مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر 1399، دوره 7، شماره 7، ص‌ص. 14- 23

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تجربی ساندویچ پنل‌های فوم آلومینیومی تحت بارگذاری شبه استاتیکی

سعید داراب[1]، محمد حسین پل[2*]، عباس رهی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه فنی و مهندسی تفرش، تفرش، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و مهندسی تفرش، تفرش، ایران

3-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی-پردیس شهید عباسپور، تهران، ایران

* تفرش، صندوق پستی 3951879611، m_h_pol@tafreshu.ac.ir-

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 7 آبان 1398

داوری اولیه 30 دی 1398

پذیرش: 1 اسفند 1398

کلیدواژگان:

فوم آلومینیومی

ساندویچ پنل

جذب انرژی ویژه (SAE)

کامپوزیت شیشه/پوکسی

آزمایش شبه استاتیکی

چکیده

در این مقاله با استفاده میزان جذب انرژی ویژه(SAE) و خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌های فوم آلومینیومی با رویه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفت. هسته نمونه‌های از بلوک‌های فوم آلومینیومی با ضخامت‌های 1 cm ، 2 cm و 3 cm می‌باشند. برای ساخت رویه‌ها از الیاف شیشه نوع E با بافت دو بعدی و با چگالی سطحی 200Kg/m^2 و رزین اپوکسی برای ساخت رویه‌ها استفاده شد. از چسبندگی رزین برای اتصال رویه به هسته‌ها استفاده شد. تأثیر تغییر ضخامت و چگالی هسته، رویه کامپوزیتی، رویه در یک طرف هسته، چند لایه بودن هسته با ضخامت معادل، تغییر چگالی هسته فوم آلومینیومی در این پژوهش بررسی شده و مقدار جذب انرژی ویژه (SAE) نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت فوم آلومینیومی از 2 cm به 3 cm باعث افزایش SAE بین 12% تا 26% می‌شود. همچنین استفاده از رویه کامپوزیتی باعث کاهش مقدار SAE می‌گردد. چند لایه بودن هسته خواص SAE در ناحیه الاستیک خطی را تقویت کرده و در بقیه سطوح نیرو باعث تضعیف حداکثر 6% مقدار SAE می‌گردد. همچنین افزایش چگالی هسته باعث تقویت نیروی تخریب و کاهش مقدار جابجایی شد.

Experimental investigation of aluminum foam sandwich panels under quasi-static loading

Saeed Darab[1], Mohammad Hossein Pol[1*], Abbas Rahi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Central Province, Iran

2- Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti, University, A.C., Tehran, Iran

* P.O.B. 3951879611 Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 29 October 2019

First Decision: 19 January 2020

Accepted: 19 February 2020

Keywords:

Aluminum foam

Sandwich panel

Specific absorbed energy

Glass/Epoxy composite

Quasi- Static test

Abstract

In this paper, the specific absorbed energy (SAE) and mechanical properties of aluminum foam sandwich panels with composite surfaces under quasi-static loading were studied experimentally. The core of the samples are aluminum foam blocks with thicknesses of 1 cm, 2 cm and 3 cm. 2D-woven E-type glass fibers with surface density of 200 Kg/m^2 and epoxy resin were used for fabrication of the surfaces. From adhesion of resin was used for bonding to the core and surface. the effect of changing the thickness and density of the core, the composite surface, the surface on one side of the core, the multilayered core having an equivalent thickness, the effect of changing the density of the aluminum foam core is studied and SAE values of the samples were compared. The results showed that increasing thickness of the aluminum foam from 2 cm to 3 cm increased the SAE between 12% and 26%. The use of composite surface reduces the amount of SAE. The multilayer core increased the SAE in the linear elastic zone and at the other force levels decreased the maximum of 6% of the SAE. Moreover, increasing the core density increased the degradation force and reduced the amount of displacement.

