچی و اتصال سوراخ‌دار همراه با تزریق^۲ 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.

نیکلاس روش پیدا کردن هندسه بهینه یک اتصال پنل به پنل در چیدمان طولی که با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام شد را ارائه داد [8]. پارامترهایی که مقادیر تا حد امکان پایین ضرایب تمرکز تنش هندسی در جرم و تغییر شکل‌های قابل قبول سازه را تضمین می‌کردند، پیدا شدند. با تحلیل نتایج بدست آمده، هندسه بهینه اتصال مورد نظر ارائه گردید.

سانگ و همکاران یک مطالعه تجربی روی بارهای شکست برشی و کشش بیرون اتصالات ساندویچی‌های کامپوزیتی انجام دادند [9]. جهت ساخت نمونه‌ها از هسته لانه زنبوری نومکس و کامپوزیت کربن-اپوکسی استفاده شد. 80 نمونه که 16 نوع آن‌ها بسته به ارتفاع هسته، چگالی هسته، ضخامت رویه، لقی قطعه داخلی^۳ و جهت بارگذاری متفاوت بودند، مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای بارگذاری کشش بیرون گرچه بار شکست اتصال تحت تأثیر چگالی و ارتفاع هسته است ولی آن‌ها شدیداً از ضخامت رویه‌ها تأثیر می‌پذیرند. اتصالی 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 قطعه داخلی بدون لقی نصب شده بود، نشان داد. در بارگذاری برشی، بارهای شکست اتصالات تحت تأثیر ضخامت رویه بود و خواص هسته نظیر ارتفاع و جهت هسته تأثیر ناچیزی روی بار شکست داشت.

بنیواوینچاکول و همکاران تحلیل عددی و تجربی بر روی قطعات داخلی

مورد استفاده در سازه‌های ساندویچی را انجام دادند [10]. در مورد سازه ساندویچی چرخ‌های هواپیما، نقطه اتصال با استفاده از یک تقویت موضعی که قطعه داخلی نامیده می‌شود، ساخته می‌شود. این قطعه داخلی با رزین ریخته شده در هسته نومکس ساخته می‌شود. آزمون‌های کشش به بیرون^۴ به طور متناوب بر روی قطعه داخلی 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 کماتش برشی هسته) زیاد بودند. آزمایشات نشان داد برای بارهای کمتر اثرات غیرخطی و پسماند^۵ عمدتاً به علت کماتش برشی هسته است. سپس قانون خرابی مدول برشی روی یک مدل المان محدود غیر خطی انجام شد.

تفتگارد، لیستروپ چندین اتصال T- شکل بین سازه‌های ساندویچی که در کاربردهای نیروی دریایی استفاده می‌شوند را مورد بررسی قرار دادند [11]. در طرح موجود سازه‌ها توسط پرکننده^۶ و ورق‌های لایه‌لایه^۷ خارجی که دارای ضخامت مشابه با ورق‌های لایه‌لایه رویه‌ها هستند، به هم متصل شده‌اند. همچنین، مدل‌سازی المان محدود و مقایسه تنش‌ها در شکل‌های مختلف اتصال T انجام شد.

دملیو و همکاران 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 [12]. از داده‌های حاصل از آزمون استاتیکی و خستگی می‌توان ملاحظات 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 استحکام خستگی اتصالات آزمون شده تأثیر داشت.

بوژه ولنایا و همکاران اثرات خمشی موضعی را در مجاورت قطعات داخلی ساندویچ پنل مورد بررسی قرار دادند [13]. 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 برای یک سازه ساندویچی با قطعات داخلی دایره‌ای با خواص الاستیک متفاوت با هسته اصلاح شد. تنش‌های موضعی ایجاد شده در رویه‌ها و هسته به علت وجود قطعه داخلی از طریق روابط تحلیلی ساده بیان می‌شوند. از روش المان محدود جهت اثبات کارآمد بودن مدل تحلیلی استفاده شد و انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و عددی مشاهده گردید. سپس یک قطعه داخلی دایره‌ای در یک پنل ساندویچی عرشه کشتی در نظر گرفته شد و مورد بهینه‌سازی قرار گرفت.

دودکینز و همکاران طراحی اتصالات در سازه‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف را در کشتی مورد بررسی قرار دادند و طرح‌های اتصالات بهینه‌شده که دارای استحکام بالاتر و با وزن کاهش‌یافته می‌باشند، را ارائه دادند [14].

هیمنز، پین رفتار شکست انواع مختلف قطعات داخلی گلدانی یا محفظه‌ای^۸ و اتصالات گوشه را در سازه ساندویچی‌های با هسته لانه زنبوری

