Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 648-656

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی فشردگی شبه استاتیک بر روی سازه‌های ساندویچی پر شده از فوم تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده

فاطمه حسن پور رودبنه[1]، غلامحسین لیاقت[*2]، هادی صبوری[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-141، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 شهریور 1395
پذیرش: 04 آذر1395
ارائه در سایت: 08 دی 1395

کلید واژگان:
سازه ساندویچی
فوم پلی‌اورتان
بارگذاری متمرکز
بارگذاری گسترده

چکیده

در این مقاله سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی و نیز، پر شده از فوم به صورت شبه استاتیک تحت بارگذاری فشاری متمرکز و گسترده به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های ساندویچی از رویه‌های آلومینیومی و لانه زنبوری از جنس آلومینیوم 5052-H38 تشکیل شده است. فوم مورد استفاده برای پر کردن سازه لانه زنبوری، فوم پلی‌اورتان با چگالی 137.13 kg/m^3 می‌باشد. آزمایش شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده در بارگذاری متمرکز با نفوذکننده سرتخت به قطر 10 میلی‌متر با استفاده از دستگاه یونیورسال انجام شده است همچنین آزمایش‌های شبه استاتیک با بارگذاری گسترده نیز با این دستگاه انجام شد. در این نوع بارگذاری نیرو به تمام سطح سازه به طور یکنواخت وارد می‌شود و نرخ جابجایی برای هر دو نوع بارگذاری 2 mm/min در نظر گرفته شده است. هدف از این بررسی تأثیر ماده پرکننده در میزان جذب انرژی و شکل تخریب سازه ساندویچی بوده است و همچنین مقایسه این دو نوع بارگذاری در پنل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم می‌باشد. نتایج آزمایش شبه استاتیک در هر دو نوع بارگذاری نشان می‌دهد که ماده پرکننده اثر بسزایی در افزایش انرژی جذب شده دارد. فوم پلی‌اورتان به عنوان ماده پرکننده سازه لانه زنبوری مورد استفاده در هسته پنل ساندویچی باعث افزایش 6% و 29% انرژی جذب شده ویژه سازه ساندویچی با هسته پر شده از فوم پلی‌اورتان نسبت به سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی به ترتیب در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده شده است.

Experimental Investigation of foam filled Sandwich Panels in Concentrated and Distributed Compressive loading

Fatemeh Hassanpour Roudbeneh[1], Gholamhossein Liaghat[1*], Hadi Sabouri[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-141, Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 September 2016
Accepted 24 November 2016
Available Online 28 December 2016

Keywords:
Sandwich structure
Polyurethane foam
Concentrated loading
Distributed loading

ABSTRACT

In this paper, concentrated and distributed compressive loading quasi-static tests were conducted on sandwich structures with empty and foam filled honeycomb core. The sandwich structure used in this research was formed by aluminum plate and aluminum 5052 honeycomb structure. Foam used to fill the honeycomb structure was polyurethane foam with a density of 137.13 kg / m^3.Concentrated loading quasi-static tests were performed by flat ended penetrator with a diameter of 10 mm and universal machine. Also, distributed loading quasi-static tests were carried out by universal machine. In distributed loading, force is applied uniformly to the entire structure surface. Displacement rate was 2 mm/min for both types of loading. The purpose of this paper was to study the filler material effect on energy absorption and destruction shape of sandwich structure, as well as comparison of the two types of loading in unfilled and foam filled honeycomb core sandwich panels. The results of quasi-static tests showed that filler material has positive effects on increasing energy absorption in both concentrated and distributed loading. Polyurethane foam as filler material of honeycomb structure used in sandwich panel core increases specific absorbed energy of sandwich panel with foam filled core proportional to empty honeycomb core sandwich panel structure in concentrated and distributed loading by 6% and 29% respectively.

1- مقدمه

امروزه جذب انرژی و جاذب‌های انرژی در همه علوم مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است. کاهش خطرات ناشی در ضربه‌ها یک هدف مهم است که در سایه بررسی جاذب‌های انرژی به این مهم می‌توان دست یافت. جاذب‌های انرژی سیستم‌هایی هستند که کل انرژی جنبشی یا بخشی از آن را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند. جاذب‌های انرژی در حالت کلی به دو نوع بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر دسته‌بندی می‌شوند [1]. جاذب‌های انرژی انواع بسیار مختلفی را دارا می‌باشند که ساختارهای ساندویچی یکی از آن‌ها

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
F. Hassanpour Roudbeneh, Gh. Liaghat, H. Sabouri, Experimental Investigation of foam filled Sandwich Panels in Concentrated and Distributed Compressive loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 648-656, 2016 (in Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ساندویچ پنل‌ها را می‌توان اینگونه تعریف کرد که ساختاری سبک و مرکب دارند که از دو طرف به دو لایه محدود شده است و در وسط آن یک هسته سبک و ضخیم با شکل‌ها و جنس‌های مختلف قرار دارد. در یک پنل ساندویچی تحت بارگذاری استاتیکی، خمش اعمال شده به سازه توسط رویه-ها و برش توسط هسته تحمل می‌شود [2]. ساندویچ پنل‌ها، سازه‌هایی هستند که وزن کم و در عین حال استحکام بالایی دارند و در واقع سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشند. علی‌رغم سبکی فوق‌العاده ساندویچ پنل‌ها، این سازه‌ها مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر انواع بارهای فشاری و ضربه-ای دارند. این پنل‌ها نیروی وارده را به خوبی جذب کرده و مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند [3]. ساندویچ پنل‌ها باتوجه به نوع کاربردی که دارند تحت بارگذاری‌های مختلفی قرار می‌گیرند. این بارگذاری‌ها ممکن است پیش‌بینی‌شده یا پیش‌بینی نشده باشند. به‌عنوان مثال، بارهای وارد بر کفی ساندویچی یا دیواره‌های داخلی هواپیماها یا قطارهای مسافربری جدید تا حد زیادی مشخص و پیش‌بینی شده هستند؛ اما بارگذاری‌هایی همچون برخورد پرندگان یا گلوله‌های تگرگ و یا اصابت سنگ‌ریزه‌ها به بدنه هواپیما، پیش-بینی نشده می‌باشند.

هسته ساندویچ پنل سازه‌ای با چگالی کم و ضخامت زیاد می‌باشد. تکنیک انتخاب مواد برای تقسیم‌بندی هسته ساندویچ پنل به صورت زیر می-باشد:

1. هسته‌هایی با مواد طبیعی خالص
2. هسته‌هایی با مواد ساخته شده مصنوعی
3. هسته‌های ترکیبی

ساندویچ پنل‌ها با هسته‌هایی از مواد طبیعی خالص: این نوع هسته‌ها از مواد طبیعی موجود در طبیعت ساخته می‌شوند. به عنوان مثال یکی از معروف-ترین و پرکاربردترین این مواد چوب بالسا می‌باشد.

ساندویچ پنل‌ها با هسته‌هایی از مواد ساخته شده مصنوعی: این نوع هسته‌ها به دو قسمت شبکه منظم (مانند لانه زنبوری‌ها و خرپایی‌ها می‌باشد که دارای سلول‌های منظم هستند) و شبکه نامنظم (مانند فوم‌های فلزی یا غیرفلزی) تقسیم می‌شوند.

ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های ترکیبی: این مدل ساندویچ پنل‌ها در واقع ترکیبی از دو مدل گفته شده است. به صورتی که ساندویچ پنل‌ها با هسته سلول‌های منظم و یا هسته شبکه‌ای را با ماده‌ی پرکننده ایجاد کنند. در این حالت ساندویچ‌ها خصوصیات مکانیکی ویژه‌ای را کسب خواهند کرد و این امر باعث استفاده آن‌ها در شرایط مورد نیاز خاص می‌شود.

