



بررسی تجربی جذب انرژی در تیرهای ساندویچی با هسته‌ی مشبک پر شده از فوم، تحت بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

حسین تقی پور¹، محمد دامغانی نوری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، mmoori@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 آذر 1396

پذیرش: 14 بهمن 1396

ارائه در سایت: 04 اسفند 1396

کلید واژگان:

جذب انرژی

هسته مشبک فلزی

تیر ساندویچی

فوم پلی‌یورتان سخت

بارگذاری عرضی

چکیده

در این پژوهش تأثیر روش پر کردن هسته‌های مشبک تیرهای ساندویچی، با فوم‌های پلی‌یورتان از نوع سخت با وزن سبک، مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتباط بین نیرو و جابه‌جایی در مرکز تیر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. سه نوع هسته مشبک از جنس فولاد به صورت خالی و پر شده از فوم، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به صورت عرضی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در ادامه با مطالعه بر روی جهت‌گیری صفحات مشبک در هسته، به بررسی پارامترهای ضربه‌پذیری، از جمله جذب انرژی ویژه، به‌عنوان اهداف آزمایش پرداخته شده است. این نوع سیستم جاذب انرژی، می‌تواند در صنایع هوایی، کشتی‌سازی، خودروسازی، صنایع ریلی و آسانسورها برای جذب انرژی ضربه مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تحلیل آزمایشگاهی خمشی نشان داد که به کارگیری فوم در هسته، می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. نتایج آزمایش‌های خمشی نشان داد که ظرفیت جذب انرژی ویژه در تیر ساندویچی تقویت شده با فوم در مقایسه با نمونه مشابه توخالی، 74% افزایش یافته است. همچنین، جهت‌گیری مناسب هسته مشبک در تیر ساندویچی موجب افزایش جذب انرژی ویژه تا 66.5% می‌شود. در انتها پارامترهای هندسی مناسب، و بهترین نمونه‌ها از لحاظ معیارهای در نظر گرفته شده با توجه به اهداف طراحی، معرفی می‌شوند.

Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending

Hossein Taghipoor, Mohammad Damghani Noori*

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, mmoori@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 22 November 2017
Accepted 03 February 2018
Available Online 23 February 2018

Keywords:

energy absorption
Expanded metal sheet
Sandwich beam
Rigid polyurethane foam
Transverse bending

ABSTRACT

In this research, influence of foam filling technique in sandwich beams with expanded metal sheet as core by using lightweight rigid polyurethane foam is investigation. Relationships between the force and displacement at the midspan of the sandwich beams were obtained from the experiments. Three types of Steel lattice cores both bare and foam-filled were subjected to quasi-static. The performance of sandwich structures with expanded metal sheets as core were studied under transverse bending. In the following, by studying the orientation of the core layers to evaluation the impact parameters, including Specific Energy Absorption (SEA) as discussed testing purposes. The energy absorbing system can be used in the aerospace industry, shipbuilding, automotive, railway industry and elevators to absorb impact energy. Experimental results showed that foam filling technique can significantly increase specific absorbed energy. Results of three point bending crushing tests showed that the SEA of foam-filled sandwich beam increased by 74 %, comparing to the hollow beam. Also, appropriate orientation of core in the sandwich beam caused to increase the specific energy absorption by 66.5 %. Finally, appropriate geometric parameters and the best examples of criteria considered with respect to the objectives, are introduced.

1- مقدمه

تحمل محدوده‌ی گسترده‌ای از بارگذاری‌های دینامیکی، ضربه‌ای، انفجاری و نیروی ناشی از امواج دریا و بادها را دارد. این تیرها دارای ساختاری با هسته منظم و تناوبی است، که حد وسط خوبی بین عملکرد (جذب انرژی) و قابلیت تولید ایجاد خواهد کرد. این مزایای ساختاری اغلب در راستای وجود هسته با چگالی پایین است که صفحات بیرونی را به هم متصل می‌کنند. طراحی

تیرهای ساندویچی در قاب‌های ساختمانی، پل‌ها، جرثقیل‌ها، بدنه‌ی کشتی‌ها، فضاپیماها و زیر ساخت‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربرد فراوانی در سیستم‌های حمل و نقل دارند. این سازه‌ها معمولاً به صورت عملیات مونتاژ از یک یا چند عضو و واحد هسته ساخته می‌شوند، که توانایی

Please cite this article using:

H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 126-134, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تحقیقاتی قابل توجهی در راستای بررسی رفتار سازه‌های ساندویچی برای جذب انرژی انجام شده است. اثرات انواع مختلف هسته مانند، دوزنقه‌ای، راه‌راه، لانه زنبوری، چهارضلعی و هسته‌های هرمی برای جذب انرژی در ساختارهای ساندویچی بررسی شده است [24,25].

ژاو وهاتچینسون [26] نشان دادند که تیرهای ساندویچی در مقایسه با تیرهای یکپارچه با جنس و وزن یکسان رفتار بهتری به منظور جذب انرژی در برابر بارهای انفجاری از خود نشان می‌دهند.

فلیک و همکاران [27] از مدلی سه فازی برای تحلیل صفحات ساندویچی استفاده کردند. فاز تماسی بین اجزا، فاز فروریزش هسته و فاز خمش و کشیدگی صفحات رومی. تیل بروک و همکاران [28] همچنین لیانگ و همکاران [29] هسته‌های نرم با استحکام عرضی پایین ارائه کردند که موج‌های منتقل شده در اثر انفجار در آب به سازه را بسیار کاهش داده و کولپینگ بین فروریزش هسته و خمش در صفحات بالایی و پایینی را افزایش می‌دهد. در این سازه‌ها هسته به طور کامل دچار فروریزش می‌شود و عکس‌العمل بالایی از خود به نمایش می‌گذارد.

در سال 2001 ایوان و همکاران [30] به بررسی و مقایسه قابلیت مواد در هسته‌های متناوب برای تیرها، لوله‌ها و پوسته‌ها پرداختند. هسته متناوب شامل هر دو حالت میکرو-خرپا شبکه‌ای و هسته منشوری است. در نهایت برتری عملکرد هسته‌های تناوبی تایید شده است. نتیجه تحقیقات ایوان و همکاران این بود که ساخت هسته متناوب و منظم هزینه بیشتری دارد. با این وجود این نوع هسته‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی و بهبود عملکرد قطعه می‌شود.