⁴ Pull out

⁵ Hysteresis

⁶ Filler

⁷ Laminate

⁸ Potted

¹ Stiffness mismatch

² Co-infused perforated

³ Insert

جدول 1 مشخصات هر یک از اجزاء سازه ساندویچی

اجزاء	جنس
اتصالات	آلیاژ آلومینیوم 6063-T5
رویه فوقانی	کامپوزیت رزین اپوکسی (رزین اکسون- اپولم 2002 با هاردنر اپولم 2002) و الیاف شیشه تک جهته $UD\ 350\ gr/m^2$ با چیدمان $[0/90/0/90/0/90/0]$ با ضخامت 2.6 mm (نسبت رزین به الیاف 60 به 40 درصد وزنی)
رویه تحتانی	کامپوزیت رزین اپوکسی (رزین اکسون- اپولم 2002 با هاردنر اپولم 2002) و الیاف شیشه تک جهته $UD\ 350\ gr/m^2$ با چیدمان $[0/90/0]$ با ضخامت 1.3 mm (نسبت رزین به الیاف 60 به 40 درصد وزنی)
هسته	لانه زنبوری آلومینیومی ($40\ kg/m^3$) با ضخامت دیواره 0.05 mm و اندازه سلول 6 mm و ارتفاع 15 mm

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 سطح³ 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، پس از آماده‌سازی رزین با نسبت وزنی رزین به هاردنر (10:100)، 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 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. به منظور بررسی تکرار پذیری نتایج 5 آزمون بر روی هر گروه از نمونه‌ها انجام گرفت.

3-2- آزمون‌های تجربی

در این تحقیق، آزمون ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌ها طبق شکل 3 در دمای اتاق ($25^\circ C$) و رطوبت نسبی محیط (65%) انجام گرفت. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نمونه آزمون بین دو قاب فلزی (هم



Fig. 3 Low velocity impact test on the specimens with connections type 1 and 2

شکل 3 آزمون ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌های دارای اتصال نوع 1 و 2

نومکس مورد بررسی قرار دادند [15]. آزمون‌های بیرون کشیدن¹ روی قطعات داخلی 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 بیرون²، سلول‌های گلدانی و رویه بالایی در برش دچار شکست شدند و در این آزمون موقعیت قطعه داخلی ناحیه گلدانی تأثیر چشمگیری روی نتایج داشت ولی نوع قطعه داخلی هیچ تأثیری نداشت. در هر دو آزمایش تنش‌های شکست تحت تأثیر 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 نرم‌افزار ال اس داینا انجام شد و نتایج دو روش فوق انطباق خوبی با هم داشتند.

در این پروژه آزمون ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌های شامل دو نوع اتصال فلزی با هندسه‌های متفاوت انجام شد. بعلاوه به منظور شبیه‌سازی رفتار سازه‌های ساندویچی دارای اتصال، مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک نرم‌افزار بر پایه روش المان محدود صورت پذیرفت. با تکیه بر مقایسه نتایج عددی و تجربی، صحت‌گذاری نتایج شبیه سازی نرم‌افزاری انجام گرفت و سپس برای هر دو اتصال، تأثیر افزایش طول و ضخامت بر رفتار اتصال از طریق تحلیل پارامتری با استفاده از مدل المان محدود بدست آمده، مورد بررسی قرار گرفت.

2- تحلیل تجربی

1-1- شکل شماتیک اتصالات

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

2-2- ساخت نمونه‌های آزمون

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا رویه‌های ساندویچ پنل با روش تزریق در خلاء 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

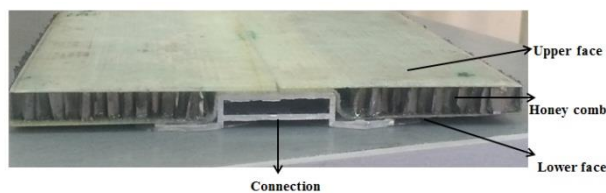


Fig. 1 Schematic Figure of connection type 1

شکل 1 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع اول

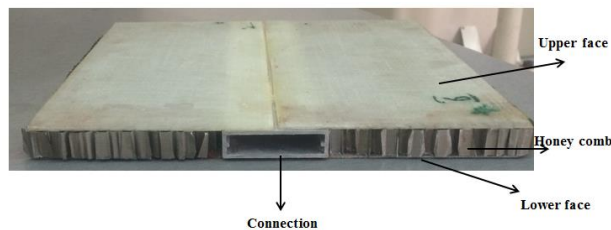


Fig. 2 Schematic Figure of connection type 2

شکل 2 شکل شماتیک نمونه با اتصال نوع دوم

¹ Pull out
² Shear out

³ Etching

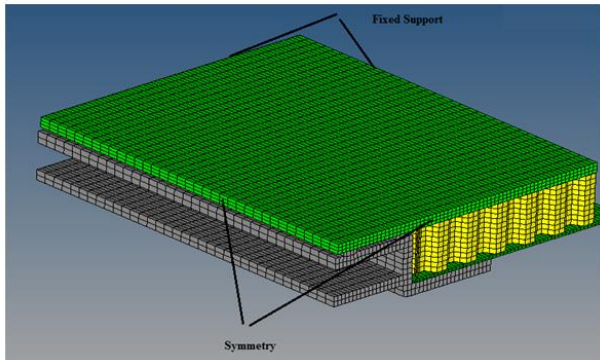


Fig. 5 Boundary conditions for sandwich plates

شکل 5 شرایط مرزی برای ورق‌های ساندویچی

مرزی را برای ورق‌ها نشان می‌دهد. خواص رویه‌های ساندویچ در سه جهت با استفاده از آزمون تجربی بر اساس استاندارد ASTM D638 بدست آمد [16] که برای نمونه، نمودار تنش-کرنش تجربی حاصل از آزمون کشش در راستای 1 و 2 در شکل 6 نشان داده شده است. رویه‌ها در نرم‌افزار، ماده اورتوتروپ³ مدل شدند. رفتار پلاستیک اتصال و لانه زنبوری با استفاده از نمودار تنش-کرنش دو خطی⁴ مدل شد و در نرم‌افزار با ماده پلاستیک-سینماتیک⁵ مدل گردید و خواص آلومینیوم از کلید آلومینیوم استخراج شد [17]. نمودار ماده پلاستیک-سینماتیک در شکل 7 نشان داده شده است. خواص مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی در جدول 2 و خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری در جدول 3 قید شده است.