در این پژوهش هم از هسته‌هایی با شبکه منظم (لانه زنبوری) و همچنین هسته ترکیبی (سازه کندویی و فوم پلی‌اورتان) استفاده شده است.

استفاده اصلی از لانه زنبوری در کاربردهای سازه‌ای است. لانه زنبوری سازه‌ای با قابلیت بالا می‌باشد و علاوه بر کاربردهای سازه‌ای می‌تواند در بسیاری از کاربردهای دیگر مانند جاذب انرژی، هدایت کننده جریان هوا، صوتی، حرارتی و برای محافظ فرکانسی رادیویی استفاده شود[4].

سازه‌های لانه زنبوری استفاده شده در این مقاله به وسیله فوم پر شده است، تا اثر این ماده پر کننده در میزان جذب انرژی و همچنین تغییرات خواص سازه لانه زنبوری مشاهده شود.

با گسترش فوم‌ها، روند استفاده از آنها در همه زمینه‌ها نیز بسط پیدا کرد، یکی از کاربردهای فوم‌ها پر نمودن سازه‌های جدار نازکی است که از دیر باز به عنوان جاذب‌های انرژی مناسبی به کار می‌رفت. محققین بسیاری این سازه‌ها را بررسی و اعلام نمودند که انرژی جذب شده در سازه‌های پر شده از فوم، از مجموع انرژی فوم و سازه‌های جدار نازک توخالی بیشتر است. اثر متقابل بین سازه‌های جدار نازک و فوم‌ها جهت تعیین انرژی جذب شده پارامتر مهمی محسوب می‌شود.

فوم جسمی است که از دو فاز مختلف گاز و جامد تشکیل شده است در واقع فوم‌ها از توزیع یکنواخت یک فاز گازی در یک فاز مایع یا جامد تشکیل می‌شوند (که هر فاز می‌تواند یکی از سه حالت ماده باشد). بنابراین حفرات موجود در آنها به طور کامل توسط فاز مایع یا جامد محصور شده‌اند و به هم مرتبط نیستند. فوم‌ها به دو دسته بزرگ فلزی و غیر فلزی (پلیمری) تقسیم می‌شوند. یکی از فوم‌های غیر فلزی فوم‌های پلی‌اورتان هستند که در این بررسی از این مدل فوم‌ها استفاده شده است [6,5].

پلی‌اورتان‌ها ترکیباتی هستند که در ساختار آنها پیوند اورتانی وجود دارد. پلی‌اورتان (PU) نام عمومی پلیمرهایی است که دارای پیوند اورتانی می‌باشند. پیوند اورتانی از طریق واکنش افزایشی بین یک گروه ایزوسیانات و یک ترکیب دارای هیدروژن فعال مثل گروه هیدروکسیل تشکیل شده است. گروه‌های ایزوسیانات به شدت واکنش‌پذیر بوده و به همین علت پیشرفت واکنش آنها نیاز به افزایش دما ندارد. واکنش در دمای محیط صورت می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی این گروه از پلیمرها تشکیل ساختاری پایدار پس از واکنش است [7].

سازه‌های لانه زنبوری به خاطر خواص منحصربفرد خود از سال‌ها پیش موضوع تحقیقات گروهی از محققین بوده است. مقالاتی که در این زمینه در دسترس است، نشان می‌دهند که حداقل از چهل سال پیش بررسی خواص و رفتار لانه زنبوری در اثر بارگذاری‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است [4] و این بررسی‌ها تاکنون نیز ادامه دارد که این امر نشان‌دهنده اهمیت موضوع می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر تحقیقات تجربی، عددی و تئوری روی این سازه‌ها به عنوان هسته سازه‌های ساندویچی هم به صورت خالی و هم به صورت پر شده با مواد پر کننده انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات به صورت زیر است:

گری و همکارانش [8] مطالعه‌ای تجربی را روی سازه‌های کندویی آلومینیومی برای بررسی رفتار لهیدگی آنها در بارگذاری‌های ضربه‌ای با استفاده از دستگاه هاپکینسون صورت دادند که مشخص گردید لهیدگی سازه‌های کندویی فقط در حالت بارگذاری خارج از صفحه (عمود بر صفحه) متاثر از نرخ بارگذاری می‌باشد و این تاثیر حداکثر برابر 40 درصد و افزایشی می‌باشد. همچنین مشخص گردید که اختلاف مقدار افزایش تنش جاری شدن در حالت‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی علت افزایش مقاومت به لهیدگی سازه کندویی نیست. سیبیود و همکارانش [9] سازه‌های کندویی مورد استفاده در بدنه ماهواره‌ها را به صورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. در این مطالعه آنها سازه‌ها را در برخورد با پرتابه‌ها به صورت عمودی، و مایل با زوایای مختلف مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصل شده برای سرعت حد بالستیک با نتایج به دست آمده از رابطه کریستوفرسن مطابقت قابل قبولی داشت. هو و همکارانش [11,10] بارگذاری ضربه‌ای و شبه‌استاتیکی سازه‌های کندویی را به صورت ترکیب بارهای فشاری و برشی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی که با استفاده از دستگاه هاپکینسون فشاری صورت گرفت، نمونه‌ها تحت بارگذاری در زوایای مختلف قرار گرفتند. این بررسی به روش عددی نیز انجام شد. در این پژوهش مشخص گردید که اعمال بارهای ترکیبی، یعنی بار محوری به همراه بار برشی، تأثیر بسزایی در رفع نیروی حداکثر اولیه و کاهش مقاومت لهیدگی اهداف دارد. همچنین مشاهده شد که