طاهری بهروز و همکاران [31] به بررسی رفتار خمش چهار نقطه‌ای تیرهای ساندویچی با هسته‌های فومی و رزینی و طول‌های متفاوت، پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که مکانیزم تخریب تیرها، ناشی از فرورفتگی فوم، و در ادامه شکست پوسته در زیر محل اعمال نیرو بوده است. در ادامه منحنی‌های نیرو-جابجایی و مکانیزم تخریب تیرها با دو روش تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده که نتایج نشان از همپوشانی بالای دو روش می‌دهد.

یان و همکارانش [32-34] در بررسی‌های انجام داده، رفتار پانل با هسته موجدار تقویت شده با فوم آلومینیومی و مکانیزم فروریزش هسته را، به صورت تجربی و عددی تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی با نرخ کرنش‌های متفاوت مورد مطالعه قرار داده‌اند. هسته‌های مورد مطالعه آن‌ها همگی مثلثی با یک زاویه و ضخامت ثابت و از جنس فولاد بوده است. نتایج بدست آمده نشان داده که در مقایسه حالت فقدان فوم، صفحات موجدار با تغییر طول کمی با رنج کرنشی بحرانی کوچکی از 0.002 تا 0.004 دچار تغییر شکل می‌شوند و به راحتی فروریزش می‌کنند از دیگر نتایج می‌توان از اثر مفید اضافه کردن فوم هنگام فرو ریزش صفحات خالی به وسیله کماتش اویلر الاستیک اشاره کرد، اگر نسبت باریکی $t/L \leq 0.02$ برقرار باشد فوم هم باعث افزایش مقاومت و هم جذب انرژی به صورت فوق العاده می‌شود و برای مقادیر خیلی بزرگتر نسبت باریکی، اثر مقاومتی فوم به تدریج کاهش پیدا می‌کند.

علوی‌نیا و صدیقی [35] و همچنین زارعی و صدیقی [36] به بررسی آزمایشگاهی پاسخ مکانیکی لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم پلی‌پورتان، تحت بارگذاری فشاری پرداختند. آنها از فوم‌های پلی‌پورتان صلب به عنوان فاز پرکننده لانه زنبوری در آزمایش‌ها بهره بردند و پارامترهایی همچون مقدار انرژی جذب شده، مقدار انرژی جذب شده ویژه و استحکام فروریزی را

سازه‌های ساندویچی بر اساس پارامترهایی چون فراهم آوردن استحکام بالا و وزن پایین میسر می‌شود. هسته باید سختی قابل قبول از لحاظ نیروهای برشی وارده به سازه را داشته باشد، همچنین بتواند از لغزش صفحات نسبت به یکدیگر جلوگیری نماید [1,2]. ساختارهای مختلف و پیچیده به همراه تنوع در مواد تولیدی، به منظور استفاده در هسته مطرح شده‌اند. ساختارها لانه زنبوری شش وجهی و همچنین انواع فوم‌های پلیمری یکی از کاربردی-ترین نوع پانل‌های ساندویچی در ساخت جاذب‌ها به شمار می‌آیند. هسته‌های فومی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که خواصی همچون مقاومت در برابر حرارت، عایق بودن در برابر نفوذ آب و صوت مد نظر باشد [3]. به علاوه فوم‌های پلیمری از جمله ارزاترین مواد مورد استفاده در تولید هسته هستند که از لحاظ اقتصادی نقش مؤثری در تولید مقرون به صرفه پانل ساندویچی دارند [4].

ساختارهای مشبک و سلولی دارای مزیت‌های منحصر به فردی با توجه به استحکام، مدول و جذب بالا در تراکم‌های پایین هستند. بنابراین از آنها برای سازه‌هایی که نیاز به وزن سبک دارند نظیر هواپیماها، فضاپیماها، خودروها و... بهره می‌برند. توجه خاص به ساختار ساندویچی فلزی متشکل از هسته مواد سلولی و مشبک، ترکیب قابلیت جذب انرژی بالا با طراحی وزن بسیار سبک را به همراه دارد. هسته تیرهای ساندویچی که به صورت مجزا از صفحات هستند سختی مورد نیاز این ساختار را فراهم می‌کند و از طرفی ورق‌های بالایی و زیرین سختی تیر را تأمین می‌نمایند [5-8].

ساختارهای دو بعدی سازه‌های مشبک و فوم‌ها غالباً به عنوان هسته در تیرهای ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرد که افزایش استحکام خمشی و برشی و همچنین جذب انرژی بالا را به همراه دارد [9-12].

در سال‌های اخیر طراحی زیر ساختارهایی برای مقابله با بارهای اعمالی در اثر انفجار و نیروهای ضربه ای به امری ضروری تبدیل شده است [5,6]. هسته فلزی مشبک یکی از محبوبترین توپولوژی‌های هسته در ساندویچ پانل‌ها برای جذب نیروهای انفجاری و نفوذ است. این هسته‌ها سختی و استحکام را در دو جهت عمودی و طولی فراهم می‌کنند. همچنین هسته‌ها مشبک علاوه بر مزیت ساخت آسان انعطاف‌پذیری بالا در فرایندهای طراحی و فراتر از آن هزینه‌ی کم تولید باعث شده ساختار ساندویچی جذاب برای تولید انبوه شود [13,14].

از طرفی توجه روبه رشد استفاده از فوم‌های پلیمری به عنوان ماده پرکننده به منظور بهبود عملکرد و جذب انرژی از قابلیت‌هایی است که تیرهای ساندویچی با این گونه هسته‌ها خواهند داشت [15-17]. به همین خاطر کارهای زیادی مبنی بر ترکیب هسته‌های سلولی و مشبک با فوم‌های پلیمری صورت گرفته که نرخ جذب انرژی را بالا برده است و همچنین مزیت‌های دیگری از جمله عایق حرارتی و آکستیک به همراه دارد [18].

نیروهای حاصل امواج انفجار و تخریب در اثر اثابت گلوله تهدیدی همیشگی است که می‌تواند باعث آسیب جدی به سازه‌ها و ماشین‌آلات جنگی شود. از این رو استراتژی طراحی در این سازه‌ها بر مبنای محدود کردن آسیب‌های ناشی عبارتند از: ارائه‌ی ساختاری پیوسته و افزایش مسیرهای عبوری نیرو، افزایش ظرفیت جذب انرژی در سازه و افزایش استحکام ساختاری است [19].