1- مقدمه

سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته فوم فلزی به طور گسترده در سازه‌های سبک وزن بخصوص در صنایع فضایی استفاده می‌شوند. این سازه‌ها به علت مزیت‌هایی که بر ساختار سازه‌های سنتی مثل استحکام ویژه بالا، استحکام به وزن و جذب انرژی بالا مورد توجه محققان می‌باشند. درمیان سازه‌های ساندویچی که به عنوان یک ماده مهندسی چند کاربره جدید شناخته می‌شوند؛ فوم آلومینیومی ویژگی‌های مفید زیادی به غیر از ویژگی‌های مطرح شده در بالا از جمله ظرفیت جذب انرژی برتر ، ساخت آسان در شکل‌های ساده و خاصیت کاهش دهنده قابلیت هدایت حرارت و الکتریسیته و خاصیت کاهش دهنده خاصیت دمپر آکوستیکی دارد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Darab, M. H. Pol, A. Rahi, Experimental investigation of aluminum foam sandwich panels under quasi-static loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 7, pp. 14- 23, 2020 (in Persian)

ساختار سلولی در هسته این سازه‌ها قابلیت تغییر شکل‌های پلاستیکی بزرگ در مقابل بارهای ضربه‌ای را دارند، که این خصوصیت باعث می‌شود مقدار زیادی انرژی جنبشی ناشی از برخورد، قبل از اینکه موجب تخریب سازه گردد جذب گردد. سطح زیر منحنی نمودار تنش کرنش یک ماده جاذب انرژی هر چه کشیده تر باشد قابلیت آن ماده در جذب انرژی بیشتر خواهد بود و فوم آلومینیومی نیز از این قاعده تبعیت می‌کنند [1].

تحقیقات گوناگونی پیرامون بررسی رفتار و جذب انرژی ساختار ساندویچ فوم آلومینیومی در رویه‌های کامپوزیتی صورت گرفته و کمک شایانی به توسعه و استفاده بهتر این سازه‌ها در صنایع شده است. تورنتون و مگی [2] نشان داده‌اند که تنش پایای فوم آلومینیومی که دارای سلول‌های بسته هستند، با تغییر ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی تغییر می‌کند. آن‌ها با انتخاب یک فلز و با اصلاح و تغییر ترکیب شیمیایی آن و انجام عملیات حرارتی مناسب توانستند فلز و یا آلیاژی را تهیه نمایند که دارای تنش و کرنش پایای بالایی بوده و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بیشتری را داشته باشد. ذیکرت [3] با بررسی سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی نشان داد که استفاده از رویه‌های کامپوزیتی بجای صفحات آلومینیومی سبب کارآیی بالاتر و وزن کمتر سازه‌های ساندویچی می‌شود.هال و یو [4] اثر تغییرات چگالی و نرخ کرنش را بر روی تخریب سلول‌های فوم آلومینیومی سلول بسته تحت آزمون شبه استاتیکی در سرعت‌های مختلف بارگذاری بررسی کردند، آنها دریافتند که فشار جریان تنش در فوم‌ها تابع رابطه مقدار چگالی هست اما آزمایش‌ها تقریباً هیچ حساسیتی به نرخ کرنش را نشان نداد. جذب انرژی به چگالی فوم وابسته است و با یک شباهتی به قانون نیرو مربوط هست.علوی نیا و فرشاد [5] اثر هندسه مقطع و وجود پرکننده فوم فلزی را بر رفتار مکانیکی مقاطع جدار نازک تحت تأثیر بارهای محوری شبه استاتیکی بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. سه نوع از مقاطع جداره نازک(دایره،شش ضلعی، مربع) از جنس آلومینیوم 1200 به صورت توداخلی و پر شده از فوم تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار داده شد. نتایج نشان داد که مقطع دایره ای دارای بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط است؛ فوم فلزی باعث بالا رفتن میزان جذب انرژی و مقدار نیروی میانگین می‌شود و در حالت کلی تأثیری بر تعداد چین خوردگی‌ها ندارد.

الینسکا و ات [6] آسیب حاصل از ضربه کم سرعت بر ساندویچ پی وی سی در رویه‌های الیاف شیشه و شیشه پلی استر را بررسی کردند. آن‌ها از دو روش یکی ماده چسبنده و دیگری ماتریس رزین جهت اتصال به هسته فومی استفاده کردند و اندازه آسیب ضربه را با کمک آزمایش غیر مخرب سی اسکن تخمین زدند. آن‌ها دریافتند که در پروسه اتصال پنل‌ها به فوم‌ها، اتصال با رزین گزینه بهتری نسبت به بکار بردن یک ماده چسبنده می‌باشد. یو و ات [7] توسط آزمایش‌های خمش سه نقطه و بررسی رفتار تیرهای ساندویچ فوم آلومینیومی سلول بسته در رویه‌های آلومینیومی تحت آزمایش‌های شبه استاتیکی و ضربه کم سرعت نحوه شکست و تغییر شکل نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آنها مود شکست و تاریخچه نیرو را توسط مدل اصلاح شده گیبسون پیش بینی کردند. آنها تطابق خوبی بین نتایج مدل اصلاح شده و آزمایش تجربی شبه استاتیکی مشاهده کردند. همچنین نتایج آنها نشان داد مودهای شکست و پروسه انهدام تیرها تحت بارگذاری ضربه مشابه با بارگذاری شبه استاتیکی می‌باشد در حالیکه اثرات گذرا و موضعی را که تحت آزمون دینامیکی رخ می‌دهد در مدل شبه استاتیکی نمی‌توان دید.