www.SID.ir

Archive of SID

دو کمیت مذکور برای حالت دینامیکی همواره بیشتر از حالت شبه‌استاتیک می‌باشد. به علاوه مطالعه عددی انجام شده مطابقت خوبی در مدهای تغییر شکل و منحنی‌های نیروی فشاری و لهیدگی با آزمون‌های انجام شده داشت و مشخص گردید که مقاومت محوری لانه زنبوری ها افزایش می‌یابد و نیروی برشی در بار ترکیبی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. آکای و همکارانش [12] سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری نومکس و فوم را در حالت‌های مختلف برای درک بهتر رفتار بدنه هواپیماها در اثر برخورد اجسام خارجی مورد مطالعه قرار دادند. این بررسی به منظور مطالعه چگونگی تغییر شکل سازه‌های ساندویچی، به خصوص هسته سازه، در هنگام برخورد انجام گردید. در این بررسی مشخص گردید که در برخوردهای سرعت پایین مساحت سطح ناحیه صدمه دیده در صفحه جلویی تقریباً هم اندازه مساحت سطح مقطع پرتابه می‌باشد؛ مگر در نمونه‌های با ضخامت بالا. همچنین وجود هسته باعث افزایش مقاومت صفحات استفاده شده در دو طرف در مقابل انتشار ترک و در نتیجه باعث بالا رفتن مقاومت سازه ساندویچی در مقابل برخورد می‌شود. راین و همکارانش[13] طی مطالعه جامعی که به صورت تجربی انجام گرفت عملکرد سازه‌های ساندویچی دارای هسته لانه زنبوری و پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربنی را که کاربرد فراوانی در ساخت بدنه ماهواره‌ها دارد با استفاده از یک دستگاه تفنگ گازی انجام دادند. رابطه تجربی ارائه شده توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی عملکرد بالستیک سازه‌های ساندویچی دارا می‌باشد. همچنین رابطه داده شده قابلیت پیش‌بینی عملکرد یک صفحه آلومینیومی قرار گرفته در پشت سازه ساندویچی، که می‌تواند معرف یکی از سیستم‌های داخلی ماهواره باشد، را نیز دارا می‌باشد. السید و همکارانش [14] به بررسی تئوری و تجربی تأثیر پر کردن قسمت کندویی سازه‌های ساندویچی در افزایش مقاومت آنها پرداختند. آنها در این مطالعه ویژگی‌های الاستیک و تغییر شکل پلاستیک را بین حالت توخالی و توپر در حالت بارگذاری در صفحه و خمش عمود بر صفحه مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که کیفیت بهبود خصوصیات سازه ساندویچی به استحکام ماده پرکننده و خصوصیات هندسی لانه زنبوری وابسته است. علوی‌نیا و همکارانش [15] تأثیر پر کردن سازه‌های کندویی آلومینیومی با فوم را در پاسخ این سازه‌ها به بارهای محوری به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی تأثیر عواملی همچون اندازه سلول، ضخامت دیواره سلول و ضخامت پنل لانه زنبوری بر روی تنش میانگین لهیدگی، قابلیت جذب انرژی و طول موج خمش‌های ایجاد شده در سلول‌ها پس از بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفته است. چانگ و واس [16] رفتار یک صفحه هانی کامب از جنس پلی کربنات تحت بارگذاری استاتیکی در جهت موازی با صفحه سازه را مورد بررسی قرار دادند. تست‌های تجربی بر روی سازه انجام و سفتی لانه زنبوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. وو و جیانگ [17] تحقیقات خود را بر روی لانه زنبوری انجام داده‌اند، دستگاه واردکننده نیرو دارای صفحه تماس می‌باشد که به جای وارد کردن نیروی متمرکز بر هانی کامب، نیروی گسترده در کل صفحه هانی کامب وارد می‌سازد. لانه زنبوری‌ها در 6 نمونه متفاوت از دانسیته و ابعاد مورد بررسی قرار گرفته است. نیک نژاد و همکارانش [18] رابطه‌ای برای محاسبه نیروی لحظه‌ای چین‌خوردگی برای ستون تک سلولی مربعی زیر بار محوری ارائه دادند. اساس این رابطه، تعریف و تحلیل سازو کار اساسی چین‌خوردگی و محاسبه نیروی متوسط چین‌خوردگی است. لیاقت و سرایلو [19] به بررسی طراحی بهینه هسته در سازه‌های لانه زنبوری تحت بار فشاری پرداختند. در این تحقیق پارامترهای هندسی و وزن بهینه برای دو مقطع شش ضلعی و چهار ضلعی محاسبه و وزن بهینه ناشی از آنها مقایسه شد. حسن‌پور و همکارانش [21,20] به صورت تجربی آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیک و آزمایش‌های بالستیک بر روی ساندویچ پنل‌ها با هسته لانه زنبوری پر شده با فوم را مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی از سه نوع فوم پلی‌اورتان با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت استفاده شده است. فوم پلی‌اورتان در هسته لانه زنبوری باعث افزایش استحکام در این سازه شده است و با افزایش چگالی فوم سرعت حد بالستیک، انرژی جذب شده بالستیکی و انرژی جذب شده شبه استاتیکی در سازه ساندویچی افزایش یافته است.

تحقیقات زیادی روی سازه لانه زنبوری چه به عنوان هسته سازه ساندویچی و چه به صورت پنل بدون رویه، تحت بارگذاری‌های مختلفی انجام شده است. در اغلب پژوهش‌های انجام شده بررسی تئوری و عددی سازه‌های ساندویچی و سازه‌های لانه زنبوری مورد توجه بوده و برای صحت نتایج با بررسی تجربی مقایسه شده‌اند. اما بررسی تجربی به صورت دقیق و جامع بر روی شکل تخریب این سازه‌ها، تفاوت در نوع بارگذاری‌ها و همچنین پر نمودن سازه لانه زنبوری با فوم و قرار دادن آن به عنوان هسته در سازه ساندویچی تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده مورد توجه قرار نگرفته است.

در این مقاله سازه‌های ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری خالی و پر شده با فوم پلی‌اورتان به صورت شبه استاتیکی تحت بارگذاری فشاری متمرکز و گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر ماده پر کننده لانه زنبوری در میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و همچنین تفاوت این دو بارگذاری در شکل تخریب و میزان انرژی ویژه مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- مواد و ساخت نمونه

2-1- مواد اولیه

سازه ساندویچی از دو رویه و یک هسته تشکیل شده است در این مقاله نیز سازه ساندویچی از رویه‌های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم تشکیل شده است. بنابراین اجزای مورد استفاده در این تحقیق عبارتنداز:

- ورق آلومینیومی که به عنوان رویه در سازه ساندویچی استفاده شده است.
- سازه لانه‌زنبوری
- فومی که لانه زنبوری به وسیله آن پر شده است.
- رزین که باعث اتصال رویه به هسته شده است.

ورق آلومینیومی استفاده شده در این پژوهش آلومینیوم 1200 اراک است که ضخامت آن 0.5 میلی‌متر می‌باشد (شکل 1). خواص فیزیکی و مکانیکی ورق آلومینیومی استفاده شده در مرجع [22] آمده است.

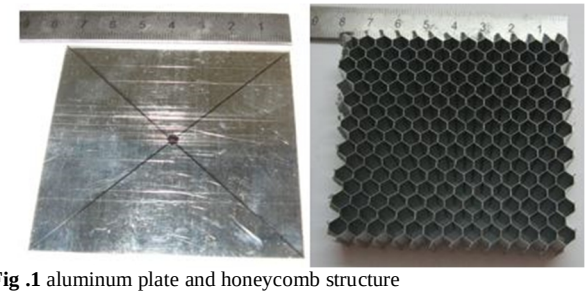

Fig .1 aluminum plate and honeycomb structure

شکل1 ورق آلومینیومی و سازه لانه زنبوری

لانه زنبوری استفاده شده از جنس آلومینیوم 5052-H38 می‌باشد. این نوع

www.SID.ir

Archive of SID

لانه زنبوری به روش کرکره‌ای ساخته شده است (شکل 1). ویژگی‌های این نوع آلومینیوم و همچنین ابعاد لانه زنبوری مورد استفاده نیز در مرجع [22] آمده است.

فوم انتخاب شده در این مقاله فوم پلی‌اورتان بود که از دو جزء پلی و ایزو تشکیل شده است. فوم پلی‌اورتان استفاده شده دارای کد Poly 501-SKC (فوم یخچالی) و چگالی $137.13\ kg/m^3$ می‌باشد.

رزین استفاده شده محصول کارخانه شل می‌باشد که از دو جزء اپوکسی CY219 و سخت کننده HY5161 تشکیل شده که با نسبت وزنی دو به یک ترکیب شده است.

2-2- ساخت سازه‌های ساندویچی خالی و پر شده با فوم

با توجه به ابعاد فیکسچر باید سازه‌های لانه زنبوری در اندازه‌های 75 × 75 میلی‌متر مربع برش داده شوند. برای این کار به صورت معمول (برش زدن به کمک اره یا دستگاه‌های برش) نمی‌توان عمل کرد، چرا که دیواره لانه زنبوری بسیار ظریف و مچاله‌شونده است. بنابراین شیوه برش زدن آن متفاوت می‌باشد. ابتدا ظرفی در ابعاد سازه‌های لانه زنبوری تهیه شد. لانه زنبوری داخل ظرف قرار داده شد و داخل ظرف تا جایی که روی سازه لانه زنبوری کاملاً پوشانده شود آب ریخته شد. سپس ظرف داخل یخچال قرار گرفت تا آب به همراه لانه زنبوری داخل آن یخ بزند. پس از انجماد کامل آب داخل لانه زنبوری می‌توان به راحتی و بدون ایجاد مچالگی در نقاط دیگر سازه برش زد. برش زدن سازه‌های لانه زنبوری یخزده با استفاده از اره نواری (فلکه‌ای) انجام شد (شکل 2).