در این راستا محققان ساختارهایی از قبیل پانل‌های ساندویچی [20] فوم‌های فلزی [21] و پلیمرها [22] که می‌توانند به عنوان جاذب‌های انرژی عمل کنند را پیشنهاد دادند. با توجه به عملکرد بالقوه ساختارهای ساندویچی در مقایسه با ساختارهای یکپارچه تحت بارهای انفجاری [23]، تلاش‌های



Fig. 1 Steel sheet tensile test

شکل 1 تست کشش ورق فولادی

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد

مقادیر	خصوصیات مکانیکی
201	مدول الاستیک E (GPa)
0.3	ضریب پواسون ν
333.52	تنش تسلیم σ_y (MPa)
363.47	تنش نهایی σ_u (MPa)
7800	چگالی ρ (kg/m^3)

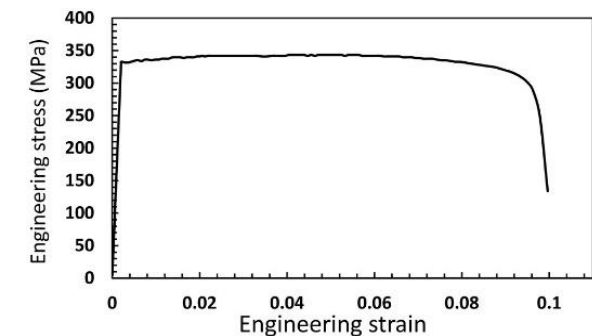


Fig. 2 Engineering stress versus engineering strain curve for steel sheet (substrate and core)

شکل 2 نمودار تنش-کرنش مهندسی صفحات فولادی (صفحات رویه و هسته)

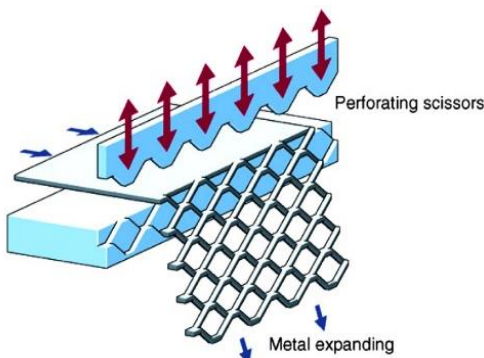


Fig.3 Schematic of the manufacturing process for the expanded metal sheets [40]

شکل 3 طرح شماتیک از فرایند تولید صفحات مشبک فلزی [40]

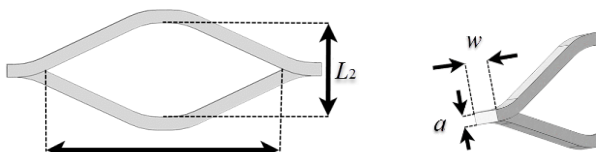


Fig. 4 Definition of geometric parameters of an expanded metal sheet cell

شکل 4 تعریف پارامترهای هندسی سلول صفحات مشبک فلزی

مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. اوپلا [22] مطالعاتی بر روی تیرهای ساندویچی با هسته‌های هدفمند انجام داده و معیاری برای فروریزش این تیرها پیشنهاد دادند.

در سال 2012 ژانگ و همکاران [37] بر روی برش خالص و خمش سه نقطه ای در تیرهای ساندویچی با هسته هرمی از الیاف کربن کار کردند. بررسی تحلیلی از هر نوع بارگذاری برای شرایط ممکن شکست انجام شده. برای ساخت پانل ساندویچی مورد نظر ابتدا با استفاده از روش ریخته‌گری هسته را ساخته و در انتها صفحات کامپوزیتی رویی آن چسبیده می‌شود. برای بدست آوردن مدهای مختلف شکست و خواص مکانیکی پانل با اندازه‌های مختلف (مثلا هسته با دانسیته نسبی متفاوت و صفحات رویی با ضخامت متفاوت) مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی بارهای شکست اندازه گیری شده از آزمایش با مقادیر بدست آمده از تحلیل تئوری به هم نزدیک بوده.

ژانگ و همکاران [38] رفتار دینامیکی ساندویچ پانل‌ها با پوسته کامپوزیتی و هسته مدرج فومی تحت نیروی شوک را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها متوجه شدند که با افزایش یکنواخت امیدانسی نیروی اعمالی، هسته‌ی فومی از، صفحه‌ی رویی (جایی که در معرض نیروی شوک قرار دارد) به صفحه‌ی پشتی، رفتار دینامیکی ساندویچ پانل افزایش می‌یابد. حسن‌پور رودبند [9] و همکاران به بررسی جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری خالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پرداختند. نتایج نشان داد که پر کردن هسته با فوم میزان جذب انرژی را تا 29 درصد افزایش می‌دهد.

در مقاله حاضر به بررسی رفتار تیرهای ساندویچی با هسته مشبک، تحت بارگذاری شبه استاتیکی عرضی، به صورت تجربی پرداخته شده است. اثر تغییر پارامترهای هندسی سایز سلول صفحات مشبک در هسته، و اثر این پارامتر بر میزان جذب انرژی بررسی می‌شود. در ادامه با تغییر در جهت‌گیری صفحات مشبک در هسته تیر ساندویچی، به همراه اضافه شدن فوم پلی-یورتان بر میزان جذب انرژی پرداخته شده است. رفتار بهبود یافته ساختار پر شده از فوم پلی‌یورتان با نمونه بدون فوم مقایسه شده است. در پایان به محاسبه کلیه شاخص‌های مهم در تحلیل جاذب‌های انرژی پرداخته و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود.

2- تحلیل آزمایشگاهی

برای ساخت تمامی نمونه‌ها، از ورق‌های فولاد نورد سرد شده طبق استاندارد [39] ASTM A-611 استفاده شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی ورقه‌ها، با استفاده از استاندارد ASTM E08M-04 مطابق شکل 1، سه نمونه استاندارد، تحت آزمایش کشش قرار داده شده و نتایج در جدول 1 آورده شده است. همچنین در شکل 2 نمودار تنش برحسب کرنش مهندسی که از نتایج آزمایش کشش ورق‌های فولادی بدست آمده، رسم شده است.

برای ساخت هسته‌های مشبک از دستگاه پرس استفاده شده است. شکل 3 به صورت شماتیک برش و گسترش صفحات شبکه را نشان می‌دهد. سلول‌های صفحات مشبک با دو پارامتر اصلی L_1 و L_2 که به ترتیب معرف طول بزرگ و کوچک لوزی است، معرفی می‌شوند. پارامترهای هندسی این صفحات در شکل 4 و جدول 2 نشان داده شده است.