الوندی تبریزی و ربیعی [8] رفتار مکانیکی فوم‌های فلزی را تحت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. آن‌ها حساسیت نرخ کرنش و کارآیی مکانیکی نمونه‌ها را توسط آزمایش تجربی فشار گیبسون منقطع بدست آوردند. آنان دریافتند که مدول الاستیک، استحکام و جذب انرژی حاصل از بارگذاری دینامیکی به طور ملموسی از آزمایش شبه استاتیکی بیشتر هست. با افزایش سرعت ضربه خواص مکانیکی ضربه‌ای فوم‌های فلزی بهتر دیده می‌شود. هوای محبوس شده داخل گوی‌ها و میکرو اثر داخلی دیواره‌ها و ماتریس موجود در نمونه‌ها نقش اصلی را در این اثر دارد. از مقایسه نتایج هر دو نمونه آن‌ها دریافتند که هیچ رابطه‌ای بین رفتار آزمایش‌های دینامیکی و نسبت طولی اندازه نمونه‌ها وجود ندارد. ری یس [9] پاسخ ضربه کم سرعت و بارگذاری شبه استاتیکی بر سازه‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و پوسته کامپوزیت ترموپلاستیک را با آزمایش خمش سه نقطه‌ای را بررسی کرد. آزمایش شبه استاتیکی صورت گرفته مودهای شکست مثل نفوذ، تسلیم هسته و چرودگی پنل‌ها را آشکار کرد. آنها رفتار سازه‌های ساندویچی را در مقابل ضربه کم سرعت توسط دستگاه سقوط وزنه بررسی کردند. نتایج تجربی آشکار کرد که این سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی از خواص جذب انرژی خوبی برخوردار هستند. تقی پور و دامغانی نوری [10] تأثیر پرکردن هسته‌های مشبک تیرهای ساندویچی با فوم‌های پلی‌یورتان از نوع سخت با وزن سبک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها ارتباط بین نیرو و

جابه‌جایی در مرکز تیر را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آوردند. سه نوع هسته مشبک از جنس فولاد به صورت خالی و پر شده از فوم تحت بارگذاری شبه استاتیکی عرضی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند و با بررسی جهت‌گیری صفحات مشبک در هسته، به بررسی پارامترهای ضربه‌پذیری از جمله جذب انرژی ویژه پرداختند. نتایج آزمایش خمش نشان داد که به کارگیری فوم در هسته می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحضه‌ای افزایش دهد. همچنین آنها نشان دادند که ظرفیت جذب انرژی ویژه در تیر ساندویچی تقویت شده با فوم در مقایسه با نمونه مشابه توخالی 74% افزایش یافته است.

در این مقاله تأثیر تغییر ضخامت و چگالی در هسته، تأثیر وجود رویه کامپوزیتی، وجود رویه در یک طرف هسته نسبت به جهت بارگذاری ، چند لایه و یکپارچه بودن هسته با ضخامت معادل، تأثیر تغییر چگالی هسته فوم آلومینیومی چند ساختار از ساندویچ‌های فوم آلومینیومی در رویه‌های کامپوزیتی با استفاده از آزمون فشار شبه استاتیکی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و مقدار جذب انرژی ویژه(SAE) نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید.

2- ساخت نمونه‌ها

2-1- فوم آلومینیومی

فوم‌های آلومینیومی بصورت بلوک‌های 25 در 25 سانتیمتری و به ضخامت‌های 1، 2 و 3 سانتی‌متر (با تلرانس حدود 2 میلی‌متر) و چگالی $0/38\ g/m^3$ الی $0/53\ g/m^3$ و با میانگین اندازه سلول‌ها حدود 3 میلی‌متر ساخت جهاد دانشگاهی دانشگاه فردوسی تولید شده از آلومینیوم آلیاژی A356 می‌باشند.