پس از برش زدن لانه زنبوری به تعداد مورد نیاز نوبت به پر کردن این سازه می‌رسد. از آنجا که واکنش انجام شده جهت تولید فوم گرمازا است و پس از واکنش، فوم به بدنه ظرف می‌چسبد باید از ظرفی یکبار مصرف استفاده گردد؛ چرا که ظرف در برش زدن فوم و حذف اضافات فوم از بین خواهد رفت. از این رو در اینجا از ظروف طلقی که در ابعاد نزدیک به نمونه ساخته شده‌اند استفاده شده است (شکل 3).

با آماده سازی ظروف طلقی و برش زدن لانه زنبوری پر کردن این سازه توسط فوم آغاز شد. ابتدا دو جزء توسط همزن برقی با هم مخلوط شدند و بعد از آن این ترکیب در ظرف ریخته شد و تا قبل از آغاز انبساط فوم، لانه زنبوری داخل ظرف قرار گرفت. بعد از حداکثر 60 ثانیه فوم منبسط می‌شود. با آغاز انبساط، فوم از میان سلول‌های لانه زنبوری شروع به بالا آمدن کرد. لازم به ذکر است که فوم در هنگام انبساط لانه زنبوری را به بالا میراند. بنابراین باید لانه زنبوری با استفاده از وسیله‌ای به طرف پایین نگه داشته شود تا فوم از میان سلول‌های لانه زنبوری عبور کند و تمام سلول‌ها را به طور کامل پر نماید (شکل 3). باید حداقل 15 دقیقه صبر کرد تا فوم به صورت کامل سخت و خنک گردد.

پس از زمان دادن برای سخت و خنک شدن فوم قسمت‌های زائد فوم از روی نمونه‌ها جدا شد. برای این کار از اره نواری (فلکه‌ای) استفاده گردید. پس از انجام این کار دو طرف نمونه‌ها سمباده زده شد تا در هر دو طرف نمونه‌ها فوم و لانه زنبوری هم‌سطح گردند (شکل 3). البته باید دقت کرد که سمباده زدن دو طرف نمونه‌ها نباید باعث ایجاد خرابی در سطح لانه زنبوری شود، چرا که این امر تأثیر نامطلوبی در آزمایش‌ها ایجاد خواهد کرد.

بعد از ساخت سازه‌های لانه زنبوری پرشده با فوم ساخت سازه‌های ساندویچی صورت گرفت. برای این کار ابتدا ورق آلومینیومی مورد نظر به

Fig.2 Preparation and cutting of honeycomb structures

شکل2 مراحل آماده‌سازی و برش زدن سازه لانه زنبوری

Fig .3 Preparation of sandwich panels filled with foam

شکل3 مراحل آماده سازی ساندویچ پنل پر شده با فوم

ابعاد 75 × 75 میلی‌متر مربع برش داده شد. پس از آن با استفاده از رزین ورق‌های آلومینیومی برش داده شده به لانه زنبوری‌های پرشده با فوم و نیز، خالی از فوم چسبیده شدند (شکل 3).

3- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیک تحت بارگذاری‌های فشاری متمرکز و گسترده در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از دستگاه یونیورسال انجام شد.

شرح کامل شرایط هر یک از آزمایش‌های شبه استاتیک به دو صورت بارگذاری متمرکز و گسترده در زیربخش بعدی توضیح داده شده است.

3-1- آزمایش نفوذ شبه استاتیک با بارگذاری فشاری متمرکز

قبل از شروع آزمایش‌های شبه استاتیک با بارگذاری فشاری متمرکز به وسیله دستگاه یونیورسال، ابتدا باید فیکسچر مناسب برای نمونه‌های ساخته شده طراحی شود و همچنین برای این آزمایش که بارگذاری به صورت متمرکز است، نیاز به نفوذکننده مناسب می‌باشد.

همانطور که در "شکل 4" مشخص است، فیکسچر به شکل مربعی و دارای ابعاد داخلی 50x50 میلی‌متر مربع ساخته شده است. فیکسچر با هشت پیچ M16 در طرفین، به گونه‌ای سفت می‌شود تا شرایط مرزی گیردار در مرزهای نمونه ایجاد گردد و برای جلوگیری از لغزش فیکسچر حین آزمون نفوذ شبه‌استاتیک، دو پیچ M8 در طرفین آن تعبیه شده است تا فیکسچر به میز دستگاه یونیورسال بسته شود. همچنین نفوذکننده مورد استفاده در این

www.SID.ir

Archive of SID

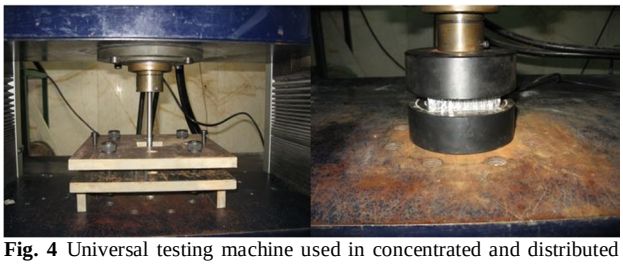

Fig. 4 Universal testing machine used in concentrated and distributed loading quasi-static tests

شکل4 آزمایش شبه استاتیک در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده

پژوهش دارای دماغه تخت با قطر 10 میلی‌متر و استحکام نهایی 1200 مگاپاسگال می‌باشد. نفوذ کننده ساخته شده به گونه‌ای طراحی شده که به دستگاه پیچ شود و مانع هرگونه لغزش و جابجایی به طرفین باشد.

نمونه‌ها در فیکسچر بطور ثابت قرار می‌گیرد و نفوذ کننده به بخش متحرک دستگاه وصل می‌شود و با نرخ جابجایی 2 میلی‌متر بر دقیقه، درون نمونه نفوذ می‌کند. نیروی وارد شده به هدف، توسط لودسل موجود در بالای محل اتصال نفوذ کننده، اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش مذکور بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم انجام شد و تا نفوذ کامل نفوذ کننده درون هر یک از این نمونه‌ها و ثابت شدن نمودار نیرو-جابجایی، ادامه یافت.

3-2- آزمایش نفوذ شبه استاتیک با بارگذاری فشاری گسترده

آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیک با بارگذاری گسترده نیز با دستگاه یونیورسال انجام شد ولی به علت نوع بارگذاری از فیکسچرهای بارگذاری متمرکز نمی‌توان استفاده کرد.

همانطور که در "شکل 4" مشخص است، نمونه‌ها بین دو فک دایره‌ای شکل قرار می‌گیرند. فک پایین ثابت و فک بالا که به لودسل دستگاه متصل است، متحرک می‌باشد. نمونه در فک پایین باید در مرکز، ثابت قرار بگیرد و فک بالا با نرخ جابجایی 2 میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه که روی فک پایین قرار دارد نیرو وارد می‌کند. نیرو به تمام سطح نمونه وارد می‌شود و توسط لودسل اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش نیز بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی و پر شده با فوم صورت گرفت و تا مچالگی کامل هسته ادامه یافت.

4- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شبه استاتیک هم به صورت بارگذاری فشاری متمرکز و هم به صورت بارگذاری فشاری گسترده به شرح زیر می‌باشد.

4-1- شکل تخریب سازه‌های ساندویچی در هر دو نوع بارگذاری فشاری

پس از انجام آزمایش‌های شبه استاتیک با هر دو نوع بارگذاری بر روی هر یک از سازه‌های ساندویچی خالی و پر شده با فوم، به علت نوع بارگذاری شکل تخریب در پنل‌های ساندویچی متفاوت بود.