همچنین نمونه تیرهای ساندویچی مورد آزمایش به صورت شماتیک در



Fig. 7 Polyurethane foam samples under uniaxial compression test
شکل 7 نمونه فوم پلی‌اورتان تحت آزمایش فشار تک محور

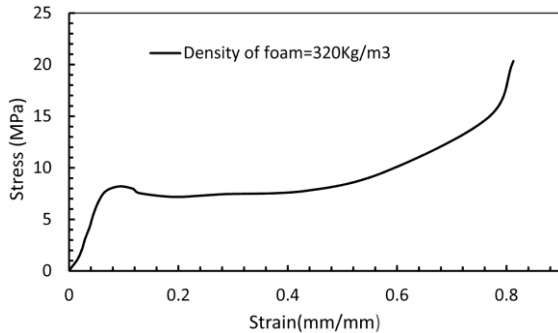


Fig. 8 Stress-strain curve in uniaxial compression test on Polyurethane Foam

شکل 8 نمودار تنش بر حسب کرنش تست فشار تک محور بر روی فوم پلی‌اورتان



Fig. 9 Polyurethane foam tensile test samples
شکل 9 نمونه آزمایش کشش فوم پلی‌اورتان

جدول 4 خواص فیزیکی و مکانیکی فوم پلی‌اورتان

مقادیر	خواص مکانیکی
320	چگالی میانگین ρ (kg/m ³)
240.12	مدول الاستیک E (GPa)
0	ضریب پواسون
7.776 [41]	تنش فشاری هیدرواستاتیک σ_{nc} (MPa)
5.46 [42]	تنش کششی هیدرواستاتیک σ_{nt} (MPa)
8.2	تنش کششی تک محوره σ_{ut} (MPa)
8.6	تنش فشاری تک محوره σ_{uc} (MPa)

ساندویچی با هسته مشبک خالی و پر شده با فوم پلی‌اورتان، با استفاده از دستگاه سنتم STM-400 انجام شده، که در شکل 10 نشان داده شده است. همه نمونه‌ها تحت نیروی خمشی شبه‌استاتیکی با سرعت 10 mm/min قرار گرفته‌اند.

3- نتایج و بحث

در بررسی فروریزش نمونه با هسته مشبک نوع 3 (BC362) در شکل 11، مطابق نمودار نیرو-جابجایی شکل 11-b، مشاهده می‌شود نیرو تا بارکمانشی (نیروی بیشینه¹)، یک رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. بعد از رسیدن نیرو به نقطه اوج خود، هسته در سلول‌های خود دچار خمش می‌شود، که این

¹ Peak force

جدول 2 ابعاد سلول‌های صفحات مشبک

C	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	W(mm)	a(mm)
1	15	7	1.5	0.9
2	34	11	2.2	1.5
3	64	22	4	3

شکل 5 نشان داده شده است. برای ساخت تیرهای ساندویچی، از جوش استیلن جهت اتصال هسته مشبک به صفحات بالا و پایین استفاده شده است. در این مطالعه صفحات هسته به دو صورت طولی و عرضی مورد آزمایش قرار گرفته است. در جهت‌گیری طولی برای تمامی نمونه‌ها به طور یکسان، تعداد 6 لایه از صفحات مشبک به عنوان هسته تیر ساندویچی، طراحی شده است. در جدول 3 مشخصات تمامی 8 نمونه طراحی شده آمده است.

در این مطالعه از فوم سلول بسته پلی‌اورتان، با چگالی 320 kg/m³، استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود با ترکیب دو ماده ایزوسیانات و پولیول با درصد وزنی مشخص، فوم پلی‌اورتان با چگالی مورد نظر بدست آمد. خواص فیزیکی و مکانیکی فوم سلول بسته پلی‌اورتان، با ابعاد استاندارد 50 در 50 میلیمتری مطابق شکل 7، تحت فشار تک محور با استفاده از استاندارد ASTM D1621-94 انجام شده است.

همچنین نمودار تنش-کرنش فوم تحت آزمایش فشار و شکل نمونه مورد آزمایش تحت کشش، به ترتیب در شکل‌های 8 و 9 ارائه شده است. نتایج تست و خواص فوم در جدول 4 نشان داده شده است.

کلیه‌ی تست‌های خمشی شبه‌استاتیکی انجام شده بر روی تیرهای

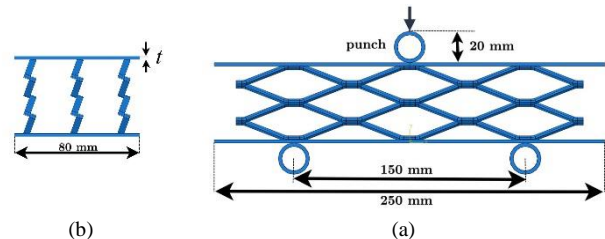


Fig. 5 A schematic view of the sandwich beam sample a) front view and b) side view

شکل 5 نمایی شماتیک از تیر ساندویچی، (a) نمای روبه‌رو (b) نمای جانبی

جدول 3 مشخصات نمونه‌های طراحی شده برای آزمایش

نمونه	C	N _c	t(mm)	W _m (kg)
BC362	3	6	2	0.84
BC362F	3	6	2	0.95
BC262	2	6	2	0.5
BC262F	2	6	2	0.65
BC162	1	6	2	0.55
BC162F	1	6	2	0.68
BC3L2	3	9	2	0.63
BC2L2	2	11	2	0.49



Fig.6 The composition and production of polyurethane foam

شکل 6 ترکیب و ساخت فوم پلی‌اورتان

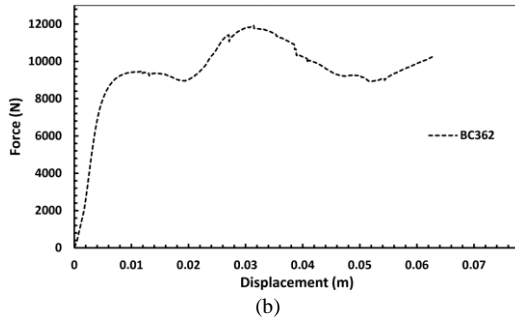
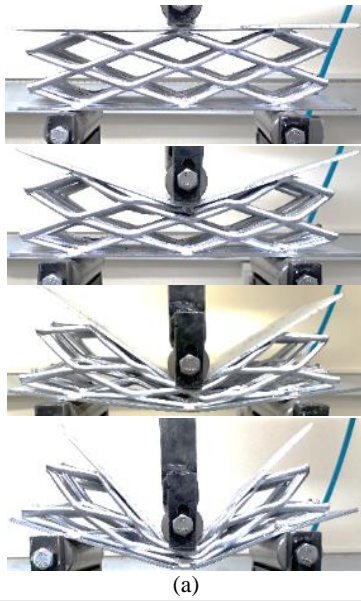


