



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار مکانیکی سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق های موج دار متعامد درهم تنیده و برهم نهاده

محمد رمضانخانی^۱، علی معظمی گودرزی^{۱*}، فتانه مرشدسلوک^۲، سید کمیل هاشمی حیدری^۳، علی حسینی^۱

۱. گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲. گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳. گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

نویسنده مسئول، پست الکترونیک: goudarzi@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2022.313319.2453

چکیده

در این پژوهش استحکام فشاری شبه استاتیکی در دو طرح متفاوت از سازه های ساندویچی با هسته های متشکل از ورق های موج دار دوزنقه ای مورد بررسی قرار گرفته شده است. در یک نمونه، هسته از اتصال دو ورق موج دار متعامد برهم نهاده تشکیل شده است. در نمونه دیگر نیز سازه هسته از ورق هایی تشکیل شده است که طرح آن ها با ترکیبی از سطوح موج دار متعامد درهم تنیده قابل توصیف است. در هر طرح، سه پروفیل موج دوزنقه ای متفاوت مورد بررسی قرار می گیرد. بر اساس هندسه یکی از پروفیل های نام برده، دو نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش نمونه های ساخته شده تحت بار فشاری شبه استاتیکی با نتایج مدل سازی عددی حاصل از تحلیل له شدگی مکانیکی آنها مقایسه شده است. پس از حصول اطمینان از درستی مدل عددی، رفتار مکانیکی چهار طرح دیگر با روش عددی ارزیابی می گردد. بررسی نتایج نشان داد که استحکام نهایی ورق ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج دار درهم تنیده بیشتر از استحکام نهایی ورق در طرح دیگر است. همچنین مشخص شد که در هر طرح استحکام نهایی به هندسه پروفیل موج بستگی دارد. نتایج به دست آمده می تواند در طراحی سازه های سبک با استحکام بالا کاربرد داشته باشند. از اقداماتی که می توان در جهت ارتقاء استحکام نهایی ساندویچ پانل اشاره کرد عبارتند از: استفاده از فوم پلی یورتان که وزن کم ولی استحکام زیادی دارد و یا هندسه سازه تغییر کند.

واژگان کلیدی: استحکام نهایی، سازه ساندویچی، بارگذاری فشاری شبه استاتیکی، ورق های متعامد درهم تنیده، ورق های متعامد برهم نهاده

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



1. مقدمه

سازه ساندویچی از یک هسته با چگالی پایین و دو پوسته خارجی ساخته می‌شود. با توجه به اینکه هسته این‌گونه سازه‌ها می‌تواند از مصالح مختلف و با ساختارهای متنوع از جمله فوم، لانه‌زنبوری، ورق موج‌دار و یا ساختارهای هندسی الهام‌گرفته از طبیعت ساخته شوند، این سازه‌ها بسیار تطبیق‌پذیر بوده و در صنایع مختلف از صنایع بسته‌بندی تا صنایع نظامی به کار گرفته می‌شوند. قابلیت بالای سازه‌های ساندویچی در جذب انرژی باعث می‌شود که برای بارهای خمشی و فشاری با اندازه‌های بزرگ نیز طراحی شوند. کمیت‌های اساسی قابل‌سنجش، برای ارزیابی کیفیت مکانیکی سازه‌های ساندویچی، عموماً شامل استحکام الاستیک و نهایی در بارگذاری‌های خمشی و فشاری هستند. با استناد به این کمیت‌ها، سفتی و ظرفیت تغییر شکل، که می‌توانند به همراه استحکام سازه به‌عنوان معیارهای مکانیکی قابل‌پذیرشی برای ارزیابی ظرفیت جذب انرژی سازه در نظر گرفته شوند، نیز از محاسبات استحکام نهایی قابل‌محاسبه می‌باشند.

از طرفی این سازه‌ها ممکن است در برابر بارهای درون صفحه‌ای و یا خارج از صفحه قرار گیرند. برای سنجش رفتار مکانیکی یک سازه ساندویچی تحت بار فشاری خارج از صفحه، با قرار دادن نمونه‌ای از آن تحت یک جابجایی فشاری افزایشی، نمودار نیرو-جابجایی استخراج می‌گردد. بر اساس این نمودار که نمونه‌ای از آن در شکل (۱) نشان داده شده است، هم‌زمان با افزایش نیروی فشاری وارد بر سازه، تغییر شکل سازه نیز افزایش می‌یابد تا اینکه مقدار آن به محدوده استحکام نهایی می‌رسد. در این شرایط ظرفیت تحمل بار سازه به‌صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. تغییر شکل سازه در استحکام نهایی را ظرفیت تغییر شکل سازه می‌نامند.

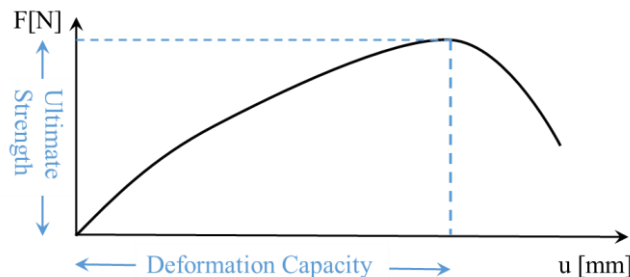
باتوجه به کاربرد روزافزون سازه‌های ساندویچی در صنایع مختلف، پژوهش‌های بسیاری به طراحی و ساخت سازه‌های ساندویچی جدید با عملکرد مکانیکی بهتر در شرایط کاری تعریف شده پرداخته‌اند. سازه‌های ساندویچی با هسته میله‌ای، خرابایی یا کاگوم یکی از این‌گونه سازه‌ها هستند که قابلیت جذب انرژی مکانیکی نسبت به وزن بالایی دارند. بر این اساس، Gao و Sun (2013)، Wang et al. (2010) و Xu et al. (2016) ورق‌های

ساندویچی کامپوزیتی جدیدی با هسته میله‌ای را طراحی کرده و عملکرد آن را تحت بارهای شبه‌استاتیکی به‌صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. برای بررسی قابلیت کمانش و پس از کمانش این‌گونه سازه‌ها، Mahdi و Sebaey (2014) به تحلیل عددی رفتار مکانیکی یک سازه ساندویچی کامپوزیتی با هسته خرابایی تحت بار دو محوره پرداختند و طرحی جدید برای سازه ساندویچی با هسته خرابایی کاگوم ارائه دادند.