4- نتایج و بحث

به علت عدم وجود حسگر سرعت در دستگاه آزمون، سرعت ضربه‌زننده از آزمون‌های تجربی در دسترس نبوده و عبارت "سرعت ضربه‌زننده"، قید شده در بندهای زیر، از نرم‌افزار بدست آمده است.

4-1- نمودار نیرو- زمان حاصل از آزمون ضربه سرعت پایین بر روی

نمونه‌های شامل اتصال نوع اول و دوم

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع اول و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی در شکل 8 نشان داده شده است. از بین نمودارهای تجربی بدست آمده از آزمون‌های مشابه، یکی از نمودارها به عنوان شاخص انتخاب گردید و در نمودارها ارائه شد.

مدت زمان کل تماس و مقدار نیروی ماکزیمم و زمان مربوط به آن در جدول 4 قید گردیده است.

نمودار شکل 8 را می‌توان به چهار بخش تقسیم نمود. در ابتدا ضربه بر تمام اتصال وارد نشده و فقط رویه‌های فوقانی با تکیه‌گاه‌های بخش‌های برآمده اتصال (سطوح مشخص شده با رنگ متمایز در شکل 9) ضربه را تا حدی که می‌توانند تحمل می‌نمایند که در نمودار شکل 8 به همان بخش I مربوط می‌شود. سپس رویه‌های فوقانی با فضای خالی زیر خود مواجه شده و یک کاهش ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود. (بخش II). سپس به دلیل آنکه تکیه‌گاه کامل و پیوسته می‌شود و کل اتصال درگیر می‌شود، مجدداً افزایش

از بالا و هم از پایین) قرار داده شد و فقط $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ آن تحت ضربه قرار گرفت و نمونه آزمون و این صفحات توسط چهار گیره به هم محکم شدند.

دو قطعه فولادی با جرم‌های 3.245 kg و 2.712 kg (یعنی جرم کل ضربه‌زننده: 5.957 kg) از ارتفاع 0.5 m بر روی نمونه‌ها ضربه زدند. عکس ضربه‌زننده در شکل 4 نشان داده شده است. قطر ضربه‌زننده 145 mm می‌باشد.

بنابراین انرژی ضربه به صورت رابطه (1) بدست می‌آید:

$$u = mgh = 5.957 \times 9.81 \times 0.5 = 29.22 \text{ J} \quad (1)$$

سرعت ضربه زننده در لحظه ورود به نمونه با روابط (2,3) بدست می‌آید:

$$u = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} 5.957V^2 = 29.22 \quad (2)$$

$$V = 3.1321 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

پس از انجام آزمون ضربه نمودارهای نیرو- زمان استخراج شدند.

لازم به ذکر است که با انرژی ضربه 29.22 J ، رفتار نمونه در ناحیه الاستیک باقی ماند و هیچ گونه خرابی در هیچ یک از اجزاء مشاهده نگردید. با توجه به شکل 3، برخورد بر روی رویه فوقانی انجام شده است و در زیر آن پروفیل آلومینیومی و لانه زنبوری نیز درگیر می‌شوند.

3- تحلیل عددی

در این پروژه یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا برای شبیه‌سازی آزمون‌ها پیشنهاد گردید.

برای انجام تحلیل عددی، پس از ایجاد مدل هندسی در هر یک از حالات، برای ایجاد شبکه، مدل در نرم‌افزار هاپیرمش وارد گردید. لازم به ذکر است که ضربه زننده برای آزمون‌های ضربه نیز به صورت یک استوانه صلب در نظر گرفته شد که با سرعت اولیه 3.1321 m/s بر نمونه ضربه زد.

به منظور کاهش تعداد المان‌ها و کاهش زمان حل، با استفاده از تقارن، فقط $1/4$ ورق مدل و قیود تقارن اعمال گردید. شبکه مربعی دوبعدی برای لانه زنبوری ایجاد گردید و برای سایر اجزاء شبکه هشتوجهی سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت (لانه زنبوری، دو بعدی¹ و بقیه اجزاء سه بعدی² مدل شدند).

بر روی دو سطح خارجی رویه‌های بالا و پایین، قید گیردار و بر روی دو سطح داخلی آن‌ها قید تقارن اعمال گردید.