Fig. 11 a) Collapse of the sandwich structures with lattice core type 3 (BC362) b) force-displacement Diagram for structures in experimental test

شکل 11 (a) مراحل فروریزش سازه ساندویچی با هسته مشبک نوع 3 (BC362)، (b) نمودار نیرو بر حسب جایجایی در آزمایش تجربی

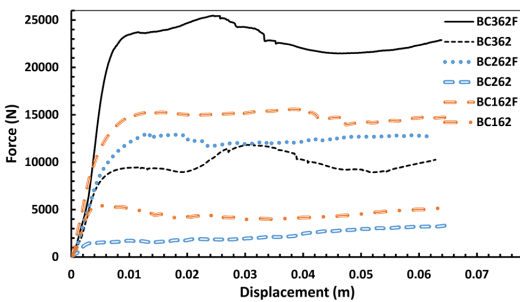


Fig. 12 A comparison between the experimental force-displacement curves for all sandwich beams in a view

شکل 12 مقایسه منحنی نیرو-جایجایی بدست آمده از تست‌های تجربی برای تمامی تیرهای ساندویچی در یک نما

انرژی جذب شده بر واحد وزن² (SEA) می‌باشد. معادلات (1) تا (4) به ترتیب نشان دهنده؛ انرژی جذب شده، نیروی پیک اولیه، بازده نیروی فروریزش و انرژی جذب شده ویژه می‌باشد.

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

$$P_{mean} = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

² Specific energy absorption

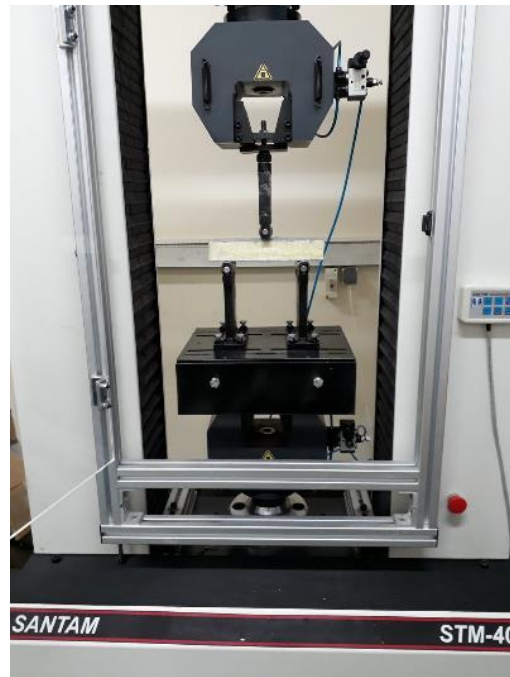


Fig. 10 A view of the Santam tension and compression testing machine
شکل 10 نمایی از دستگاه تست کشش و فشار سنتام

نشان دهنده کاهش استحکام نمونه تا رسیدن به سلول بعدی می‌باشد. در این مرحله، بار مورد نیاز برای تغییر شکل نمونه به طور چشمگیری کاهش یافته که ناشی از انتشار کمانش موضعی در طول یال‌های سلول هسته و ایجاد لولای پلاستیک در مفصل‌ها می‌باشد، و پاسخ نمونه رفتاری غیر خطی را از خود نشان می‌دهد. در ادامه، بعد از کمانش، مجدداً ظرفیت تحمل بارگذاری در سازه هسته مطابق شکل 11-b، افزایش پیدا می‌کند و نیرو تا قله دوم افزایش می‌یابد. سرانجام با فروریزش سلول بعدی، تیر به طور کلی دچار خمش می‌شود.

در شکل 12 مقایسه کلی صورت گرفته در نمودار نیرو-جایجایی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. این خواهد نشان می‌دهد که تأثیر اضافه کردن فوم پلی‌یورتان در داخل سلول‌های هسته مشبک، از کاهش شدید میزان نیرو بعد از نقطه اوج جلوگیری می‌کند. همچنین در مقایسه نمودارها با یکدیگر مشاهده می‌شود که نمودار نیرو-جایجایی در تیر با هسته مشبک تقویت شده با فوم پلی‌یورتان نسبت به تیر ساندویچی مشابه بدون فوم، بعد از رسیدن به بیشترین مقدار، بدون نوسان ادامه می‌یابد، که به عنوان جذب انرژی بسیار مطلوب است.

با مقایسه بین پارامتر هندسی سلول‌ها در هسته تیرهای ساندویچی، مشاهده می‌شود تیر با هسته نوع 2 (BC262) فروریزی همگن‌تر در راستای طولی از خود نشان می‌دهد و در طول فروریزش ابتدا هسته به طور کامل دچار فروریزش شده و سپس خمش کلی در تیر شروع می‌شود.

4- محاسبه پارامترهای مهم در جذب انرژی

نیروی پیک اولیه (Ppeak)، نیروی میانگین (Pmean)، ظرفیت جذب انرژی (Ea) و بازده نیروی فروریزش¹ (CFE)، پارامترهایی هستند که برای سنجیدن خواص جذب استفاده می‌شوند. به علاوه پارامتر دیگری نیز وجود دارد که از اهمیت بالایی در مطالعه‌ی جذب‌های انرژی برخوردار است، که

¹ Crashing force efficiency

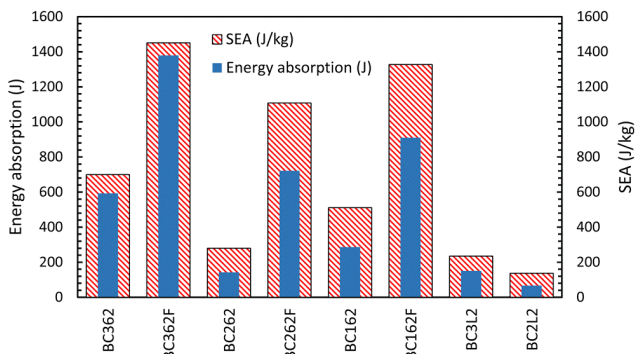


Fig. 14 Effect of cores on energy absorption.