2-2- کامپوزیت گلاس-اپوکسی

الیاف بکار برده شده برای ساخت نمونه‌ها الیاف شیشه نوع E با بافت دو بعدی و با خواص طولی و عرضی یکسان و با چگالی سطحی $200g/m^2$ است. برای ساخت ماتریس‌ها از رزین اپوکسی دیگلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ[1] با نام تجاری اپیون 828[2] که دارای استحکام بالای مکانیکی و سازگار با الیاف شیشه می‌باشد استفاده شد. همچنین از سفت کننده سیکلو آلیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اِپیکیور اف. 205[3] استفاده گردید. نسبت مخلوط رزین به سفت کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده 2 به 1 می‌باشد.

2-3- سازه ساندویچ پنل با رویه کامپوزیتی

هنگام ساخت پوسته‌های الیاف شیشه بعد از اتمام فرایند لایه چینی الیاف بلوک‌های فوم آلومینیومی روی لایه آخر با اعمال فشار مناسب، قرار داده شدند. پس از پخت کامل صفحه کامپوزیتی با دقت توسط کمان اره برش داده شده و در نهایت توسط سوهان لبه‌ها گونیا و پرداخت شدند. شکل 1 تصویری از فرایند ساخت ساندویچ پنل‌ها می‌باشد.

2-4- سازه ساندویچ پنل با رویه ورق آلومینیومی

بدین منظور از ورق آلومینیم رده 1100 و به ضخامت 1/5 میلی‌متر استفاده گردید. ابتدا آن‌ها را در حدود ابعاد 4cm×4cm برش داده و سپس لبه‌های آن را صاف و گونیا نموده و در نهایت توسط چسب صنعتی پاتکس[4] (همه کاره) به طرفین بلوک‌های فوم آلومینیومی مطابق شکل 2 چسبانیده شدند.

3- آزمایش تجربی

3-1- آزمایش شبه استاتیکی

آزمایش‌های شبه استاتیکی با دستگاه کشش- فشار دانشگاه تفرش با ظرفیت 15 تن محصول شرکت سنتام انجام شد.

شکل 3 تصاویر دستگاه و نمونه ساندویچی بین فک‌های فشار می‌باشند. سرعت بارگذاری بر نمونه‌ها 10 mm/min در نظر گرفته شد.

Fig. 1 Blocks of sandwich panels with foam aluminum core and glass/epoxy composite surface.

شکل 1 بلوک‌های ساندویچ پنل با هسته فوم آلومینیومی و پوسته کامپوزیتی شیشه/اپوکسی

[1] Diglycidyl Ether Of Bisphenol A (DGEBA)
[2] Epone 828
[3] Epikure F-205
[4] pattex

Fig. 2 Blocks of sandwich panels with foam aluminum core and glass/epoxy composite surface.

شکل 2 بلوک‌های ساندویچ پنل با هسته فوم آلومینیومی و پوسته آلومینیومی

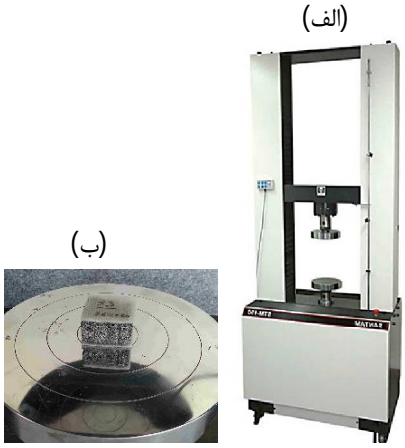

Fig. 3 a) Tension- compression machine b) sandwich panel sample

شکل 3 الف) دستگاه کشش-فشار ب) نمونه ساندویچ پنل

به‌دلیل اینکه در تمامی نمونه‌ها قبل از نیروی 18 KN تخریب کامل رخ می‌دهد و پس از آن فشردگی سلول‌های فوم آلومینیومی در یکدیگر و متلاشی شدن آن‌ها اتفاق می‌افتد و منحنی نمودار نیرو-جابجایی بصورت تابع سهمی یکنواخت افزایش پیدا می‌کرد، بعنوان یک معیار، منحنی تا زمانی که شیب منحنی به ازای 1 mm جابجایی بیشتر از 4 KN گردید، در نظر گرفته شد.