شرایط تماس اتصال گره به سطح بین لانه زنبوری و رویه‌های فوقانی و تحتانی و اتصال با رویه‌های فوقانی و تحتانی اعمال گردید. شکل 5 شرایط

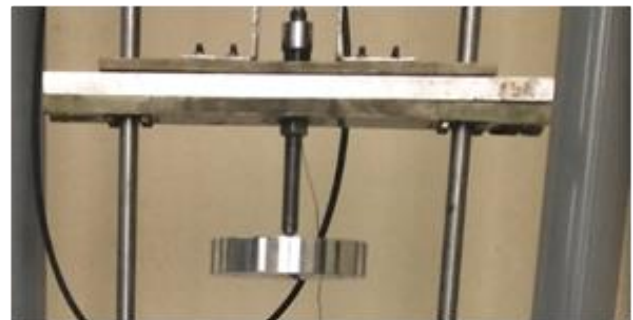


Fig. 4 Photo of the projectile

شکل 4 عکس ضربه‌زننده

³ MAT_Orthotropic_Elastic

⁴ Bilinear

⁵ MAT_Plastic_Kinematic

¹ Shell

² Solid

جدول 3 خواص مکانیکی اتصالات و لانه زنبوری

Table 3 Mechanical properties of honeycomb and connections

اجزاء	جنس	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	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

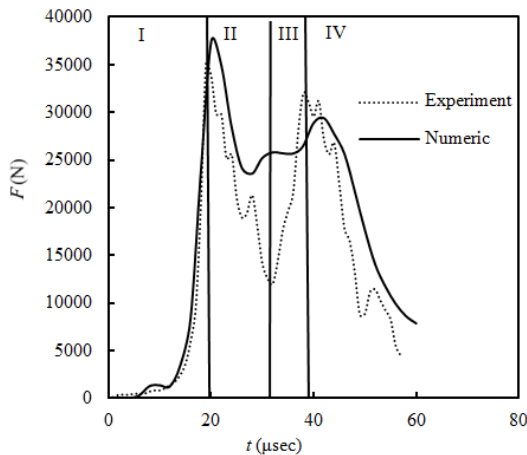


Fig. 8 Force- time curve from low velocity impact test on specimen type 1 and comparison with the results from numerical study

شکل 8 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع اول و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی

جدول 4 مدت زمان کل تماس و مقدار نیروی ماکزیمم و زمان مربوط به آن برای اتصال نوع اول

Table 4 Contact duration time and the maximum force and its corresponding time for connection type 1

زمان مربوط به نیروی ماکزیمم (μsec)	نیروی ماکزیمم (N)	مدت زمان کل تماس (μsec)	مقدار میانگین آزمون‌ها
21	34377.595	54.5	مقدار میانگین آزمون‌ها
20	37466.016	60	ال اس داینا
-4.62%	+8.98%	+10.1%	درصد اختلاف نتیجه ال اس داینا با مقدار متوسط تجربی

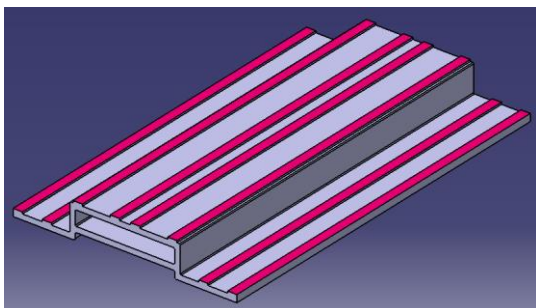


Fig. 9 Raised faces on the connection type 1

شکل 9 سطوح برآمده روی اتصال نوع 1

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع دوم و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی در شکل 10 نشان داده شده است.

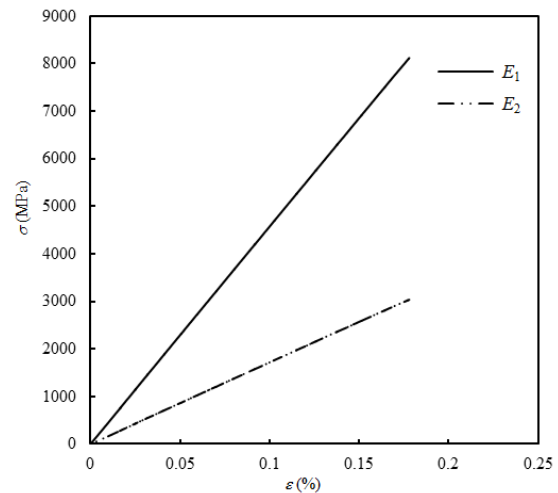


Fig. 6 Stress- strain curve resulted from tensile test of skins in direction 1 and 2

شکل 6 منحنی تنش- کرنش ناشی از آزمون کشش رویه‌ها در جهت 1 و 2

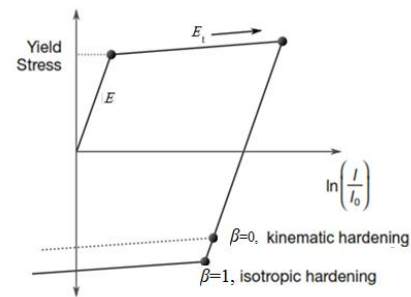


Fig. 7 Elastic-plastic behavior with kinematic and isotropic hardening where l_0 and l are un deformed and deformed lengths of uniaxial tension specimen. E_t is the slope of the bilinear stress strain curve.