در بارگذاری متمرکز نفوذکننده به هنگام نفوذ در سازه ساندویچ پنل (با هسته لانه زنبوری خالی یا پر شده با فوم) ابتدا در صفحه رویی آلومینیومی ایجاد پلاگ کرده و سپس وارد هسته شده هم در هسته لانه زنبوری خالی و هم پر شده از فوم سلول‌هایی که زیر نفوذکننده قرار داشتند دچار چین-خوردگی‌های منظم شدند. در صورتیکه اگر سازه لانه زنبوری بدون رویه زیر بار قرار میگرفت به علت ساختار شبکه‌ای آن دچار مچالگی می‌شد و این چین‌خوردگی منظم در آن دیده نمی‌شد. لازم به ذکر است که فوم نیز اثر بسزایی در چین خوردگی‌های منظم در سازه ساندویچی پر شده با فوم دارد. در واقع فوم پلی‌اورتان به علت ترد بودن و قابلیت متراکم شدن بالایی که دارد و همچنین اثر متقابل[1] فوم با دیواره لانه زنبوری سبب شده که سلول-های پر شده درگیر با نفوذکننده زمان بیشتری برای تراکم و چین‌خوردگی منظم داشته باشند. این امر در "شکل 5" قابل مشاهده است.

پس از تخریب هسته، نفوذکننده به هنگام خروج از صفحه پشتی آلومینیومی، با بیرون راندن بخش تخریب شده هسته ایجاد پتال (غنچه شدن) کرده است. پتال در نزدیکی لبه نفوذکننده اتفاق می‌افتد و این شکست نتیجه ممان‌های خمشی و نیروهای برشی در صفحه پوششی پایینی در نمونه می‌باشد.

اما در بارگذاری گسترده به علت نوع بارگذاری و اینکه نیرو در تمام سطح نمونه بطور یکنواخت وارد می‌شود روند تخریب را به گونه‌ای متفاوت از بارگذاری متمرکز تبدیل کرده است. هر دو رویه آلومینیومی تغییر شکل قابل مشاهده‌ای در هر دو نوع پنل ساندویچی نداده‌اند. در واقع در این بارگذاری فقط هسته تخریب شده است. هسته لانه زنبوری خالی و پر شده دچار چین-خوردگی‌های منظم و یکنواخت در تمام سطح نمونه شده است (شکل 6).

با توجه به بحث فروریزی تیوب‌ها که توسط پاگسلی [23] و الکساندر [24] به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است، ضربه محوری لوله‌های جدار نازک دایروی و مربعی بررسی شده است. در واقع هر یک از سلول‌های هسته مورد استفاده در دو پنل ساندویچی در بارگذاری گسترده دچار چین-خوردگی الکساندر شده است. می‌توان اینگونه تشبیه کرد که هر یک از سلول‌های سازه لانه زنبوری حکم یک تیوب شش ضلعی را دارد که تحت بار محوری قرار گرفته است. سازه کندویی به علت ساختار شبکه‌ای و همچنین تشابه هر یک از سلول‌ها به لوله‌های جدار نازک سبب چین‌خوردگی‌های منظم شده است (شکل 7).

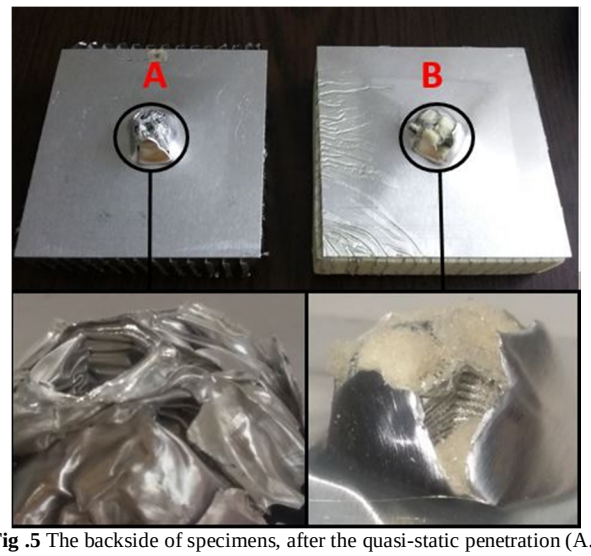

Fig .5 The backside of specimens, after the quasi-static penetration (A. sandwich panel with empty honeycomb core B. sandwich panel filled with foam)

شکل5 تصویر پشت نمونه‌ها بعد از نفوذ شبه استاتیک (A. ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری خالی B. ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری پر شده از فوم)

[1] Interaction

www.SID.ir

Archive of SID

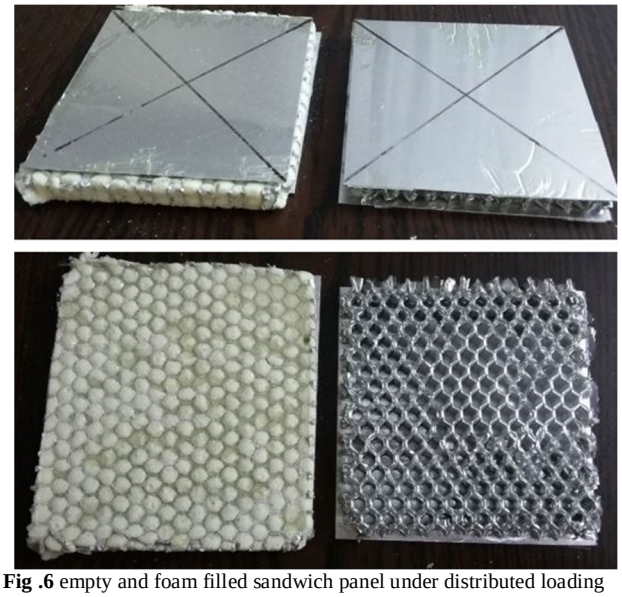

Fig .6 empty and foam filled sandwich panel under distributed loading (from top to bottom, sandwich structures and sandwich panels without face sheet)

شکل6 ساندویچ پنل‌های خالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری گسترده (به ترتیب از شکل‌های بالایی سازه‌های ساندویچی و شکل‌های پایینی ساندویچ پنل‌ها بدون رویه بالایی)

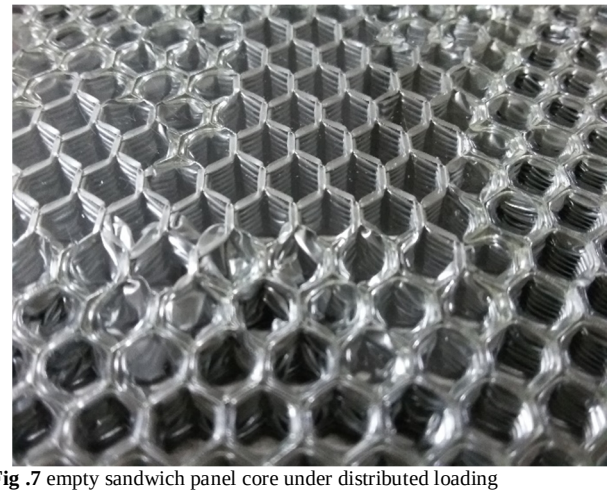

Fig .7 empty sandwich panel core under distributed loading

شکل7 هسته ساندویچ پنل بدون فوم تحت بارگذاری گسترده

4-2- بررسی منحنی‌های بارگذاری متمرکز و گسترده

منحنی‌های نیرو-نفوذ سازه‌های ساندویچی با هسته خالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری متمرکز در "شکل 8" ارائه شده است. در این بارگذاری چون نفوذکننده به صورت مرحله‌ای وارد قسمت‌های سازه ساندویچی می‌شود و آن را تخریب می‌کند، باعث شده است که منحنی‌های مربوط به هر دو سازه ساندویچی مشابه به هم باشند اما سطح زیر نمودار آنها متفاوت می‌باشد. همانطور که در "شکل 8" مشخص است، ماکزیمم اول هر دو نمودار مربوط به نفوذ و سوراخ شدگی رویه بالایی سازه ساندویچی توسط نفوذکننده می‌باشد. خیز نمودار سازه ساندویچی پر شده با فوم در ماکزیمم نیرو بیشتر از سازه ساندویچی بدون فوم است علت این امر بخاطر وجود ماده پر کننده در هسته سازه ساندویچی می‌باشد. در واقع فوم پلی‌اورتان سبب شده است که استحکام و سفتی هسته افزایش یابد. افزایش سفتی سازه ساندویچی، باعث کاهش خیز عمومی آن شده و بیشتر شدن استحکام در هسته نیز سبب شده