نظر به اینکه سازه‌های ساندویچی با هسته میله‌ای به‌صورت چندلایه نیز ساخته می‌شوند تا ظرفیت جذب انرژی مکانیکی آن‌ها افزایش یابد. Xiong et al. (2012) به بررسی استحکام فشاری و عملکرد در مقابل ضربه یک ساختار ساندویچی کامپوزیتی دو لایه با هسته خرابایی پرداختند. آن‌ها با مقایسه سازه‌های ساخته شده با فیبر کربن و فیبر شیشه به این نتیجه رسیدند که سازه‌های ساخته‌شده با فیبر کربن قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند. Li et al. (2021) نیز به بررسی استحکام فشاری سازه ساندویچی چندلایه کامپوزیتی با هسته میله‌ای هرمی شکل با چیدمان مرتبه‌بندی‌شده پرداختند و خصوصیات مکانیکی این‌گونه سازه‌ها با هسته پر شده با فوم و بدون فوم را با یکدیگر مقایسه نمودند. پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که سازه‌های ساندویچی پر شده با فوم قابلیت جذب انرژی بالاتری دارند.

سازه‌های ساندویچی با هسته ورق‌دار نیز گونه دیگری از سازه‌های ساندویچی هستند که در آن‌ها هسته ممکن است به یکی از طرح‌های موج‌دار یا لانه زنبوری شکل داده شده باشد. طرح‌های متنوعی از سازه‌های ساندویچی که در آن‌ها هسته از ورق موج‌دار تشکیل شده است، موضوع مطالعه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از جمله این طرح‌ها که نتایج تحقیقات آن‌ها به تواتر منتشر شده است می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱. ورق‌های موج‌دار با پروفیل موج موازی پوسته‌های خارجی
۲. ورق‌های موج‌دار با پروفیل موج عمود بر پوسته‌های خارجی
۳. ورق‌های موج‌دار برهم نهاده
۴. ورق‌های موج‌دار درهم‌تنیده یا درهم بافته شده
۵. ورق‌های موج‌دار با موج دوچپته



شکل ۱- نمونه‌ای از نمودار نیرو - جابجایی در یک سازه ساندویچی تحت بار فشاری

Fig. 1- Typical force-displacement diagram for a sandwich panel under compressive load

برای سازه ساندویچی چندلایه فولادی با هسته موج‌دار دو جهت ارائه دادند و رفتار آن را تحت بار فشاری مطالعه کردند. با توجه به بارگذاری یکنواخت‌تر در حین فرایند تصادف، در این سازه به این نتیجه رسیدند که این سازه برای جذب انرژی کارایی بالایی دارد. ک. Kılıçaslan et al. (2016) نیز لهیدگی سازه ساندویچی با هسته موج‌دار غیر پیوسته تک لایه و چند لایه را بررسی کردند. Taghizadeh et al. (2021) با استفاده از چیدمان با سختی‌های خمشی متفاوت در لایه‌های مختلف رفتار سازه ساندویچی چند لایه کامپوزیتی را در برابر ضربه سرعت پایین بهبود دادند. Hashemi-Karouei et al. (2020) با استفاده از مدلسازی عددی و حل تحلیلی به بررسی خمش سازه ساندویچی با هسته برهم‌نهاده متعامد در محدوده الاستیک پرداختند. Zhang et al. (2021) استحکام سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری را بررسی کردند و با قراردادن لوله‌های تقویت‌کننده در داخل هسته لانه زنبوری استحکام برخورد آن را افزایش دادند. Li et al. (2019) طرح دیگری از سازه‌های ساندویچی ارائه دادند که در آن، هسته با ترکیب به هم پیوسته‌ای از ورق‌های موج‌دار متعامد درهم‌تنیده قابل توصیف است. آن‌ها، با استفاده از یک روش نمونه‌سازی سریع، نمونه‌ای یکپارچه از جنس پلیمری ساختند که در آن پروفیل موج دوزنقه‌ای بود و رفتار مکانیکی نمونه ساخته‌شده را مورد ارزیابی قرار دادند. Mei et al. (2021) به بررسی استحکام فشاری و مودهای کمانشی هسته کامپوزیتی با شکل X چند لایه با روش آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی پرداختند.

با مطالعه روند تحقیقات انجام شده در پژوهش‌های صورت‌گرفته که بخشی از آن‌ها مورد اشاره قرار گرفته، مشاهده می‌شود که تحقیقات زیادی به طراحی و بهبود استحکام فشاری سازه‌های ساندویچی اختصاص یافته‌اند که هرکدام به فراخور موضوع، بر تعیین هندسه و یا جنس مناسب برای سازه مورد مطالعه تمرکز کرده‌اند. نظر به اینکه تغییر در انتخاب جنس اجزای سازنده و همچنین شیوه اتصال میان آن‌ها، بر رفتار مکانیکی سازه ساندویچی حاصل موثر می‌باشد، با الگو گرفتن از هندسه معرفی شده توسط Li et al. (2019)، سازه ساندویچی فلزی جدیدی، که با توجه به جنس و نوع اتصالات آن در پژوهش‌های قبلی مورد مطالعه قرار نگرفته، طراحی شده و رفتار آن تحت بار فشاری خارج از صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نمونه مورد بررسی به کمک روش‌های متداول ورقکاری قابل ساخت می‌باشد، این در حالی است که طرح ارائه شده در مرجع Li et al. (2019) تنها با استفاده از روش نمونه‌سازی سریع قابل ساخت است. در طرح جدید، نه تنها جنس هسته از پلیمر به فلز بلکه پیوند میان اجزاء آن نیز به اتصالات جوشی تغییر یافته است. (Ramezankhani, 2021, Ramezankhani, 2021) در این پژوهش به بررسی استحکام نهایی سازه‌های ساندویچی فولادی با هسته متشکل از ورق موج‌دار درهم‌تنیده تحت بار