شکل 7 رفتار الاستیک- پلاستیک با سخت‌شدگی ایزوتروپ و سینماتیک که در آن l_0 و l طول تغییرشکل یافته و تغییرشکل نیافته نمونه کشش تک محوره می‌باشد. E_t شیب منحنی تنش-کرنش دو خطی است.

جدول 2 خواص مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی

Table 2 Mechanical properties of GRP

مقدار	خاصیت
1540	چگالی (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)

در نیرو مشاهده می‌شود (بخش III) و در نهایت با صفر شدن سرعت ضربه‌زننده در نقطه پیک بین بخش III و بخش IV، در بخش IV کاهش نیرو به علت برگشت (خروج) ضربه‌زننده دیده می‌شود.

لازم به ذکر است که افت و خیزهای موضعی موجود در نمودار تجربی شکل 8 مربوط به نویزهای ایجادشده به علت ماهیت آزمایش ضربه می‌باشد.

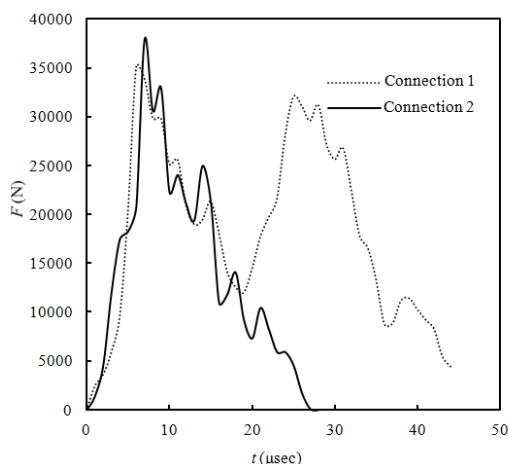


Fig. 11 Force- time curve from low velocity impact test on specimens type 1 and type 2

شکل 11 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق‌های شامل اتصال نوع اول و دوم

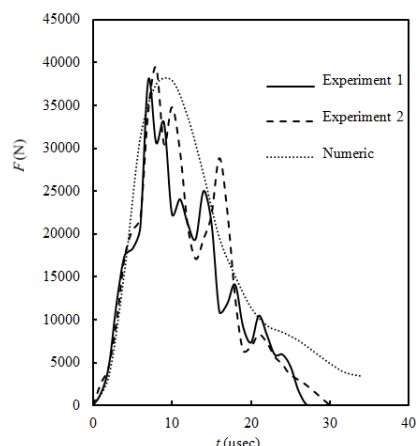


Fig. 10 Force- time curve from low velocity impact test on specimen type 2 and comparison with the results from numerical study

شکل 10 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع دوم و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی

جدول 6 مقایسه عملکرد دو نوع اتصال تحت ضربه سرعت پایین

Table 6 Comparison between the performance of the two connections under low velocity impact test

انصال نوع اول	انصال نوع دوم	
0.1	0.353	جرم (kg)
28	44	مدت زمان کل تماس (μsec)
37948.7	35136.99	نیروی ماکزیمم (N)
261715.17	99538.2	نیروی ماکزیمم در واحد جرم (N/kg)
7	6	زمان مربوط به نیروی ماکزیمم (μsec)
22.44	17.98	جذب انرژی (J)
154.76	50.93	جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)

دارای اتصال نوع اول می‌باشد علت این امر را می‌توان بالاتر بودن ممان دوم سطح در اتصال نوع دوم و مقاومت خمشی بیشتر این اتصال دانست. با توجه به اینکه وزن اتصال نوع دوم کمتر از اتصال نوع اول می‌باشد، در بارگذاری دینامیکی و در محدوده الاستیک، استفاده از اتصال نوع دوم پیشنهاد می‌گردد.

5- تحلیل پارامتری

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

برای تحلیل پارامتری روی ضخامت، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر، مقدار پارامتر ضخامت، در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار 0.25 mm افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو- زمان استخراج شدند. برای تحلیل پارامتری روی طول، با ثابت نگهداشتن ابعاد دیگر، مقدار پارامتر طول در پنج مرحله و در هر مرحله به مقدار 5 mm افزایش داده شد و منحنی‌های نیرو- زمان استخراج شدند.

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام بارگذاری ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع اول در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 12 ارائه گردیده است.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت اتصال تأثیر قابل توجهی بر بخش‌های I و II نمودار نیرو- زمان ندارد ولی در بخش‌های III و IV نمودار، با افزایش ضخامت اتصال، مقدار ماکزیمم نیرو افزایش

مدت زمان کل تماس و مقدار نیروی ماکزیمم و زمان مربوط به آن در جدول 5 قید گردیده است.

در لحظه شروع تماس، نیروی تماس صفر است و ضربه‌زننده دارای سرعت اولیه 3.1321 m/s می‌باشد. با نفوذ ضربه‌زننده در هدف، سرعت آن کاهش یافته و نیروی تماس زیاد می‌شود تا نیروی تماس به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن ضربه‌زننده شروع به برگشتن می‌کند. در این مدت زمانی نیروی تماس کاهش می‌یابد و نهایتاً در لحظه جدا شدن ضربه‌زننده از هدف نیروی تماس مجدداً به صفر می‌رسد.