شکل 14 نمودار میله ای اثر نوع هسته بر روی مقدار جذب انرژی

فروریزش در تیر، با هسته مشبک نوع 2 و پر شده از فوم (BC262F) در مقایسه با نمونه مشابه خالی (BC262)، 34% کاهش پیدا کرده است، این نتایج نشان از تأثیر اضافه شدن فوم در نزدیک شدن CFE به 100% دارد که در واقع نیروی بیشینه به نیروی متوسط نزدیک شده، که حالتی ایده‌آل برای جذب‌های انرژی محسوب می‌شود.

در شکل 16 فروریزش پیشرونده تیرهای ساندویچی با هسته مشبک در دو جهت گیری طولی و عرضی همراه با انواع مختلف ساین سلولی صفحات مشبک هسته نمایش داده شده است. همچنین در شکل 16 الف مقایسه بین نمودار نیرو-جابجایی این نمونه‌ها انجام شده است.

ظرفیت جذب انرژی ویژه در تیر با هسته مشبک نوع 3 و جهت‌گیری طولی هسته (BC3L2) در مقایسه با تیر با هسته مشبک نوع 2 و جهت‌گیری مشابه (BC2L2)، 41.78% افزایش پیدا کرده است. از طرفی ظرفیت جذب انرژی ویژه در نمونه تیر با هسته مشبک نوع 3 (BC362)، در مقایسه با نمونه تیر با هسته نوع 2 (BC262) و نوع 1 (BC162)، به ترتیب 27 و 59.9 درصد افزایش پیدا کرده است که نشان از کارایی بهتر هسته نوع 3 در جذب انرژی می‌دهد.

در شکل 17 فروریزش پیشرونده نمونه‌های تقویت شده با فوم نمایش داده شده است که در نمودار شکل 17 الف نمودارهای نیرو-جابجایی این نمونه‌ها با نمونه‌های مشابه خالی از فوم مقایسه شده است. تیر ساندویچی با هسته مشبک نوع 3، تقویت شده با فوم (BC362F) در مقایسه با نمونه تیر با هسته نوع 2 (BC262F) و نوع 1 (BC162F) تقویت شده با فوم پلی‌یورتان، به ترتیب افزایش 23.6 و 8.5 درصدی را در میزان SEA تجربه کرده است. با مقایسه بین نتایج حاصله از تغییرات ایجاد شده در راستای بهبود ظرفیت جذب انرژی، به ترتیب تقویت هسته تیر با تزریق فوم، پارامتر

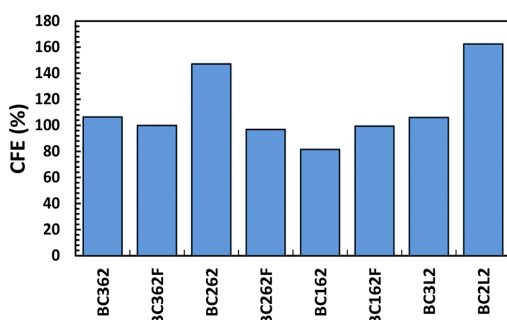


Fig. 15 Effect of cores on CFE.

شکل 15 نمودار میله ای اثر نوع هسته بر روی بازده نیروی فروریزش

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{peak}} \times 100 \quad (3)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (4)$$

این پارامترها در سیستم طراحی بسیار مهم هستند و وزن، به عنوان فاکتور محدود کننده می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. بازده نیروی فروریزش، از نسبت نیروی میانگین بر نیروی پیک اولیه بدست می‌آید [43]. نتایج محاسبه شده از آزمایش تجربی نمونه‌ها در جدول 5 آورده شده است.

در شکل 13، نمودار انرژی-جابجایی برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است، و در شکل 14 نمودار میله‌ای میزان جذب انرژی و انرژی جذب شده ویژه (SEA) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد تیر با هسته مشبک نوع 2 و جهت‌گیری عرضی هسته (BC2L2)، با مقدار 136.73 J/kg، کمترین میزان جذب انرژی ویژه را در میان نمونه‌ها دارد، مقدار بدست آمده از نمونه تیر ساندویچی با جهت‌گیری طولی در هسته، با جذب انرژی برابر 280 J/kg، نیز کمتر است و این تأثیر جهت‌گیری طولی صفحات مشبک در هسته را، در افزایش جذب انرژی نشان می‌دهد. از طرفی تیر ساندویچی با هسته مشبک نوع 2 که با فوم تقویت شده است، با 1108.2 J/kg جذب انرژی ویژه، در رتبه سوم جذب انرژی، و بالاتر از تمامی نمونه‌های خالی از فوم پلی‌یورتان قرار گرفته است، که این نشان از تأثیر بالقوه افزایش فوم در جذب انرژی، به خصوص جذب انرژی ویژه می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار میله‌ای شکل 15 مشخص است، نمونه تیر ساندویچی با هسته مشبک نوع 1 (BC162) با CFE برابر 81.5 درصد کمترین میزان را به خود اختصاص داده است، این نمونه در مقایسه با تیر با هسته مشبک نوع 2 و جهت‌گیری عرضی (BC2L2) که بیشترین میزان CFE را داراست، 49.8% کاهش پیدا کرده است. همچنین بازده نیروی

جدول 5 محاسبه پارامترهای شاخص در جذب انرژی نمونه‌ها

Table 5. Energy absorption characteristics of specimens

نمونه	P_{Peak} (N)	P_{mean} (N)	E_a (J)	CFE (%)	SEA (J/kg)
BC362	9308	9898	593	106.3	699.9
BC362F	23021	22987.9	1378.6	99.8	1450.6
BC262	1456.5	2141.4	142.4	147	280
BC262F	13037	12618.4	721.4	96.7	1108.2
BC162	5447.2	4439.8	285.6	81.5	510.9
BC162F	15023	14912.2	909.7	99.2	1326.6
BC3L2	2217	2348.6	150	105.9	234.89
BC2L2	687	1115.7	67	162.4	136.7