استحکام این دسته از سازه‌های ساندویچی تحت بارگذاری‌های مختلف استاتیکی یا دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در سازه‌های ساندویچی، پوسته‌های خارجی ممکن است به صورت صاف یا خمیده باشند. در این بین، Mamalis et al. (2002) رفتار خرابی و ویژگی‌های جذب انرژی اجزای لوله‌ای ترکیبی سازه ساندویچی با هسته‌های موج‌دار و با پوسته‌های خارجی استوانه‌ای را تحت بارگذاری محوری فشاری شبه‌استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. Chen et al. (2018) نیز به بررسی استحکام سازه استوانه‌ای با هسته لانه زنبوری تحت بار شبه‌استاتیکی پرداختند. Hou et al. (2013) سازه ساندویچی با پوسته‌های خارجی صاف با هسته متشکل از ورق موج‌دار با هندسه دوزنقه‌ای و مثلی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی را با استفاده از دو روش تجربی و عددی مطالعه کردند و پارامترهای پهنه هر دو ساختار ساندویچی استخراج کردند. Jin et al. (2013) و Abedzade Atar et al. (2021) برای افزایش مقاومت سازه ساندویچی کامپوزیتی در برابر جدایی پوسته‌های جانبی و هسته، سازه ساندویچی جدیدی با هسته موج‌دار سینوسی، را ارائه کردند که در آن هسته و ورق‌های جانبی در هم بافته شده‌بودند، و مودهای شکست آن را بررسی کردند. Rejab و Cantwell (2013) تفاوت استحکام و مودهای شکست و رفتار سازه‌های ساندویچی آلومینیومی، پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه و پلاستیک تقویت‌شده با فیبر کربن با هسته موج‌دار را تحت بار فشاری عرضی شبه‌استاتیکی با یکدیگر مقایسه نمودند. Hu et al. (2016) به مطالعه رفتار مکانیکی سازه ساندویچی کامپوزیتی با هسته متشکل از نوارهای موج‌دار درهم بافته شده پرداختند. آن‌ها این سازه را تحت بار شبه استاتیکی برشی، فشاری درون صفحه‌ای و خمشی آزمایش کردند. Garifullin et al. (2021) به بررسی استحکام ورق‌های موج‌دار سینوسی تحت بار خمشی پرداختند و اثر تکیه‌گاه‌های داخلی و ابعاد سازه در ظرفیت تحمل بار خمشی این سازه‌ها را بررسی کردند. Heimbs et al. (2007) استحکام لهیدگی سازه ساندویچی با هسته موج‌دار با طرح اورینگامی ساخته شده از فیبر کربن و آرامید را مورد بررسی قرار دادند. Mahdi و Sebaey (2017) به بررسی جذب انرژی، بیشترین مقدار نیرو و میانگین نیروی لهیدگی برای هسته سلول واحد سازه ساندویچی کامپوزیتی با طرح شبکه‌ای با و بدون فوم پرداختند و هندسه بهتری برای استحکام نهایی و جذب انرژی بیشتر ارائه دادند. Li et al. (2018)، با استفاده از کامپوزیت ساخته شده از فیبرهای طبیعی، سازه ساندویچی کامپوزیتی با هسته متشکل از ورق‌های موج‌دار در هم بافته شده‌ای را طراحی کرده و رفتار مکانیکی آن را تحت بار فشاری خارج از صفحه مورد ارزیابی قرار دادند. Zhao et al. (2018) ساختار هسته جدیدی متشکل از ورق‌های موج‌دار با پروفیل موج عمود بر پوسته خارجی از جنس Ti-6Al-4V ارائه دادند و رفتار آن را تحت نیروی عرضی شبه استاتیکی بررسی کردند. Che et al. (2020) یک طرح جدید

طرح M: سلول واحد با هسته متشکل از ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای برهم‌نهاد (شکل (۲) ب) طرح‌های مورد اشاره به گونه‌ای توصیف شده‌اند که می‌توان با تکرار آن‌ها به عنوان یک سلول واحد در دو راستای متعامد که به موزات محوره‌های صفحات موج‌دار امتداد دارند، یک پانل ساندویچی را تعریف نمود.

برای بررسی تأثیر ابعاد هندسی، سه هندسه برای پروفیل موج‌دار نظر گرفته شده‌است. پروفیل موج توصیف‌کننده هسته‌ی سازه‌های ساندویچی مورد بررسی در جدول (۱) توصیف شده و با پانویس‌های ۳۰، ۴۵ یا ۶۰ معرفی شده‌اند.

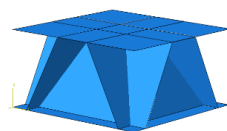
برای مقایسه رفتار مکانیکی سازه‌های مورد مطالعه استحکام نهایی آن‌ها تحت بار شبه استاتیکی خارج از صفحه محاسبه می‌گردد. هسته و پوسته‌های خارجی سازه‌های مورد مطالعه از ورق‌هایی با جنس فولاد ساختمانی ST37 به ضخامت (mm) ۰/۵ ساخته می‌شوند.

در آزمایش فشار خارج از صفحه، دو نمونه بر اساس طرح‌های B30 و M30 ساخته شده‌اند. برای ساخت یک سلول واحد از سازه ساندویچی طرح M30، پس از خمکاری ورق‌های موج‌دار، قطعات حاصله با استفاده از جوشکاری نقطه‌ای مانند شکل (۳) به یکدیگر متصل می‌شوند.

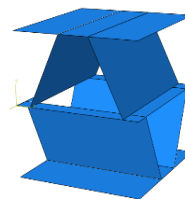
فشاری و مقایسه آن با سازه ساندویچی فولادی با هسته متشکل از ورق موج‌دار برهم‌نهاد به صورت عددی و آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. در راستای تحقق این هدف، دو نمونه با ابعاد کلی برابر طراحی می‌گردد که بتوانند گویای جزئیات دو هندسه مورد بررسی باشند. به این منظور، یک نمونه سلول واحد از پانل ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار درهم‌تنیده و یک نمونه سلول واحد از پانل ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار برهم‌نهاد با استفاده از ورقکاری و اتصالات جوش ساخته شده و تحت بار فشاری خارج از صفحه شبه‌استاتیکی آزمایش می‌شوند. بعد از راستی‌آزمایی مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، استحکام نهایی طرح‌های دیگری که در آن‌ها پروفیل موج متفاوت است، به روش عددی محاسبه و مقایسه می‌شوند.

۲. مواد و روش‌ها

همانطور که در مقدمه ذکر شد، در این پژوهش، رفتار دو نمونه پانل ساندویچی به شرح ذیل تحت بار فشاری خارج از صفحه به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرند. طرح B: سلول واحد با هسته متشکل از ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای درهم‌تنیده (شکل (۲) الف)



(b) طرح M



(a) طرح B

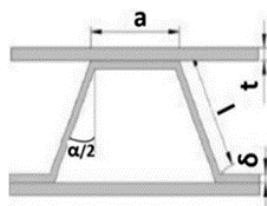
شکل ۲- طرح یک سلول واحد از سازه ساندویچی (a) هسته متشکل از ورق موج‌دار درهم‌تنیده (B) (b) هسته متشکل از ورق موج‌دار برهم‌نهاد (M)

Fig. 2- A unit cell of the sandwich panels, (a) B: one-layered interlocking cross-corrugated core (b) M: two-layered cross-corrugated core

جدول ۱- پارامترهای هندسی پروفیل ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای تشکیل دهنده هسته سازه‌های مورد بررسی

Table 1- Geometric parameters of trapezoidal corrugated core

| $\frac{\alpha}{2}$ | L (mm) | a (mm) | Test specimen |
|--------------------|--------|--------|---------------|
| 30° | 43.3 | 20 | B30 M30 |
| 45° | 31 | 20 | B45 M45 |
| 60° | 25 | 20 | B60 M60 |



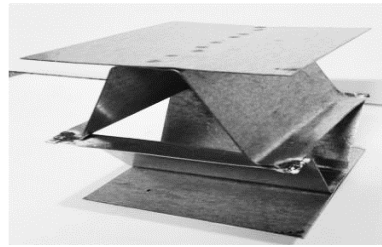
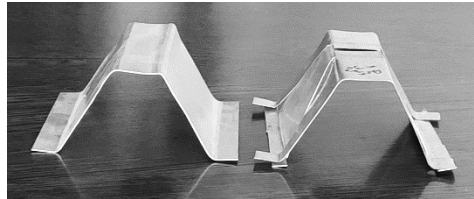
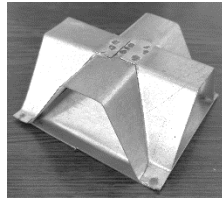