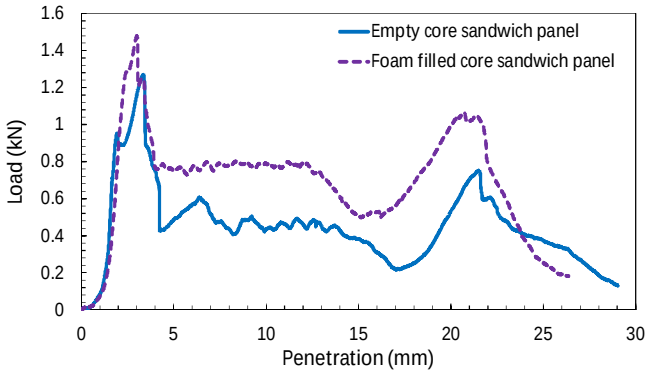

Fig .8 The load-penetration curves of empty and foam filled sandwich panels

شکل8 منحنی‌های نیرو-نفوذ مربوط به ساندویچ پنل خالی و پر شده با فوم

است که زیر رویه بالایی در سازه پر شده با فوم تکیه‌گاه قوی‌تر و مستحکم‌تری نسبت به سازه بدون فوم به هنگام نفوذ، نفوذکننده وجود داشته باشد. افت نمودار نشان دهنده جدایش موضعی رویه بالایی و هسته می‌باشد. این افت تا جایی ادامه دارد که نفوذ کننده به هسته رسیده است. پس از آن افت و خیزهای کوچکی که در منحنی‌ها ایجاد شده است مربوط به تخریب هسته می‌باشد. به علت وجود فوم در سازه ساندویچی با هسته پر شده از فوم این قسمت از منحنی مربوط به پنل ساندویچی پر شده از فوم بالاتر از حالت بدون فوم می‌باشد، در واقع وجود ساختار فومی باعث افزایش استحکام هسته لانه زنبوری شده و همچنین تقابل دیواره سلول‌های لانه زنبوری با فوم سبب افزایش این استحکام شده است. البته فوم اثر خود را در افزایش استحکام رویه‌ها نیز گذاشته است. همانطور که مشخص است پیک اول سازه ساندویچی پر شده با فوم بالاتر از حالت خالی آن می‌باشد. پس از تخریب هسته، نفوذکننده به همراه بخش‌های کنده شده از هسته و پلاگ کنده شده از رویه بالایی به رویه زیرین فشار وارد می‌کند و سبب جدایش موضعی بین هسته و رویه زیرین می‌شود. پس از ایجاد رفتار سفت شوندگی رویه زیرین، دومین ماکزیمم بزرگ منحنی ایجاد می‌شود. این پیک بیانگر سوراخ شدگی رویه زیرین و ورود نفوذکننده به آن است و در نهایت ایجاد پلاگ در آن است. افت بعد از آن نشان دهنده خروج نفوذکننده از سازه و اصطکاک بین نفوذکننده و لبه‌ی سطح تخریب شده می‌باشد. همچنین فوم پلی‌اورتان نیز سبب افزایش مقاومت رویه زیرین در برابر فشار نفوذکننده شده است که بالاتر بودن پیک مربوط به پلاگ ایجاد شده در سازه ساندویچی با فوم نسبت به بدون فوم بیانگر این موضوع می‌باشد.

در "شکل 9" منحنی‌های نیرو-تغییر شکل مربوط به بارگذاری گسترده برای هر دو سازه ساندویچی با هسته خالی و پر شده از فوم آورده شده است. در این نوع بارگذاری چون نیرو به تمام سطح نمونه بطور یکنواخت وارد می‌شود با حالت بارگذاری متمرکز متفاوت است. در واقع در منحنی‌های مربوط به بارگذاری گسترده تغییر شکل و تخریب مرحله‌ای صورت نمی‌گیرد و کل سازه تحت فشار قرار می‌گیرد. ماکزیمم اول مربوط به این نوع بارگذاری در سازه ساندویچی پر شده با فوم نزدیک به قسمت‌های بعدی این منحنی می‌باشد اما در سازه ساندویچی بدون فوم، پیک اول فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ای با بقیه منحنی دارد. در سازه‌های جاذب انرژی هر چقدر ماکزیمم اول نزدیک‌تر به بقیه منحنی یا بقیه ماکزیمم‌ها باشد، سازه‌ی مناسب‌تر و بهتری است. بنابراین سازه ساندویچی پر شده با فوم که این اتفاق در آن افتاده است، سازه‌ای مناسب و کارآمدتر در بحث جاذب‌های انرژی می‌باشد. فوم علاوه بر

www.SID.ir

Archive of SID

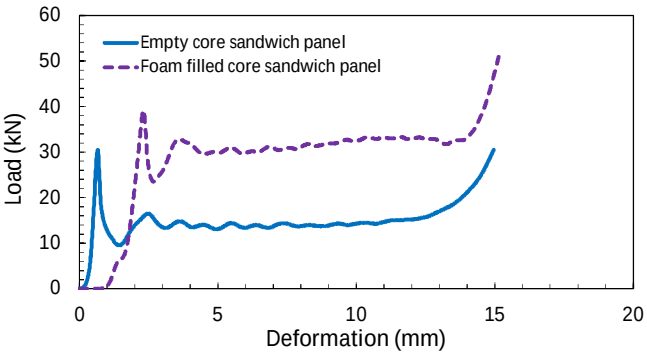

Fig .9 The load-deformation curves of empty and foam filled sandwich panels

شکل9 منحنی‌های نیرو-تغییر شکل مربوط به ساندویچ پنل خالی و پر شده با فوم

اینکه سبب شده است ماکزیمم اول به بقیه منحنی نزدیک شود باعث افزایش استحکام بسیار زیاد در هسته پنل ساندویچی شده است. در واقع اثر متقابل لانه زنبوری با فوم پلی‌اورتان در میزان افزایش مقاومت سازه در این نوع بارگذاری نیز مشاهده می‌شود. در این منحنی‌ها افت و خیزهای بعد از ماکزیمم اول مربوط به چین خوردگی منظم هسته با توجه به نوع ساختار لانه زنبوری می‌باشد.

4-3- تنش فشاری سازه‌ها در دو بارگذاری اعمال شده

با محاسبه تنش فشاری و کرنش منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به هر سازه در هریک از بارگذاری‌ها رسم شد (شکل 10 و 11). این منحنی مربوط به تنش فشاری ناحیه تخریب شده می‌باشد.

در "شکل 10" منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری بدون فوم در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است منحنی مربوط به بارگذاری گسترده خیلی پایین‌تر از منحنی مربوط به بارگذاری متمرکز می‌باشد. در واقع تنش فشاری آن خیلی کمتر شده است. این امر به علت سطح مقطع در تماس با نیرو می‌باشد. در بارگذاری متمرکز سطح تخریب شده درست برابر مساحت نفوذکننده است اما در بارگذاری گسترده سطح تخریب برابر اندازه مساحت کل نمونه می‌باشد.