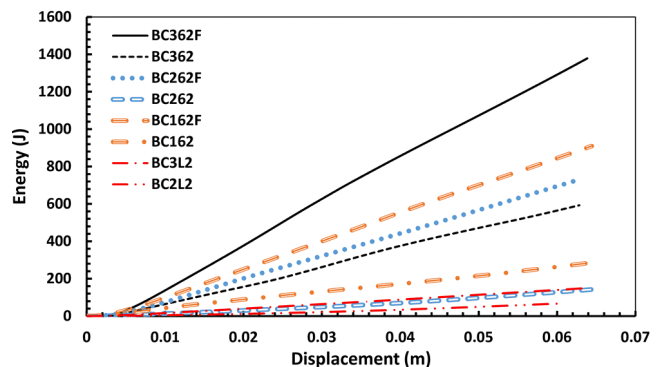
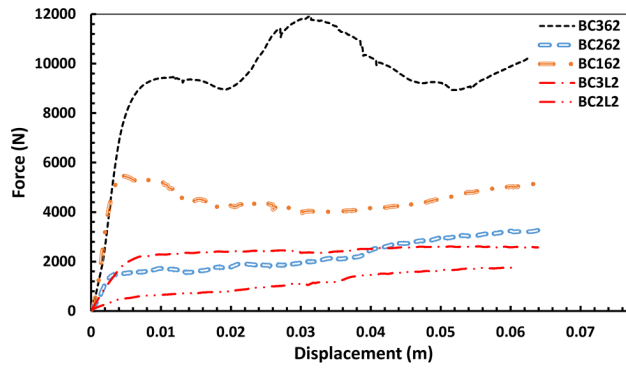


Fig. 13 A comparison between the energy-displacement curves for sandwich beams in experimental

شکل 13 مقایسه بین تمامی نمودارهای انرژی-جابجایی تجربی برای تیرهای ساندویچی

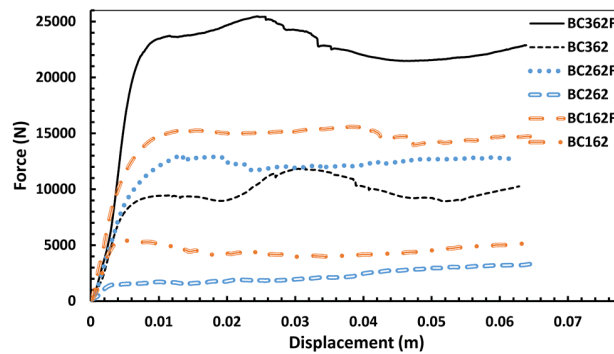


(a)



Fig. 16 a) A comparison of experimental force-displacement curves and collapse of the sandwich structures with lattice core b) BC3L2 c) BC2L2 d) BC262 e) BC162

شکل 16 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی، و مراحل فروریزش سازه ساندویچی با هسته مشبک پر شده از فوم (ب) BC3L2 (ج) BC2L2 (د) BC262 (ه) BC162



(a)



Fig. 17 a) A comparison of experimental force-displacement curves and collapse of the foam filled sandwich structures with lattice core b) BC362F c) BC262F d) BC162F

شکل 17 الف) مقایسه نتایج تجربی منحنی نیرو-جابجایی، و مراحل فروریزش سازه ساندویچی با هسته مشبک پر شده از فوم (ب) BC362F (ج) BC262F (د) BC162F

هندسی سلول در صفحات مشبک و جهت‌گیری صفحات هسته بیشترین تأثیر را به ترتیب از خود نشان داده‌اند.

5- نتیجه گیری

از بررسی‌های انجام گرفته نتایج زیر حاصل شد.

- یکی از مهمترین پارامترهایی که در این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت، جهت‌گیری صفحات مشبک در هسته تیرهای ساندویچی بود. نتایج نشان از افزایش 74.6 درصدی میزان جذب انرژی و افزایش 66.5 درصدی ظرفیت جذب انرژی ویژه، در استفاده از جهت‌گیری طولی به جای جهت‌گیری عرضی در هسته تیرهای ساندویچی می‌دهد. همچنین با استفاده از جهت‌گیری طولی در هسته، میزان نیروی متوسط تا 76 درصد افزایش می‌یابد که بسیار مطلوب بوده و بازده نیروی فروریزش به 100% نزدیک شده است.
- جذب‌های ساندویچی با هسته مشبک معرفی شده، دارای وزن کمی هستند و انرژی زیادی را جذب می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نوع جذب‌ها دارای بازده انرژی بالایی هستند. همچنین در مقایسه بین هسته‌های مشبک نوع 1 تا 3، مشاهده شد که با افزایش سایز سلول‌ها، مقدار انرژی ویژه هم افزایش می‌یابد.
- تیر ساندویچی با هسته مشبک نوع 2 دارای بالاترین مقدار CFE است، که این عامل ریشه در نوع فروریزش هسته در این تیر دارد. هسته مشبک نوع 2 با کمترین نیرو در مفصل‌های خود تشکیل لولای پلاستیک داده و تمامی سلول‌ها به طور یکپارچه در این فرایند شرکت می‌کند.
- جذب‌های انرژی ساندویچی با هسته مشبک به دلیل شکل سازه‌ای که دارند، دارای مکانیزم فروریزش متقارن و همگن در هسته می‌باشند. همچنین در این نوع جذب‌ها نیروی بیشینه اولیه مقدار کمی دارد و به نیروی میانگین نزدیک است. محاسبه‌ی ضریب شکل یا بازده نیروی لهیدگی بیانگر همین موضوع است.
- تقویت هسته با فوم پلی‌ورتان با توجه به افزایش محدود در وزن سازه، میزان جذب انرژی را 80 درصد بهبود می‌بخشد، و میزان ظرفیت جذب انرژی ویژه را تا 74 درصد افزایش می‌دهد.
- نتایج حاصل از بررسی میزان جذب انرژی ویژه نشان می‌دهد، با تقویت هسته جذب با فوم پلی‌ورتان میزان حساسیت به سایز سلول‌ها در صفحات مشبک کاهش می‌یابد، به طوری که دامنه تغییرات در جذب انرژی ویژه برای نمونه‌های خالی از فوم تا 60 درصد تغییر می‌کند، و این در حالی است که نمونه‌های مشابه تقویت شده با فوم با دامنه حداکثر 24 درصدی روبه‌رو است.