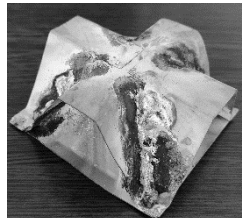
Fig. 3- M30 sandwich structure
شکل ۳- سازه ساندویچی طرح M30



۴(الف) مرحله اول: برش و خم کردن ورق‌های فولادی به هسته‌های موج‌دار
(a) First stage: Cutting and bending the steel sheets into corrugated cores



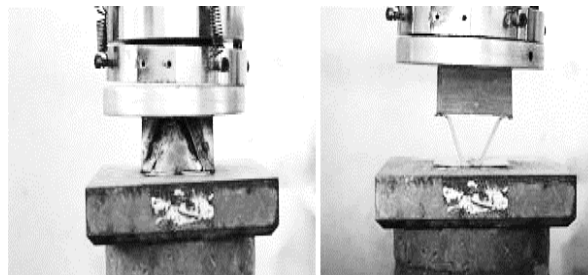
۴(ب) مرحله دوم: مونتاژ قطعه و اتصال با جوش نقطه‌ای
(b) Second stage: Part assembly and connecting by spot welding



۴(ج) مرحله سوم: جوشکاری برنجی
(c) Third stage: Brass welding

شکل ۴- فرایند ساخت سازه‌های ساندویچی B30

Fig 4- The building process of B30 sandwich structure



شکل ۵- ساندویچ پانل‌های B30 و M30 تحت بار فشاری برون صفحه‌ای در دستگاه آزمایش فشار SANTAM
Fig 5- M30 and B30 sandwich structures under quasi static compressive load in SANTAM test machine

ثابت وجود دارد که نمونه آزمایش در بین این دو فک قرار می‌گیرد. بر این اساس نمونه‌های آزمایش تحت بار فشاری تا استحکام نهایی قرار می‌گیرند و نمودار نیرو-جابجایی برای آن‌ها در دمای محیط استخراج شده می‌شود.

نمونه‌های مورد اشاره در جدول (۱) در نرم‌افزار اجزای محدود تجاری آباکوس مدل شده و حل implicit برای شبیه‌سازی استفاده شده است. برای شبکه بندی هسته سازه‌های ساندویچی از المان S3 و برای ورق‌های جانبی از المان S4 به کار رفته و رفتار فولاد به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است. چگونگی مش‌بندی نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (۶) نمایش داده شده است.

شرایط مرزی و بارگذاری برای هر دو طرح M30 و B30 یکسان بوده و در هر دو مورد صفحه زیرین سازه ثابت و صفحه رویین آن، صلب فرض می‌شود. نقطه مرجع روی جسم صلب در راستای عمود بر صفحه رویین با سرعت 5 mm/min رو به پایین جابه‌جا می‌شود و در هر گام از جابه‌جایی، مقدار نیروی فشاری وارده محاسبه می‌شود. (شکل (۷))

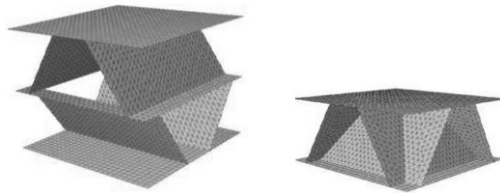
مراحل ساخت سازه ساندویچی طرح B30 در شکل (۴) نمایش داده شده است و به شرح ذیل می‌باشد:

۱- نقشه دو بعدی گسترش داده شده ۴ ورق تشکیل دهنده سازه، در مقیاس ۱:۱ تهیه می‌شود. بر اساس این نقشه، ورق‌های تشکیل دهنده سازه، برش داده شده و به صورت ورق موج دوزنقه‌ای مورد نظر خم‌کاری می‌گردند.

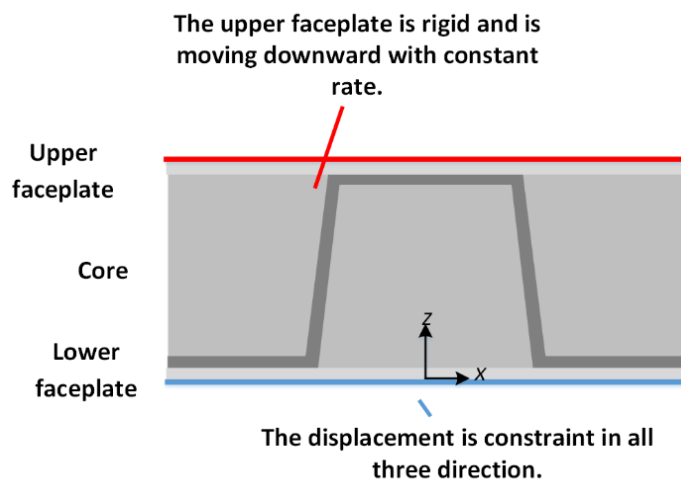
۲- یکی از ورق‌های موج‌دار به عنوان سازه پایه در نظر گرفته شده و به صورت پیوسته ساخته می‌شود. ورق موج‌دار دیگر که عمود بر ورق موج‌دار پایه قرار گرفته است به عنوان تقویت کننده به کار می‌رود. ورق موج‌دار تقویت کننده از سه ورق جدا که در امتداد هم قرار می‌گیرند تشکیل شده است. این ورق‌ها مانند شکل (۴) - ب، در موقعیت‌های مشخص شده، قرار می‌گیرند. سپس با استفاده از جوشکاری نقطه‌ای، موقعیت قطعات نسبت به یکدیگر تثبیت می‌شود.

۳- با استفاده از روش جوشکاری برنجی کل مجموعه حاصل یکپارچه می‌شوند

در آزمایش حاضر، از دستگاه تست فشار SANTAM استفاده شده است (شکل (۵)). در این دستگاه یک فک متحرک و یک فک



شکل ۶- مدل المان محدود برای سلول واحد سازه ساندویچی M30 و B30
Fig. 6- Finite element model of M30 and B30 sandwich structures



شکل ۷- شرایط مرزی در تحلیل استحکام نهایی پانل ساندویچی B
Fig. 7- Boundary conditions of B sandwich structures

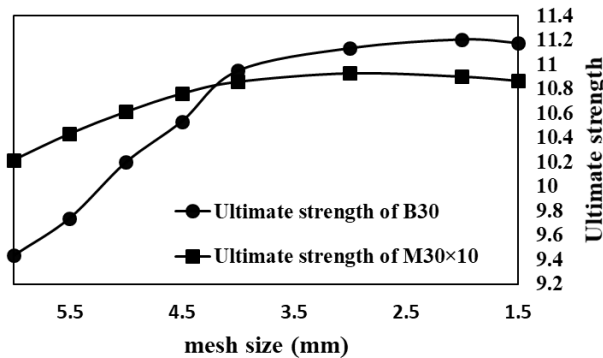
می‌باشد. این در حالی است که در سازه ساندویچی طرح M30 شباهت بین نتایج آزمایش و تحلیل کمتر است. دلیل آن را می‌توان در حساسیت بیشتر آن به دقت در ساخت دانست. زیرا کمترین نقص هندسی اولیه ناشی از ساخت در این سازه می‌تواند مودهای تخریب را تحت اثر قرار دهد.