منحنی تنش-کرنش مربوط به سازه ساندویچی پر شده با فوم پلی‌اورتان در "شکل 11" نشان داده شده است. در این سازه نیز همانند سازه بدون فوم منحنی مربوط به بارگذاری گسترده پایین‌تر از منحنی مربوط به بارگذاری متمرکز می‌باشد. در واقع به علت ابعاد سطح تخریب در این دو بارگذاری

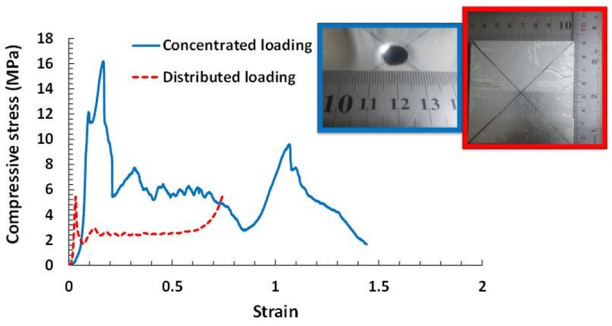

Fig .10 Comparison of the compressive stress-strain curves related to empty sandwich structure under concentrated and distributed loading

شکل10 مقایسه منحنی‌های تنش فشاری-کرنش سازه ساندویچی بدون فوم در دو بارگذاری متمرکز و گسترده

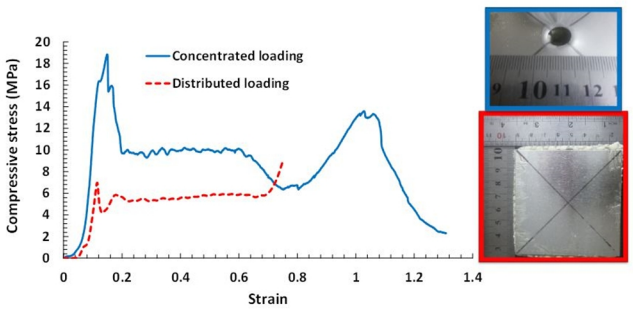

Fig .11 Comparison of the compressive stress-strain curves related to foam filled sandwich structure under concentrated and distributed loading

شکل11 مقایسه منحنی‌های تنش فشاری-کرنش سازه ساندویچی پر شده با فوم در دو بارگذاری متمرکز و گسترده

تنش فشاری متفاوت شده است. تنش فشاری در بارگذاری متمرکز خیلی بیشتر از بارگذاری گسترده می‌باشد و این امر به علت رابطه معکوس تنش با سطح مقطع تماس می‌باشد.

اما با مقایسه دو سازه با یکدیگر هم در بارگذاری متمرکز و هم در بارگذاری گسترده تنش فشاری سازه پر شده با فوم بیشتر از حالت بدون فوم می‌باشد. می‌توان اینگونه تعبیر کرد که در یک مقطع تماس ثابت، افزایش نیرو باعث افزایش تنش فشاری شده است. در واقع تقابل دیواره سلول‌های لانه زنبوری و فوم به عنوان ماده پرکننده، استحکام و تنش فشاری سازه را افزایش داده است.

4-4- انرژی جذب شده توسط سازه‌ها در دو بارگذاری اعمال شده

با محاسبه مساحت سطح زیر منحنی‌های نیرو-نفوذ و نیرو-تغییر شکل به ترتیب در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده، انرژی جذب شده مربوط به هریک از سازه‌های ساندویچی در این دو بارگذاری به دست آمد. پس از محاسبه انرژی جذب شده مشاهده شد، سازه ساندویچی پر شده با فوم هم در بارگذاری متمرکز و هم در بارگذاری گسترده انرژی جذب شده بیشتری را نسبت به حالت بدون فوم به خود اختصاص داده است. در واقع فوم پلی‌اورتان باعث افزایش میزان جذب انرژی در این سازه شده است. این مطلب بیانگر برهم‌کنش سازه لانه زنبوری و فوم می‌باشد، وقتی که به عنوان هسته در سازه ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرند و این تقابل باعث می‌شود که سفتی و استحکام مجموعه ساندویچ شده افزایش یابد و در نتیجه میزان انرژی جذب شده‌ی آن افزایش چشمگیر پیدا کند.

همانطور که انتظار می‌رفت در بارگذاری گسترده به علت درگیر بودن کل سطح نمونه در آزمایش شبه استاتیک، انرژی جذب شده خیلی بیشتر از بارگذاری متمرکز که فقط مساحت کوچکی از نمونه که در زیر نفوذکننده قرار دارد و تخریب می‌شود، می‌باشد.

با توجه به "شکل 12"، انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی در بارگذاری گسترده تقریباً 20 برابر انرژی جذب شده این سازه در بارگذاری متمرکز می‌باشد. همچنین در سازه ساندویچی پر شده با فوم انرژی جذب شده در بارگذاری گسترده تقریباً 24 برابر انرژی جذب شده در بارگذاری متمرکز است.

4-5- تأثیر ماده پرکننده در میزان انرژی ویژه جذب شده

با داشتن وزن هر نمونه و انرژی جذب شده‌ی مربوط به هر یک از سازه‌ها در

www.SID.ir

Archive of SID

دو بارگذاری مختلف، انرژی ویژه برای هر سازه از تقسیم انرژی جذب شده بر وزن نمونه بدست می‌آید.

با توجه به نیاز مبرم صنایع به خصوص در صنایع هوافضا، دریایی، خودروسازی و ساختمان‌سازی به سازه‌هایی با وزن کم و در عین حال با استحکام بالا و در واقع سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا؛ انرژی ویژه برای سازه‌های جاذب انرژی از اهمیت خاصی برخوردار است. چون انرژی مستقل از وزن سازه می‌شود و تصمیم‌گیری برای استفاده از آن سازه را در صنایع مختلف به خصوص در مکان‌هایی که نیاز است با افزایش اندکی وزن سازه از نظر استحکام و مقاومت افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، آسان می‌کند.

انرژی ویژه هر یک از سازه‌ها در "شکل 13" آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است و انتظار می‌رفت سازه ساندویچی پر شده با فوم در هر دو بارگذاری عملکرد بهتری نسبت به حالت بدون فوم از خود نشان داده است.

با وجود اینکه سازه ساندویچی پر شده با فوم به علت وجود ماده پرکننده افزایش وزن داشته است و وزن با انرژی ویژه رابطه معکوس دارد، اما اثر وزن نامحسوس بوده است. در واقع عملکرد این سازه در میزان جذب انرژی بسیار مطلوب بوده است که حتی افزایش وزن این سازه مانع آن نشده است. برهم-کنش فوم و سازه لانه زنبوری سبب این افزایش انرژی و استحکام قابل ملاحظه در پنل ساندویچی شده است. بنابراین سازه ساندویچی با هسته پر شده از فوم پلی‌اورتان توانسته است که نیاز صنایع مختلف به عنوان سازه‌ای با نسبت استحکام به وزن بالا را برطرف کند و می‌توان از این سازه به عنوان یکی از مناسب‌ترین سازه‌های جاذب انرژی در صنایع مختلف استفاده نمود.