6- فهرست علائم

C	نوع هسته
CFE	ضریب شکل
E	مدول الاستیک
E_a	ظرفیت جذب انرژی جذب (J)
L	طول نمونه (mm)
N_c	تعداد لایه صفحات مشبک در هسته
P_{mean}	نیروی میانگین (N)
P_{peak}	نیروی پیک اولیه (N)

SEA_a	انرژی جذب شده بر واحد وزن جذب (J/kg)
t	ضخامت صفحات بالایی و پایینی تیر (mm)
W_m	وزن نمونه (kg)
علائم یونانی	
δ	جابه‌جایی (mm)
ρ	چگالی (kg/m^3)

7- مراجع

- [1] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part I- analytical studies, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 9, pp. 975–984, 2000.
- [2] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading. Part II- experimental studies, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 9, pp. 975–984, 2000.
- [3] H. M. H. Molatefi, Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 177–185, 2014. (in Persian)
- [4] J. Shen, G. Lu, L. Zhao, Z. Qu, Response of Curved Sandwich Panels Subjected to Blast Loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 25, No. 5, pp. 382–393, 2011.
- [5] E. A. Wadley HNG, Fleck NA, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 2331–43, 2003.
- [6] F. N. Deshpande, Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 1, pp. 6275–305, 2001.
- [7] G. L. Simone AE, Aluminum foams produced by liquid- state processes, *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 1, pp. 3109–23, 1998.
- [8] S. I. Frostig Y, Baruch M, Vilnay O, High-Order theory for sandwich-beam behavior with transversely flexible core, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 1, pp. 1026–43, 1992.
- [9] F. Hassanpour Roudbened, G. 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)
- [10] S. Dariushi, M. Sadighi, A nonlinear high order theory for analysis of sandwich beam with flexible core under low velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 381–388, 2015. (in Persian)
- [11] M. R. Zakerzadeh, H. Salehi, A. Salehi, M. Baghani, Bending analysis of a new deformable sandwich structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 235–244, 2016. (in Persian)
- [12] L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier, A Comparison of Bending Properties for Cellular Core Sandwich Panels, *Materials Sciences and Applications*, Vol. 1, pp. 471–477, 2013.
- [13] S. G. Li R, Kardomateas GA, Nonlinear response of a shallow: sandwich shell with compressible core to blast loading, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 75, pp. 61023, 2008.
- [14] E. A. Ferri, V. S. Deshpande, The dynamic strength of a representative double layer prismatic core: a combined experimental, numerical, and analytical assessment, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 77, No. 1, pp. 61011, 2010.
- [15] D. R. Belingardi, Cavatorta MP, Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train, *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 13–25, 2003.
- [16] H. J. Vaziri, A. Xue, Metal sandwich plates with polymer foam-filled cores, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 97– 127, 2006.
- [17] D. R. Belingardi, M. P. Cavatorta, Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train, *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 13–25, 2003.
- [18] E. A. Gu, T. J. Lu, On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 1, pp. 2163–75, 2001.
- [19] J. D. Murrah, A qualitative assessment of blast damage and collapse patterns, *J Perform Constr Facilities*, Vol. 20, No. 1, pp. 330–5, 2006.
- [20] H. N. G. Wadley, Multifunctional periodic cellular metals, *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 364, No. 1, pp. 31–68, 2006.
- [21] L. M. Hanssen, L. Enstock, Close-range blast loading of aluminium foam panels, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 593–618, 2002.
- [22] N. S. Amini, J. B. Isaacs, Effect of polyurea on the dynamic response of steel plates, *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, USA*, 2006.
- [23] H. J. Dharmasena, H. N. G. Wadley, Z. Xue, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp.

- corrugated cores, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 9, No. 4, pp. 397–425, 2014.
- [34] B. Yu, B. Han, C. Y. Ni, Q. C. Zhang, C. Q. Chen, T. J. Lu, Dynamic crushing of all metallic corrugated panels filled with close celled aluminum foams, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 82, No. 1, p. 11006, 2015.
- [35] A. Alavi Nia, M. Z. Sadeghi, The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1216–1230, 2010.
- [36] M. Zarei Mahmoudabadi, M. Sadighi, A study on the static and dynamic loading of the foam filled metal hexagonal honeycomb - Theoretical and experimental, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 530, No. 1, pp. 333–343, 2011.
- [37] J. Xiong, A. Vaziri, L. Ma, J. Papadopoulos, L. Wu, Compression and impact testing of two-layer composite pyramidal-core sandwich panels, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 793–801, 2012.
- [38] L. Zhang, R. Hebert, J. T. Wright, A. Shukla, J. H. Kim, Dynamic response of corrugated sandwich steel plates with graded cores, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 65, No. 1, pp. 185–194, 2014.
- [39] ASTM Int., Standard Specification for Steel, Sheet, Carbon, and High-Strength, Low-Alloy, Hot-rolled and Cold-rolled, No. (A 568/A 568M), 2000.
- [40] G. W. Kooistra, H. N. G. Wadley, Lattice truss structures from expanded metal sheet, *Materials and Design*, Vol. 28, No. 2, pp. 507–514, 2007.
- [41] U. T. Division, H. M. Al-Deek, A. A. Mohamed, A. E. Radwan, Operational benefits of electronic toll collection: case study, Vol. 3, No. December, pp. 467–477, 1997.
- [42] G. P. M. Company, Rigid Polyurethane Foam, *Last-A-Foam FR-3720*, 2017.
- [43] C. Graciano, G. Martínez, D. Smith, Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, *Thin-walled Structural*, Vol. 47, No. 8–9, pp. 953–961, 2009.
- 1063–74, 2008.
- [24] E. A. Wei, F. W. Zok, Design of sandwich panels with prismatic cores, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 128, No. 1, pp. 186–92, 2006.
- [25] E. A. Rathbun, F. W. Zok, Strength optimization of metallic sandwich panels subject to bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 1, pp. 6643–61, 2005.
- [26] H. J. Xue, Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, No. 1, pp. 687–705., 2003.
- [27] D. V. Fleck, The resistance of clamped sandwich beams to shock loading, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71, No. 1, pp. 386–401, 2004.
- [28] F. N. Tilbrook, F. N. Deshpande, The impulsive response of sandwich beams: analytical and numerical investigation of regimes of behaviour, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 54, No. 1, pp. 2242–80, 2006.
- [29] M. Liang, A. V. Spuskanyuk, S. E. Flores, D. R. Hayhurst, J. W. Hutchinson, The response of metallic sandwich panels to water blast, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 74, No. 1, pp. 81–99, 2007.
- [30] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, the Topological Design of Multifunctional Cellular, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 1, pp. 309–327, 2001.
- [31] F. Taheri-Behrooz, M. Mansourinik, Experimental and numerical analysis of sandwich composite beam under four-point bending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 241–252, 2017. (in Persian فارسی)
- [32] L. L. Yan, B. Yu, B. Han, C. Q. Chen, Q. C. Zhang, T. J. Lu, Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores, *Composites Science and Technology*, Vol. 86, No. 1, pp. 142–148, 2013.
- [33] B. Han, L. L. Yan, B. Yu, Q. C. Zhang, C. Q. Chen, T. J. Lu, Collapse mechanisms of metallic sandwich structures with aluminum foam-filled