از طرفی، زمانی که نمونه‌ها ایده‌آل نباشند و تغییرشکل‌های اولیه یا نقص‌های اولیه کوچک داشته باشند، در مراحل ابتدایی تست فشار ممکن است تفاوت‌هایی در شیب نمودار و تغییرشکل‌ها مشاهده شود. این تغییرشکل‌های اولیه در سازه‌های ساخته‌شده با ورق‌های نازک و با استفاده از جوشکاری بیشتر نمایان می‌شوند. لذا در این آزمایش‌ها با وجود اینکه انتظار می‌رود رفتار سازه در مرحله اولیه تا حدودی خطی باشد، سطوح افقی سازه‌ها که دارای انحنا می‌باشند در مراحل اولیه آزمایش فشار شبه‌استاتیکی به صورت یکنواخت تحت بار فشاری قرار نمی‌گیرند. به همین دلیل در مراحل اولیه ممکن است خطا بیشتر باشد. ولیکن با افزایش فشار سازه کاملاً درگیر شده و فشار به صورت یکنواخت به سطوح بالایی و پایینی وارد خواهد شد و پاسخ به محاسبات نمونه ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد بود.

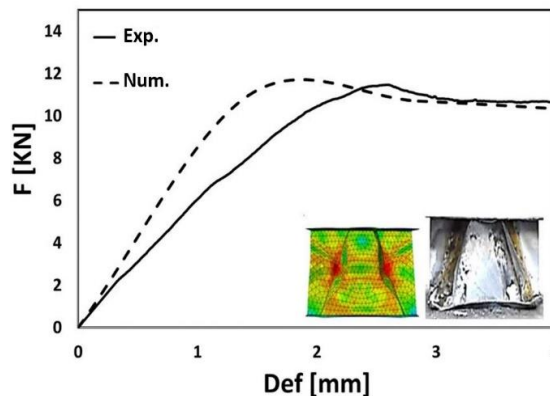
در ادامه تحلیل برای بررسی استقلال از شبکه، مدل ساخته شده برای دو نمونه M30 و B30 ساخته شده با ابعاد مختلف شبکه بندی شدند. مقدار استحکام نهایی استخراج شده در تحلیل برای هر دو این نمونه‌ها در نمودار شکل (۸) داده شده است. مشخص است که در اندازه شبکه بندی کمتر از ۳ میلی‌متر پاسخ‌ها مستقل از شبکه بندی هستند.

۳. نتایج

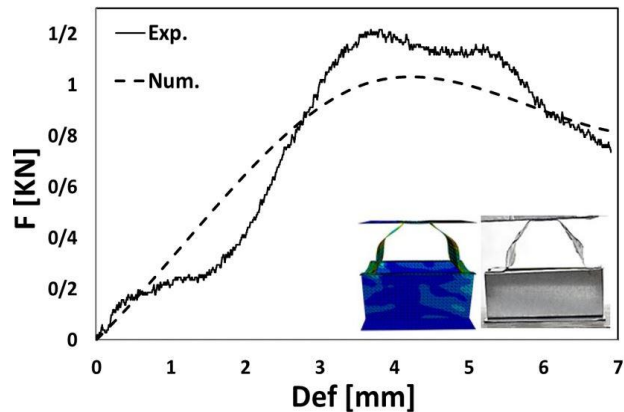
با استخراج نتایج تجربی و مقادیر محاسبه شده شبیه‌سازی عددی، رفتار مکانیکی سازه‌های B30 و M30 در شرایط بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی خارج از صفحه با همدیگر مقایسه می‌شوند. نمودارهای نیرو-جابجایی محاسبه‌شده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین موارد محاسبه شده بر اساس مدل شبیه‌سازی عددی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده‌اند. مطالعه نتایج نشان می‌دهد که در هر مورد با افزایش جابه‌جایی، نیروی فشاری وارد افزایش می‌یابد و با رسیدن نیرو به استحکام نهایی، ظرفیت سازه برای تحمل نیرو کاهش می‌یابد. برای سازه ساندویچی طرح B30، مقایسه نتایج حل عددی با نتایج استخراج شده از آزمایش چنین می‌نماید که روند کلی تغییرات در دو نمودار نیرو جابه‌جایی مشابه



شکل ۸- استقلال مش برای دو سازه‌های ساندویچی B30 و M30
Fig. 8- Mesh independence analysis for B30 and M30 sandwich structures



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی سازه ساندویچی B30
Fig. 9- Force-displacement diagram for B30 sandwich structure



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جاب‌جایی سازه ساندویچی M30

Fig 10- Force-displacement diagram for M30 sandwich structure

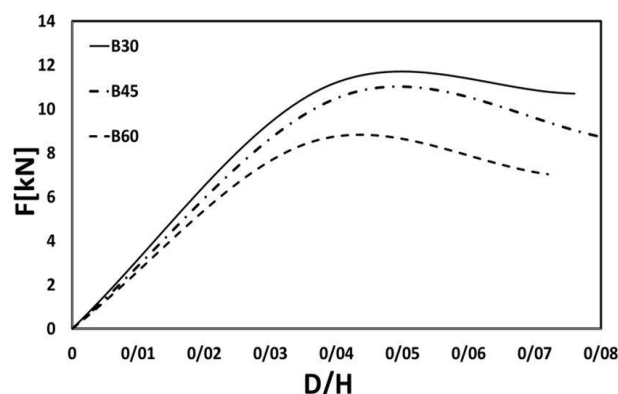
مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی با مقادیر استخراج شده از داده‌های اندازه‌گیری آزمایش انجام شده برای طرح‌های B30 و M30، نشان می‌دهد درصد خطا قابل پذیرش می‌باشد. بر این اساس می‌توان نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در دیگر طرح‌های B45، B60، M45 و M60 را تعمیم داد. نمودار نیرو-جاب‌جایی که با استفاده از تحلیل اجزای محدود، برای طرح‌های نامبرده محاسبه شده‌اند، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

جدول ۲ میزان استحکام نهایی تحت بار فشاری را برای دو سازه ساندویچی مورد بررسی که با روش آزمایشگاهی و اجزای محدود به دست آمده‌اند، نشان می‌دهد. با استناد به جدول ۲ مشاهده می‌شود که در مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مورد آزمایش، میزان خطا در نمونه B30 در حدود ۱/۷ درصد و در نمونه M30 در حدود ۶/۸ درصد می‌باشد. همانطور که پیش از این اشاره شد دلیل خطای بالاتر در نمونه M30 نتیجه حساسیت بالاتر این طرح به خطای ساخت و وجود تکنیکی در هنگام خم شدن ورق‌های سازه دانست.