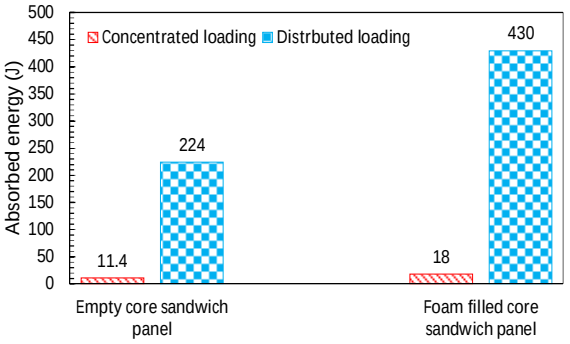

Fig .12 Comparison of the energy absorption related to each specimens under concentrated and distributed loading

شکل12 مقایسه نمودارهای مربوط به انرژی جذب شده مربوط به هر دو ساندویچ پنل تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده

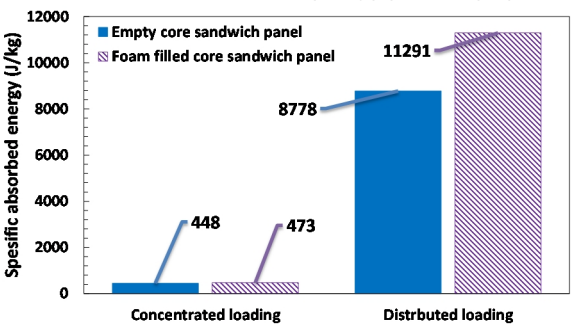

Fig .13 The specific energy of each sandwich panel structure under concentrated and distributed loading

شکل13 انرژی ویژه مربوط به هر دو نوع ساندویچ پنل تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر فوم پلی‌اورتان به عنوان ماده پرکننده سازه لانه زنبوری مورد استفاده در ساندویچ پنل، بر میزان انرژی جذب شده و همچنین شکل تخریب به صورت شبه استاتیک تحت بارگذاری‌های فشاری متمرکز و گسترده مورد بررسی قرار گرفت. نفوذ، تغییر شکل، تنش فشاری، انرژی جذب شده و انرژی ویژه در سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم، از آزمایش شبه استاتیک با بارگذاری‌های متمرکز و گسترده به دست آمد. با مشاهده آزمایش‌های انجام شده می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

در آزمایش شبه استاتیک در هر دو نوع بارگذاری سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری پر شده از فوم انرژی جذب شده بیشتری نسبت به حالت بدون فوم داشت. در واقع فوم پلی‌اورتان سبب افزایش استحکام هسته در ساختار ساندویچی شده است.

پر کردن سازه لانه زنبوری با فوم پلی اورتان و استفاده آن در ساختار ساندویچی باعث افزایش 58% و 92% انرژی جذب شده به ترتیب در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده شده است.

در هر دو ساندویچ پنل؛ تنش فشاری در بارگذاری متمرکز خیلی بیشتر از بارگذاری گسترده می‌باشد و این امر به علت رابطه معکوس تنش با سطح مقطع تماس می‌باشد.

در هر دو نوع بارگذاری تنش فشاری سازه پر شده با فوم بیشتر از حالت بدون فوم می‌باشد. در واقع تقابل دیواره سلول‌های لانه زنبوری و فوم به عنوان ماده پرکننده، استحکام و تنش فشاری سازه را افزایش داده است.

انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی در بارگذاری گسترده تقریباً 20 برابر انرژی جذب شده این سازه در بارگذاری متمرکز می‌باشد. همچنین در سازه ساندویچی پر شده با فوم انرژی جذب شده در بارگذاری گسترده تقریباً 24 برابر انرژی جذب شده در بارگذاری متمرکز است.

انرژی ویژه سازه ساندویچی پر شده با فوم در هر دو نوع بارگذاری با وجود افزایش وزن نسبت به حالت بدون فوم، افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. انرژی ویژه پنل دارای فوم 6% در بارگذاری متمرکز نسبت به حالت خالی افزایش داشته است و 29% در بارگذاری گسترده نسبت به پنل ساندویچی بدون فوم افزایش داشته است.

فوم‌ها و سازه‌های لانه زنبوری هر یک اگر به تنهایی استفاده شوند دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که دامنه‌ی استفاده از آن‌ها را کمتر می‌کند. اما در این تحقیق مشخص شد که با ترکیب این دو ماده در کنار هم، سازه‌ای با ویژگی‌های برتر و مقاومت مستحکم‌تر حاصل می‌شود و همچنین اگر سطح تماس سازه برای جذب انرژی (بارگذاری گسترده) بیشتر باشد، سازه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری پر شده از فوم پلی‌اورتان می‌تواند به عنوان یکی از مطلوب‌ترین سازه‌های جاذب انرژی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

6- مراجع

[1] A. A. A. Alghamdi, Collapsible impact energy absorbers, an overview. *Thin-walled structures*, Vol. 39, No. 2, pp.189-213, 2001.

[2] KE. Evans, The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores. *Composite Structures*, Vol. 17, No. 2, pp. 95-111, 1991.

[3] S. Abrate, Localized impact on sandwich structures with laminated facings. *Applied Mechanics Reviews*,Vol. 50, No. 2, pp. 69-82,

www.SID.ir

Archive of SID

1997.
[4] T. Bitzer, *Honeycomb Technology- Material Design, Manufacturing Applications and Testing*, pp. 10-42, London: Springer Netherlands, 1997.
[5] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.
[6] H. Degischer, B. Kriszt, *Handbook of Cellular metals*, pp. 208-209, Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
[7] BA. Dombrow, *Polyurethanes*, pp. 358-360, New York: Reinhold Publishing Corporation, 1957.
[8] H. Zhao, G. Gary, Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 827-836, 1998.
[9] JM. Sibeaud, L. Thamie, C. Puillet, Hypervelocity impact on honeycomb target structures: Experiments and modeling, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 12, pp. 1799-1807, 2008.
[10] B. Hou, A. Ono, S. Abdennadher, S. Pattofatto, Y. L. Li, H. Zhao, Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression, Part I: Experiments, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 5, pp. 687-697, 2011.
[11] B. Hou, S. Pattofatto, Y. L. Li, H. Zhao, Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression, Part II: Analysis, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 5, pp. 698-705, 2011.
[12] M. Akay, R. Hanna, A comparison of honeycomb-core and foam-core carbon-fibre/epoxy sandwich panels, *Composites*, Vol. 21, No. 4, pp. 325-331, 1990.
[13] S. Ryan, F. Schaefer, R. Destefanis, M. Lambert, A ballistic limit equation for hypervelocity impacts on composite honeycomb sandwich panel satellite structures, *Advances in Space Research*, Vol. 41, No. 7, pp. 1152-1166, 2008.
[14] FKA. El-Sayed, R. Jones, IW. Burgess, A theoretical approach to the deformation of honeycomb based composite materials, *Composites*, Vol. 10, No. 4, pp. 209-214, 1979.
[15] A. Alavi Nia, MZ. Sadeghi, The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1216-1230, 2010.
[16] J. Chung, Waas AM. Compressive response of circular cell polycarbonate honeycombs under inplane biaxial static and dynamic loading. Part I: experiments. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 729-754, 2002.
[17] E. Wu, WS. Jiang, Axial crush of metallic honeycombs, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 439-456, 1997.
[18] A. Niknejad, Gh. Liaghat, H. Moslemi Naeini, AH. Behravesh, Theoretical Calculation of the Instantaneous Folding Force in a Single-Cell Square Column under Axial Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 21-30, 2010. (in Persian فارسی)
[19] H. Sorailo, Gh. Liaghat, Sandwich Design Optimization Honeycomb Panels under Compressor Load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 73-82, 2009. (in Persian فارسی)
[20] F. Hassanpour Roudbeneh, Gh. Liaghat, H. Sabouri, Experimental Investigation of Quasi-Static Penetration on Honeycomb Sandwich Panels Filled with Foam, *The Biennial International Conference on Experimental Solid Mechanics* (*X-Mech*), Tehran, Iran, February 16-17, 2016.
[21] F. Hassanpour Roudbeneh, Gh. Liaghat, H. Sabouri, Experimental Investigation of Impact Loading on Honeycomb Sandwich Panels Filled with Foam, *19th International Conference on Composite structures*, Porto, Portugal, September 5-9, 2016.
[22] F. Hassanpour Roudbeneh, Gh. 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)
[23] A. Pugsley, The large-scale crumpling of thin cylindrical columns, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp.1-9, 1960.
[24] JM. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp.10-15, 1960.

www.SID.ir