از میان نمونه‌ها، ساده‌ترین ساختار به عنوان آزمایش معیار (2S) انتخاب گردید و نتایج آزمایشها با دو بار تکرار و میانگینی نتایج ارائه گردید (جدول 1).

4- بحث و نتایج

تمامی نمونه‌ها تا نیروی 18 KN به تخریب کامل می‌رسیدند و پس از آن فشردگی سلول‌های فوم آلومینیومی در یکدیگر و متلاشی شدن آن‌ها اتفاق می‌افتد. منحنی نمودار نیرو-جابجایی در این حالت بصورت تابع سهمی یکنواخت اکیداً صعودی افزایش پیدا می‌کرد. بعنوان یک معیار منحنی تا زمانی که شیب منحنی به ازای 1 mm جابجایی بیشتر از 4 KN گردید، در نظر گرفته شد. از میان نمونه‌ها، ساده‌ترین ساختار به عنوان آزمایش معیار (2S) انتخاب گردید.

4-1- بررسی تأثیر تغییر ضخامت فوم آلومینیومی

تأثیر تغییر ضخامت با مقایسه آزمایش‌های 1S با 2S و 3S با 4S انجام شد (شکل 4).

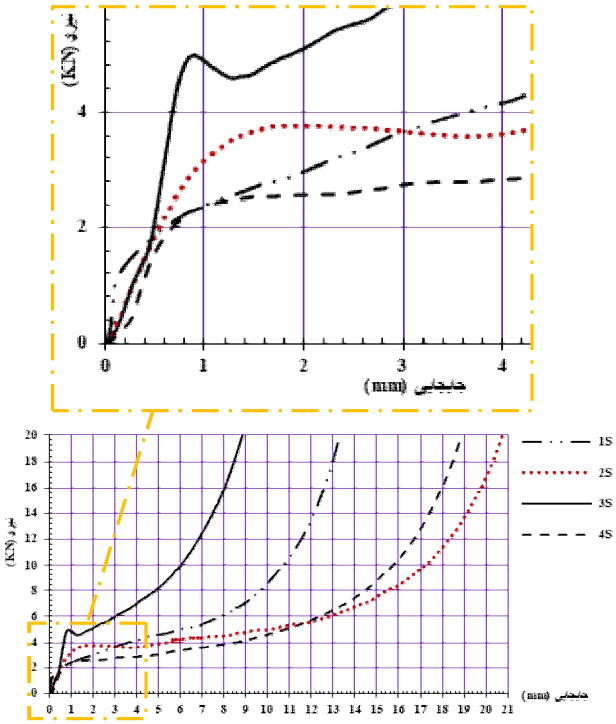

Fig. 4 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 1S, 2S, 3S and 4S samples

شکل 4 منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌های 1S، 2S، 3S و 4S

با مقایسه مقادیر جذب انرژی ویژه (SAE) برای منحنی‌های شکل 4 مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت فوم سبب بزرگتر شدن ناحیه الاستیک خطی و کاهش شیب صعود می‌شود. در نمونه 1S به‌دلیل کمتر شدن مقدار رشد نیرو و درصد تخریب این ناحیه، جذب انرژی و SAE آن کمتر شده است. درانتهای ناحیه دو، به ازای جابجایی یکسان شیب و مقدار نیروی آزمایش 2S کمتر از آزمایش 1S می‌باشد. مقدار جابجایی آن 5% و جذب انرژی آن حدود 19% کمتر شده است. اما در ناحیه سوم سطح نیروی 20 KNتفاوت مقدار تخریب افزایش پیدا کرده در نتیجه جذب انرژی نمونه 2S حدود 55% بیشتر شده اما به سبب افزایش وزن میزان SAE آزمایش 2S تقریباً معادل آزمایش 1S گردید.

Table 1 Structural and physical characteristics of samples before and after Quasi-Static test

جدول 1 مشخصات ساختاری و فیزیکی نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش شبه استاتیکی