جدول ۲- اعتبارسنجی و درصد خطای برای سازه‌های ساندویچی M30 و B30

Table 2- Validation of the numerical model for M30 and B30 sandwich structures

| Ultimate strength [kN] | M30 | B30 |
|------------------------|-------|-------|
| Experimental method | 1.17 | 11.4 |
| Numerical Method | 1.09 | 11.6 |
| Error | 6.83% | 1.75% |



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای سازه ساندویچی طرح B

Fig. 11- Force-displacement diagrams for B sandwich structures

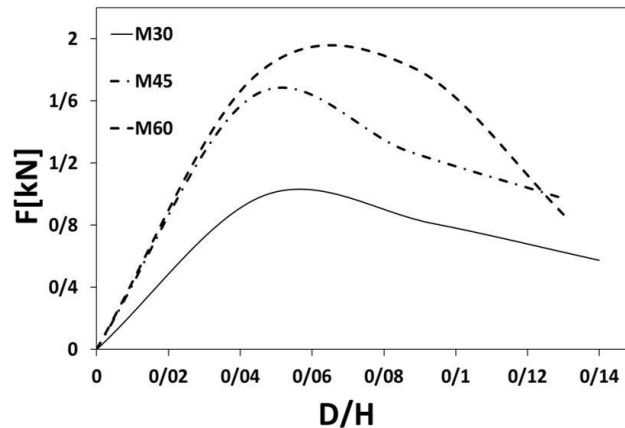


Fig. 12- Force-displacement diagrams for M sandwich structures
 شکل ۱۲- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای سازه ساندویچی طرح M

جدول ۳- مقادیر استحکام نهایی سازه‌های ساندویچی طرح B و طرح M
 Table 3- Ultimate strength of B and M sandwich structures

| $\frac{\alpha}{2}=60^\circ$ | $\frac{\alpha}{2}=45^\circ$ | $\frac{\alpha}{2}=30^\circ$ | استحکام نهایی (kN) |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 8.6 | 10.9 | 11.4 | طرح B |
| 1.96 | 1.7 | 1.17 | طرح M |

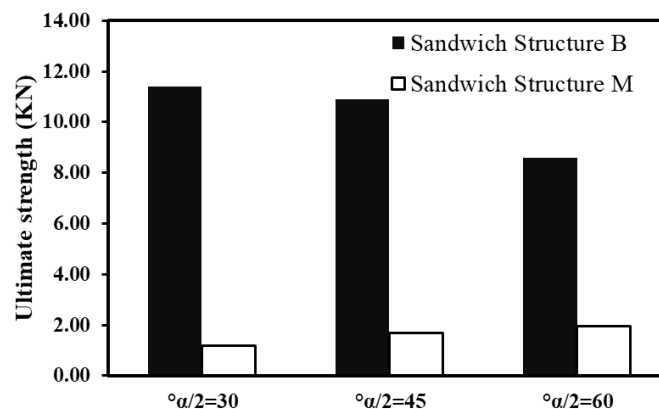


Fig 13- Ultimate strength of M and B sandwich structures
 شکل ۱۳- استحکام نهایی برای نمونه‌های بررسی شده

های ساندویچی نوع M به گونه‌ای برعکس رفتار می‌کند و با افزایش زاویه $\alpha/2$ ، استحکام نهایی افزایش می‌یابد. همچنین در یک زاویه $\alpha/2$ مشخص، سازه ساندویچی طرح B استحکام نهایی بیشتری نسبت به سازه ساندویچی طرح M دارد. این در حالی است که در هر زاویه $\alpha/2$ دو سازه با ابعاد طولی یکسان هم جرم می‌باشند.

همچنین مطالعه توزیع کرنش پلاستیک نشان داده شده در شکل ۸ چنین می‌نماید که در سازه ساندویچی طرح M که یک سازه ساندویچی چند لایه است، استحکام نهایی با استحکام ضعیف

برای استقلال نتایج از ابعاد طولی سازه مورد مطالعه، در ترسیم نمودارهای نشان داده شده در اشکال ۱۱ و ۱۲ از پارامتر بی بعد D/H استفاده شده است که در آن، D اندازه لهدیگی سازه ساندویچی و H ارتفاع کل سازه موردنظر می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای استحکام نهایی طرح‌های B_{60} ، B_{45} ، M_{60} و M_{45} در جدول ۳ ارائه شده است.

همانطور که در نمودار شکل ۱۳ مشخص شده است در سازه های ساندویچی با طرح نوع B با کاهش زاویه $(\alpha/2)$ ، استحکام نهایی افزایش می‌یابد. این در حالی است استحکام نهایی در سازه

سازه طرح B با توجه به وجود دو ورق موج‌دار عمود بر هم که در نقش تقویت کننده هستند نسبت به کمانش بسیار مقاوم است و با افزایش بار فشاری ابتدا در تنها در لبه های آزاد دچار کمانش محلی می شود ولی با توجه به اینکه این لبه ها بار بری بالایی ندارند از استحکام سازه کاسته نمی شود. ولیکن با افزایش بیشتر بار سازه در اتصالات لبه ها و اطراف آن ها دچار تسلیم می شود و بعد از آن با رشد ناحیه پلاستیک دچار کمانش کلی می شود.

ترین لایه هم ارز است و لهیدگی از آن ناحیه از سازه شروع می شود. بر این اساس می توان استحکام نهایی سازه را استناد به استحکام نهایی در هر لایه برآورد نمود. شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ کانتور کرنش پلاستیک در سازه‌های ساندویچی B₃₀، B₄₅ و B₆₀ در نقطه استحکام نهایی را نشان می‌دهند. در سازه طرح B مشخص است که زمانی که ارتفاع هسته بیشتر است مودهای خرابی کمانشی و بعد از آن پلاستیک در کنار هم باعث خرابی می‌شوند. با کاهش ارتفاع هسته مود کمانشی نقش کمتری در خرابی دارد. ناحیه پلاستیک بیشتر می‌شود و تغییر شکل‌های کمانشی کمتر هستند. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ هم کانتور کرنش پلاستیک برای سازه ساندویچی M₃₀، M₄₅ و M₆₀ را نمایش می‌دهند.