افت و خیزهای موضعی موجود در نمودار تجربی مربوط به نوبزهای ایجادشده به علت ماهیت آزمایش ضربه می‌باشد.

4-2 تفاوت عملکرد دو نوع اتصال در بارگذاری ضربه سرعت پایین

نمودار نیرو- زمان حاصل از آزمون‌های ضربه سرعت پایین دو ورق شامل اتصالات نوع اول و دوم در شکل 11 نشان داده شده است. در جدول 6 مدت زمان کل تماس، نیروی ماکزیمم، زمان مربوط به نیروی ماکزیمم و جذب انرژی برای هر دو نوع اتصال مقایسه گردیده است. مقدار جذب انرژی از تفاضل انرژی‌های جنبشی ضربه‌زننده در ورود به هدف و خروج از هدف محاسبه گردیده است و در محاسبه آن سرعت ضربه‌زننده از نرم‌افزار استخراج گردیده است.

با توجه به اعداد قیدشده در جدول 6، نیروی ماکزیمم نمونه دارای اتصال نوع دوم به مقدار 8% و جذب انرژی آن به مقدار 24.8% بیشتر از نمونه

جدول 5 مدت زمان کل تماس و مقدار نیروی ماکزیمم و زمان مربوط به آن برای اتصال نوع دوم

Table 5 Contact duration time and the maximum force and its corresponding time for type 2 specimens

مدت زمان کل تماس (s)	نیروی ماکزیمم (N)	زمان مربوط به نیروی ماکزیمم (s)	
28.5	38695.27	7.5	مقدار میانگین آزمون‌ها
34	37924.40	10	ال اس داینا
+19.3%	-2%	+33%	درصد اختلاف نتیجه ال اس داینا با مقدار متوسط تجربی

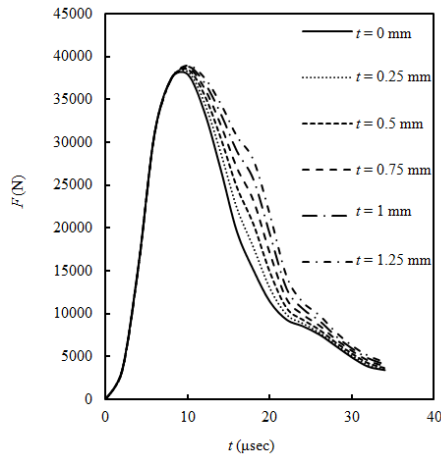


Fig. 13 Force- time curve from low velocity impact test on specimens type 2 in different thicknesses

شکل 13 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع دوم در ضخامت‌های مختلف اتصال

جدول 8 تغییرات جرم و جذب انرژی با افزایش ضخامت اتصال نوع دوم تحت ضربه سرعت پایین

افزایش ضخامت (mm)	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25
جرم اتصال (kg)	0.145	0.162	0.178	0.194	0.209	0.225
سرعت ضربه‌زننده در ورود (m/s)	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321
سرعت ضربه‌زننده در خروج (m/s)	1.5083	1.5011	1.4978	1.4922	1.4896	1.4835
جذب انرژی (J)	22.664222	22.610222	22.587122	22.537222	22.507722	22.4432
جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)	154.78	138.94	126.61	116.42	108.18	100.73

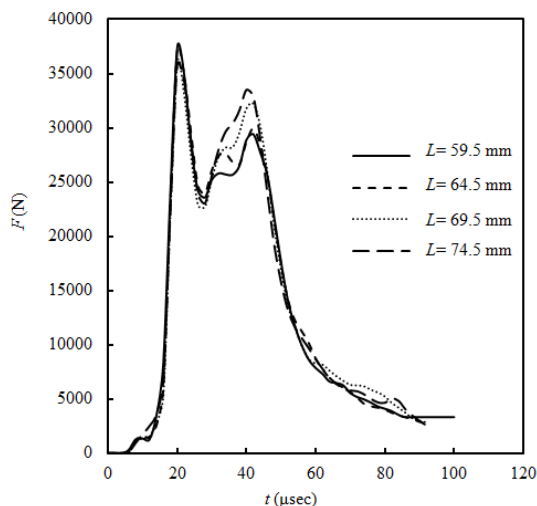


Fig. 14 Force- time curve from low velocity impact test on specimens type 1 in different lengths

شکل 14 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع اول در طول‌های مختلف اتصال

همان‌طور که در شکل 14 دیده می‌شود، افزایش طول اتصال تأثیر قابل توجهی بر بخش‌های I و II نمودار نیرو- زمان ندارد ولی در بخش‌های III و

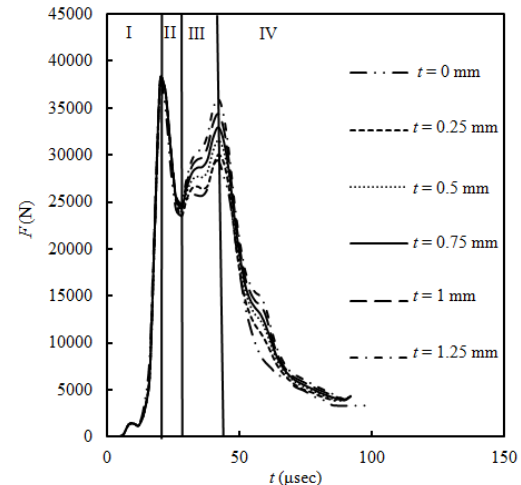


Fig. 12 Force- time curve from low velocity impact test on specimens type 1 in different thicknesses

شکل 12 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع اول در ضخامت‌های مختلف اتصال

می‌یابد. علت این پدیده آن است که در بخش‌های I و II، نیروی ناشی از ضربه عمدتاً توسط رویه‌های کامپوزیتی تحمل شده و در بخش‌های III و IV اتصال هم درگیر می‌شود.