کد آزمایش	ضخامت هسته (cm)	چگالی فوم فلزی (g/cm³)	ساختار لایه بالایی ---	&	ساختار لایه پایینی ---	وزن کل (g.)	ضخامت کل سازه (mm)	ضخامت بعد از آزمایش (mm)
1S	2	0/46	---	&	---	14/4	20/4	4/71
2S*	3	0/46	---	&	---	22/3	29/4	5/3
3S	2	0/46	$[0/90]_8$	&	$[0/90]_8$	28	23/5	11/4
4S	3	0/46 0.	$[0/90]_8$	&	$[0/90]_8$	32/9	33/7	12/5
5S	1+2	0/46 ،0/46	$[0/90]_8$	&	$[0/90]_8$	34	33/8	13
6S	3	0/46	$[0/90]_{16}$	&	---	34	32/6	11/3
7S	3	0/46	---	&	$[0/90]_{16}$	29/2	33	10/7
10S	3	0/43	---	&	---	20/5	30	5/6
11S	3	0/6	---	&	---	28	30	7/5
12S	3	0/43	$[0/90]_8$	&	$[0/90]_8$	33/7	33/8	12
13S	3	0/55	$[0/90]_8$	&	$[0/90]_8$	39/2	34	14
26S	3	0/46	ورق آلومینیوم	&	ورق آلومینیوم	35/5	33/8	8/3

بنابراین افزایش 44% ضخامت فوم آلومینیومی به‌دلیل بزرگ شدن مساحت زیر منحنی باعث برتری جذب انرژی و SAE می‌شود ضمن اینکه درصد تخریب در نمونه ضخیم‌تر 6% بیشتر شده است. علت آن حجم تخلل و ظرفیت فشردگی بیشتر سلول‌های فوم آلومینیومی متلاشی شده در یکدیگر و بزرگ تر بودن مساحت ذرات پهن شده می‌باشد. در شکل 5 بزرگ تر بودن پهن شدگی نمونه ضخیم تر نشان داده شده است.

افزایش 44% ضخامت فوم آلومینیومی به‌دلیل بزرگ شدن مساحت زیر منحنی و در نتیجه برتری جذب انرژی و SAE می‌شود ضمن اینکه درصد تخریب در نمونه ضخیم تر 6% بیشتر شده است. علت آن حجم تخلل و ظرفیت فشردگی بیشتر سلول‌های فوم آلومینیومی متلاشی شده در یکدیگر و بزرگ تر بودن مساحت ذرات پهن شده می‌باشد. در شکل 5 بزرگتر بودن پهن شدگی نمونه ضخیم تر نشان داده شده است.

(الف) (ب)

Fig. 5 a) Flatting sample of 2S after destruction b) flatting sample of 1S after destruction.

شکل 5 (الف) پهن شدگی نمونه 2S بعد از تخریب (ب) پهن شدگی نمونه 1S بعد از تخریب

4-2- تأثیر فوم آلومینیومی ساندویچ شده با پوسته‌های کامپوزیتی

تأثیر فوم آلومینیومی ساندویچ شده با پوسته های کامپوزیتی با مقایسه آزمایش‌های 1S با 3S و 2S با 4S انجام شد (شکل 4). مطابق با جدول 1 برای فوم آلومینیومی با ضخامت 20 mm افزودن پوسته‌های کامپوزیتی سبب شده مقدار نیرو و درصد جابجایی در ناحیه الاستیک خطی برای نمونه 3S بیشتر و پیرو آن مقدار SAE حدود 18% افزایش پیدا کند. در ناحیه دوم به ازای جابجایی یکسان، مقدار نیروی تخریب آزمایش 3S بیشتر می‌باشد اما در ناحیه سوم سطح نیروی 20KN به‌دلیل درصد تخریب بیشتر نمونه 1S مقدار جذب انرژی در مقایسه با نمونه 3S ، 17% و به‌دلیل وزن کمتر مقدار SAE دو برابر بیشتر می‌شود. بنابراین ساندویچ شدن فوم آلومینیومی با پوسته شیشه/اپوکسی به ازای جابجایی یکسان در ناحیه دوم جذب انرژی را افزایش می‌دهد و احتمالاً فقط در ناحیه الاستیک خطی باعث افزایش SAE می‌شود و در بقیه سطوح نیرو به سبب وزن پوسته‌ها باعث کاهش آن می‌گردد. علت این کاهش وجود پیوند رزین چسبنده در سلول‌های سطحی فوم و خود ضخامت پوسته مربوطه می‌باشد که درصد تخریب را کم و وزن را اضافه می‌کند.

4-3- تأثیر وضعیت قرار گرفتن پوسته کامپوزیتی

در این آزمایش پوسته کامپوزیتی فقط در یک سمت بلوک‌های فوم آلومینیومی چسبانده شد اما جهت نمایان شدن دقیق‌تر اثر

پوسته، اندازه ضخامت یا تعداد لایه‌ها در وجه مربوطه نسبت به نمونه‌های قبلی دو برابر در نظر گرفته شد. به منظور بررسی این موضوع تحلیل آزمایش نمونه‌های 4S، 6S و 7S با یکدیگر مورد مقایسه قرار داده شدند (شکل 6). وزن مربوط به پوسته الیاف شیشه یک سمت هسته 12گرم محاسبه گردید.