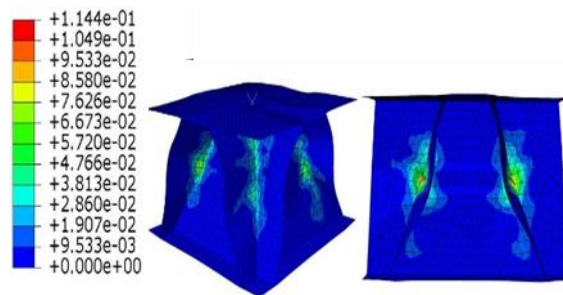


Fig. 14- Plastic strain contour in B30
شکل ۱۴- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی B30

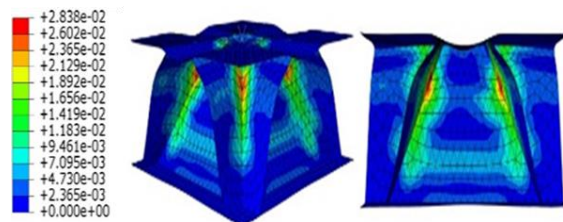


Fig. 15- Plastic strain contour in B45
شکل ۱۵- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی B45

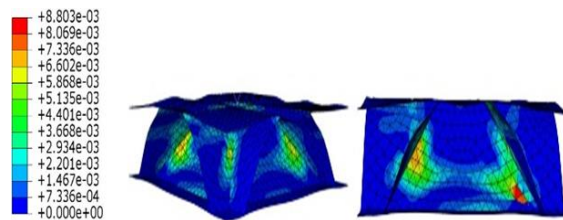


Fig. 16- Plastic strain contour in B60
شکل ۱۶- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی B60

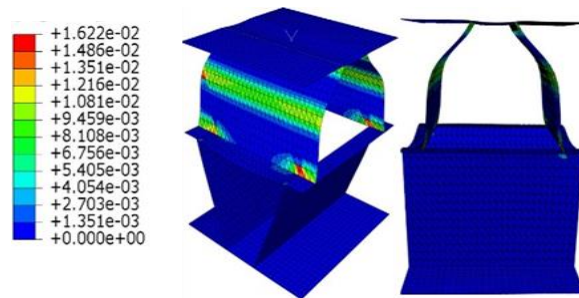


Fig. 17- Plastic strain contour in M30
 شکل ۱۷- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی M30

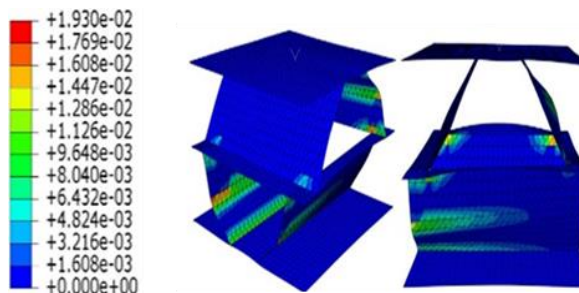


Fig. 18- Plastic strain contour in M45
 شکل ۱۸- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی M45

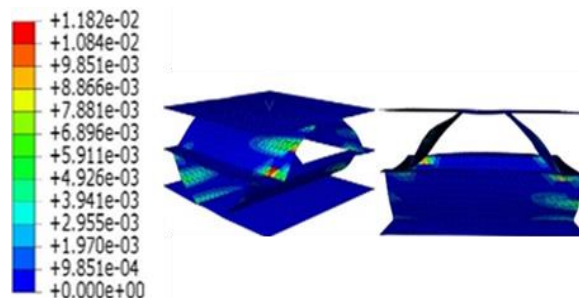


Fig. 19- Plastic strain contour in M60
 شکل ۱۹- کانتور کرنش پلاستیک سازه ساندویچی M60

تغییر شکل یکدیگر را محدود می‌کنند استحکام نهایی سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار درهم‌تنیده بیشتر از استحکام نهایی سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار برهم نهاده (طرح M) می‌باشد، که نشان از بهتر بودن بازدهی و کارایی ساختار درهم‌تنیده نسبت به حالت برهم نهاده می‌باشد.

۳. از طرفی مشخص شد که در سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار درهم‌تنیده مودهای شکست کماتشی و تسلیم با ارتفاع سازه هسته بستگی مستقیم دارد. در حالیکه فروپاشی سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق موج‌دار برهم نهاده در هر سه هندسه با کماتش شروع می‌شود.

۴. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش مشخص شد که؛

۱. استحکام نهایی در سازه ساندویچی با هسته متشکل از ورق های موج‌دار درهم‌تنیده، با کاهش زاویه $(\frac{\alpha}{\rho})$ افزایش می‌یابد و بالعکس استحکام نهایی در طرح دیگر سازه ساندویچی با کاهش زاویه $(\frac{\alpha}{\rho})$ کاهش می‌یابد. چرا که در این دو سازه مود های خرابی با هم متفاوت است. مود خرابی غالب در سازه طرح B تسلیم در اتصالات و اطراف آن ها است در حالیکه در سازه طرح M مود خرابی کماتش ورق های عمودی است که دهنه آزاد تقویت نشده دارند و تحت بار فشاری قرار دارند.
۲. با توجه به اینکه در هسته درهم‌تنیده طرح B دو ورق موج‌دار تشکیل دهنده هسته در نقش تقویت کننده یکدیگر هستند و

References:

- Abedzade Atar, H., Zarrebini, M., Hasani, H. and Rezaeepazhand, J., 2021. Determination of corrugated core sandwich panels elastic constant based on three different experimental methods and effect of structural integrity on flexural properties. *SN Applied Sciences*, 3, pp.1-11. DOI: 10.1007/s42452-021-04424-8.
- Chen, L., Zhang, J., Du, B., Zhou, H., Liu, H., Guo, Y., Li, W. and Fang, D., 2018. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load. *Thin-Walled Structures*, 127, pp.333-343. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.048.
- Che, Q., Xu, P., Li, Z., Ma, W. and Yao, S., 2020. Crashworthiness analysis of a multi-layered bi-directionally corrugated steel plates structure. *Science Progress*, 103(3), p.0036850420950158. DOI: 10.1177/0036850420950158.
- Garifullin, M., Mela, K., Renaux, T., Izabel, D., Holz, R. and Fauth, C., 2021. Load-bearing capacity of cold-formed sinusoidal steel sheets. *Thin-Walled Structures*, 161, p.107475. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107475.
- Hashemi-Karouei, S.H., Moazemi Goudarzi, A., Morshedsolouk, F. and Ajarostaghi, S.S.M., 2022. Analytical and finite element investigations of the cross-arranged trapezoidal-and sinusoidal-corrugated-cores panels. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(11), pp.1626-1636. DOI: 10.1080/15376494.2020.1834652.
- Heimbs, S., Middendorf, P., Kilchert, S., Johnson, A.F. and Maier, M., 2007. Experimental and numerical analysis of composite folded sandwich core structures under compression. *Applied Composite Materials*, 14, pp.363-377. DOI: 10.1007/s10443-008-9051-9.
- Hou, S., Zhao, S., Ren, L., Han, X. and Li, Q., 2013. Crashworthiness optimization of corrugated sandwich panels. *Materials & Design*, 51, pp.1071-1084. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.086.
- Hu, Y., Li, W., An, X. and Fan, H., 2016. Fabrication and mechanical behaviors of corrugated lattice truss composite sandwich panels. *Composites Science and Technology*, 125, pp.114-122. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.02.003
- Jin, F., Chen, H., Zhao, L., Fan, H., Cai, C. and Kuang, N., 2013. Failure mechanisms of sandwich composites with orthotropic integrated woven corrugated cores: experiments. *Composite Structures*, 98, pp.53-58. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.09.056.
- Kılıçaslan, C., Odacı, I.K. and Güden, M., 2016. Single-and double-layer aluminum corrugated core sandwiches under quasi-static and dynamic loadings. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18(6), pp.667-692. DOI: 10.1177/1099636215603692.
- Li, H., Ge, L., Liu, B., Su, H., Feng, T. and Fang, D., 2020. An equivalent model for sandwich panel with double-directional trapezoidal corrugated core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 22(7), pp.2445-2465. DOI: 10.1177/1099636219837884.
- Li, S., Feng, Y., Wang, M. and Hu, Y., 2018. Mechanical behavior of natural fiber-based bi-directional corrugated lattice sandwich structure. *Materials*, 11(12), p.2578. DOI: 10.3390/ma11122578
- Li, S., Yang, J.S., Schmidt, R., Wu, L.Z. and Schröder, K.U., 2021. Compression and hysteresis responses of multilayer gradient composite lattice sandwich panels. *Marine structures*, 75, p.102845. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102845.
- Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Kostazos, P.K. and Papapostolou, D.P., 2002. Axial collapse of hybrid square sandwich composite tubular components with corrugated core: numerical modelling. *Composite structures*, 58(4), pp.571-582. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00166-6.
- Mei, J., Tan, P.J., Bosi, F., Zhang, T., Liu, J.Y., Wang, B. and Huang, W., 2021. Fabrication and mechanical characterization of CFRP X-core sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 158, p.107144. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107144.
- Rejab, M.R.M. and Cantwell, W.J., 2013. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels. *Composites Part B: Engineering*, 47, pp.267-277. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.10.031.
- Ramezankhani, M., Moazemi Goudarzi, A., Hassani, A. and Hashemi Heidari, S.K., 2020. In: *The 17th National Conference and the 6th International Conference on Construction and Production Engineering*. Investigation of energy absorption and ultimate strength of two sandwich panels with interlocked corrugated

- core with full and non-welded on inclined edges. Tehran. (In Persian).
- Ramezankhani, M., Moazemi Goudarzi, A., Hassani, A. & Hashemi Heidari, S.K., 2021. In: *The 29th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers and the 8th Conference on Thermal Power Plants*. Investigation of energy absorption in two sandwich structures with cross corrugated interlocked core of trapezoidal profile and two-layered cross corrugated core, 2021, Tehran. (In Persian).
- Sebaey, T.A. and Mahdi, E., 2017. Crushing behavior of a unit cell of CFRP lattice core for sandwich structures' application. *Thin-Walled Structures*, 116, pp.91-95. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.016.
- Sebaey, T.A. and Mahdi, E., 2014. Behavior of pyramidal lattice core sandwich CFRP composites under biaxial compression loading. *Composite structures*, 116, pp.67-74. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.05.014.
- Sun, Y. and Gao, L., 2013. Mechanical behavior of all-composite pyramidal truss cores sandwich panels. *Mechanics of Materials*, 65, pp.56-65. DOI: 10.1016/j.mechmat.2013.06.003.
- Taghizadeh, S.A., Naghdinasab, M., Madadi, H. and Farrokhhabadi, A., 2021. Investigation of novel multi-layer sandwich panels under quasi-static indentation loading using experimental and numerical analyses. *Thin-Walled Structures*, 160, p.107326. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107326.
- Wang, B., Wu, L., Ma, L., Sun, Y. and Du, S., 2010. Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core. *Materials & Design (1980-2015)*, 31(5), pp.2659-2663. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.061.
- Xiong, J., Vaziri, A., Ma, L., Papadopoulos, J. and Wu, L., 2012. Compression and impact testing of two-layer composite pyramidal-core sandwich panels. *Composite Structures*, 94(2), pp.793-801. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.09.018.
- Xu, G.D., Yang, F., Zeng, T., Cheng, S. and Wang, Z.H., 2016. Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams. *Composite Structures*, 138, pp.342-351. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.057.
- Zhang, Y., Yan, L., Zhang, C. and Guo, S., 2021. Low-velocity impact response of tube-reinforced honeycomb sandwich structure. *Thin-Walled Structures*, 158, p.107188. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107188.
- Zhao, Z.Y., Han, B., Wang, X., Zhang, Q.C. and Lu, T.J., 2018. Out-of-plane compression of Ti-6Al-4V sandwich panels with corrugated channel cores. *Materials & Design*, 137, pp.463-472. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.05.



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Experimental and Numerical Study of Sandwich Structures with Bidirectional and Multilayer Cross Corrugated Core

Mohammad Ramezankhani ¹, Ali Moazemi Goudarzi ^{1*}, Fattaneh Morshedsolouk ²,
Seyed Komeil Hashemi Heidari ³, Ali Hassani ¹

1. Department of Applied Design Department, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Tehran, Iran.
2. Department of Marine Engineering, Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Tehran, Iran.
3. Department of Structural and Earthquake Engineering, Civil Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Tehran, Iran.

*Corresponding author Email: goudarzi@nit.ac.ir

Received: 03 November 2021

Revise Date: 08 February 2022

Accepted: 07 May 2022

DOI: 10.22113/JMST.2022.313319.2453

Abstract:

In this paper, the quasi-static compressive strength of two different sandwich structure designs in which cores consist of trapezoidal corrugated panels is investigated. In one design, the core consists of a cross-corrugated multilayer structure, while in the other design the core is consists of two interlocking bidirectional cross-corrugated panels. For each design, three different trapezoidal wave profiles are studied and one of them is constructed and tested. The results of specimens' crushing tests under quasi-static compressive loads are compared with the numerical modeling results. Afterward, the mechanical behavior of the other four designs is evaluated numerically. The results showed that the ultimate strength of the sandwich structures with an interlocked corrugated core is higher than the ultimate strength of the other design. It was also found that, in a given design, the ultimate strength depends on the corrugation profile geometry. These results can be used in the design of high-strength light-weight structures. Measures that can be taken to improve the ultimate strength of sandwich panels include the use of polyurethane foam, which is light in weight but has high strength, or the geometry of the structure be changed.

Key words: Ultimate strength, Sandwich Structures, Quasi static compressive loading, Interlocked cross corrugated plates, multilayer cross corrugated plates.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