جدول 7 تغییرات جرم و جذب انرژی با افزایش ضخامت اتصال نوع اول تحت ضربه سرعت پایین را نشان می‌دهد. با توجه به اعداد قیدشده در جدول 7، با افزایش ضخامت اتصال، جذب انرژی بیشتر می‌شود. با افزایش 0.5 mm ضخامت، بر جرم اتصال به مقدار 9.34% افزوده می‌شود و جذب انرژی به مقدار 1.744% افزایش می‌یابد.

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام بارگذاری ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع دوم در ضخامت‌های مختلف اتصال، در شکل 13 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت اتصال، حداکثر نیرو افزایش می‌یابد. جدول 8 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش ضخامت اتصال نوع دوم نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول 8 مشاهده می‌شود، با افزایش 0.5 mm در ضخامت اتصال جرم آن به مقدار 22.75% و جذب انرژی آن 0.419% افزایش می‌یابد.

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام بارگذاری ضربه سرعت پایین بر روی نمونه شامل اتصال نوع I در طول‌های مختلف اتصال، در شکل 14 ارائه گردیده است.

جدول 7 تغییرات جرم و جذب انرژی با افزایش ضخامت اتصال نوع اول تحت ضربه سرعت پایین

افزایش ضخامت (mm)	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25
جرم اتصال (kg)	0.353	0.37	0.386	0.405	0.422	0.439
سرعت ورودی ضربه‌زننده (m/s)	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321
سرعت خروجی ضربه‌زننده (m/s)	1.9423	1.9211	1.915	1.8972	1.918	1.9161
جذب انرژی (J)	18.226717	18.226717	18.296418	18.498518	18.262118	18.283818
جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)	50.94	49.26	47.4	45.67	43.27	41.65

جدول 10 تغییرات جرم و جذب انرژی با افزایش طول اتصال نوع دوم تحت ضربه

سرعت پایین

Table 10 Changes of the mass and energy absorption with increasing the length of connection type 2 under low velocity impact

افزایش طول (mm)	20	15	10	5	0
جرم اتصال (kg)	0.185	0.175	0.165	0.155	0.145
سرعت ضربه‌زننده در ورود (m/s)	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321
سرعت ضربه‌زننده در خروج (m/s)	1.6648	1.6384	1.6303	1.6202	1.5083
جذب انرژی (J)	20.9641521	22.38921	30.27521	4.005322	4.4324
جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)	113.319	121.279	129.107	138.068	154.78

اتصال، آزمون‌های ضربه سرعت پایین انجام گرفت. هر دو اتصال از آلیاژ آلومینیوم 6063-T5 ساخته شدند اما هندسه آن‌ها متفاوت بود. اگر چه طول مسیر اتصال در نوع اول اتصال بیشتر می باشد اما در بارگذاری ضربه، حداکثر نیرو و جذب انرژی نمونه دارای اتصال نوع دوم بیشتر از اتصال نوع اول بود. علت این امر آن است که اتصال نوع دوم به علت شکل هندسی خاص خود، دارای قابلیت جذب انرژی بیشتری است و با توجه به اینکه اتصال نوع دوم دارای وزن کمتری نسبت به اتصال نوع اول می باشد، استفاده از اتصال نوع دوم در این نوع بارگذاری پیشنهاد می گردد.

تحلیل پارامتری بر پایه المان محدود نشان داد افزایش ضخامت در هر دو نوع اتصال، جذب انرژی آن‌ها را افزایش می دهد در حالی که افزایش طول منجر به افزایش جذب انرژی در نمونه شامل اتصال نوع اول و کاهش جذب انرژی در نمونه شامل اتصال نوع دوم شده است. ذکر این نکته ضروری است که در هر دو نوع اتصال افزایش ضخامت منجر به افزایش وزن بیشتری نسبت به افزایش جذب انرژی می شود.

7- مراجع

[1] A. R. Pourmoayed, K. MalekzadehFard, M. Shahravi, Buckling and Vibration analysis of a thick cylindrical sandwich panel with flexible core using an improved higher-order theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 227-238, 2017. (in Persian فارسی)

[2] F. Hassanpour Roudbenedh, G. H. Liaghat, H. Sabouri, H. Hadavinia, 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 فارسی)

[3] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. Hossein Pol, 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 فارسی)

[4] M. Safari, H. Biglari, 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 فارسی)

[5] N. Vahdatazad, S. Ebrahimi, G. H. Liaghat, 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 فارسی)

[6] J. Cao, J. L. Grenestedt, Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls, *Composites: Part A*, Vol. 35, No. 9, pp. 1091-1105, 2004.

[7] T. N. Bitzer, *Honeycomb Technology*, 1st edition, pp. 80-97, Netherland, Springer Netherlands, 1997.

[8] K. Niklas, Search for optimum geometry of selected steel sandwich panel joints, *Polish Maritime Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 26-3, 2008.

[9] K. Song, J. Y. Choi, J. H. Kweon, J. H. Choi, K. S. Kim, An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1, pp. 107-113, 2008.

[10] P. Bunyawanichakul, B. Castanie, J. J. Barrau, Experimental and numerical analysis of inserts in sandwich structures, *Applied Composite Materials*, Vol. 12, No. 3, pp. 177-191, 2005.

IV نمودار، با افزایش طول اتصال مقدار ماکزیمم نیرو افزایش می یابد.

جدول 9 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش طول اتصال نوع اول نشان می دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، با افزایش طول، جذب انرژی افزایش می یابد. افزایش 5 mm در طول اتصال منجر به افزایش 4.53% در جرم و افزایش در جذب انرژی به مقدار 0.83% می شود.

نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام ضربه سرعت پایین بر روی نمونه شامل اتصال نوع 2 در طول‌های مختلف اتصال، در شکل 15 ارائه گردیده است.

همان طور که در شکل 15 مشاهده می شود، باافزایش طول اتصال مقدار ماکزیمم نیرو افزایش می یابد.

جدول 10 تغییرات جرم و جذب انرژی را با افزایش طول اتصال نوع دوم نشان می دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، با افزایش 5 mm در طول اتصال، جرم آن 6.89% و جذب انرژی آن 4.6%- کاهش می یابد.

6- نتیجه گیری

در این پروژه دو نوع اتصال ساندویچی در نظر گرفته شد و بر روی هر دو نوع

جدول 9 تغییرات جرم و جذب انرژی با افزایش طول اتصال نوع اول تحت ضربه

سرعت پایین

Table 9 Changes of the mass and energy absorption with increasing the length of connection type 1 under low velocity impact

افزایش طول (mm)	20	15	10	5	0
جرم اتصال (kg)	0.417	0.401	0.385	0.369	0.353
سرعت ضربه‌زننده در ورود (m/s)	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321	3.1321
سرعت ضربه‌زننده در خروج (m/s)	1.8377	1.9025	1.9173	1.9293	1.9423
جذب انرژی (J)	19.1604218	18.4385418	27.01518	13.28617	9.8276
جذب انرژی در واحد جرم (J/kg)	45.94	45.98	47.45	49.14	50.94

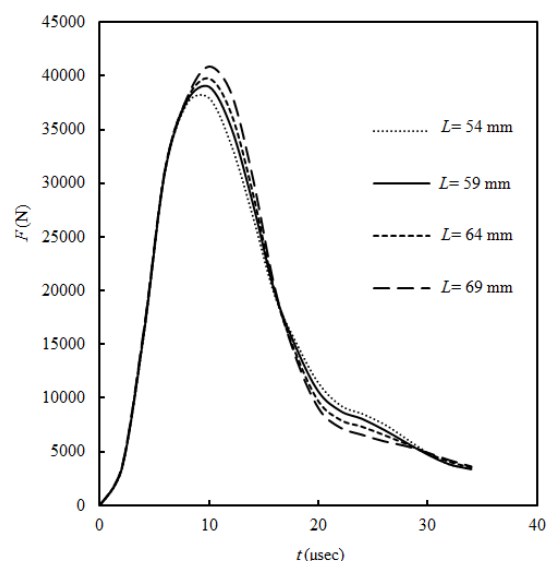


Fig. 15 Force- time curve from low velocity impact test on specimens type 1 in different lengths

شکل 15 نمودار نیرو- زمان حاصل از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ورق شامل اتصال نوع دوم در طول‌های مختلف اتصال

- attachments in FRP ships' structures, *Marine Structures*, Vol. 7, No. 2-5, pp. 365-398, 1994.
- [15] S. Heimbs, M. Pein, Failure behavior of honeycomb sandwich corner joints and inserts, *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 575-588, 2009.
- [16] *ASTM D 638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2016, <https://www.astm.org/Standards/D638.htm>.
- [17] F. Matufi, *Key to Aluminium and Aluminium Alloys*, 1th Eddition, pp. 146-205, Fadak Isatis, 2006. (in Persian فارسی)
- [11] H. Toftegaard, A. Lystrup, Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships, *Composites: Part A*, Vol. 36, pp. 1055-1065, 2005.
- [12] G. Demelio, K. Genovese, C. Pappalettere, An experimental investigation of static and fatigue behavior of sandwich composite panels joined by fasteners, *Composites: Part B*, Vol. 32, No. 4, pp. 299-308, 2001.
- [13] E. Bozhevolnaya, A. Lyckegaard, O. T. Thomsen, V. Skvortsov, Local effects in the vicinity of inserts in sandwich panels, *Composites: Part B*, Vol. 35, No. 6, pp. 619-627, 2004.
- [14] A. R. Dodkins, R. A. Shenoi, G. L. Hawkins, Design of joints and