طبق شکل 6 درصد تخریب ناحیه الاستیک خطی نمونه 6S در مقایسه با نمونه 7S تقریباً برابر است اما مقدار SAE در نمونه‌ای که دارای پوسته الیاف شیشه تحتانی هست بیشتر می‌باشد و در ناحیه دوم به ازای مقادیر تخریب یکسان نیروی فروریزش نمونه 6S بیشتر شده است. علت آن می‌تواند اثر تماس سطح پوسته با فک فشاری باشد که سبب توزیع بهتر نیرو در دیواره سلول‌های فوم گردید است. اما در انتهای ناحیه دوم چون درصد تخریبِ نمونه 7S، 7% بیشتر شده و مقدار SAE آن نیز افزایش یافته است. در ناحیه سوم و در سطح نیروی 20 KN جذب انرژی نمونه با پوسته فوقانی زیادتر شده است بنابراین با بررسی مقادیر SAE و درصد جابجایی معادل و مقایسه آن‌ها با اعداد نظیر به نظیرشان در سه ناحیه تعیین شده متوجه می‌شویم که وجود پوسته در وجه بالایی سازه هنگام آزمایش شبه استاتیکی سبب می‌شود به ازای مقادیر جابجایی یکسان نیروی تخریب بیشتر شود (جدول 1).

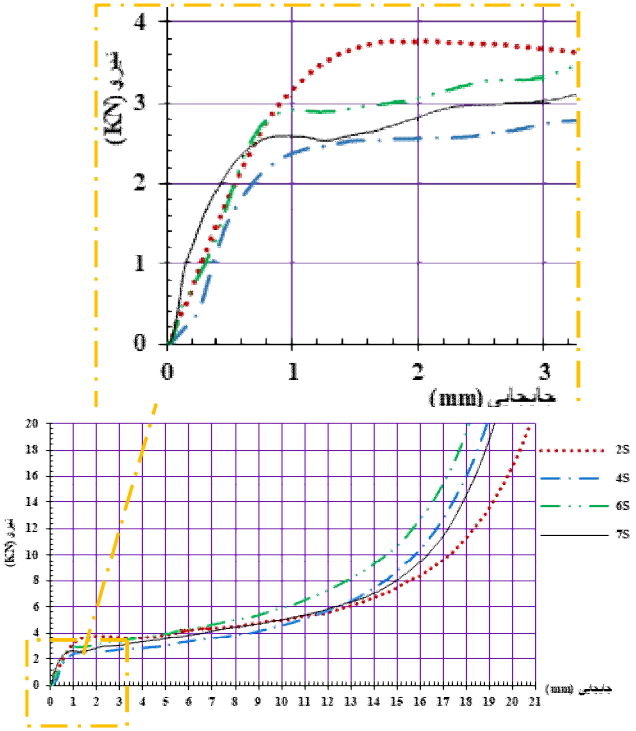

Fig. 6 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 4S, 6S and 7S samples

شکل 6 منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌های 2S، 4S، 6S و 7S

در ضمن فقط در انتهای ناحیه سوم باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد و در مقایسه با نتایج آزمایش 4S ملاحظه می‌شود که وجود پوسته کامپوزیتی بر طرفین هسته نیروی الاستیک در ناحیه اول را کاهش می‌دهد و تا انتهای ناحیه دوم باعث کاهش نیروی فروریزش و درصد تخریب گردیده و جذب انرژی و مقدار SAE کمتر می‌شود.

4-4- تأثیر چند لایه بودن هسته با ضخامت معادل

تأثیر چند لایه بودن هسته با ضخامت معادل توسط مقایسه آزمایش 5S با آزمایش‌های 2S و 4S انجام شد. لایه‌های فوم توسط چسب صنعتی در چهار نقطه با حداقل حجم چسب به یکدیگر متصل شدند. وزن مربوط به پوسته‌های کامپوزیتی برای هر طرف هسته 6/8 گرم محاسبه گردید. باتوجه به شکل 7 درصد تخریب نمونهٔ 5S در ناحیه الاستیک خطی حدود 2% بیشتر از نمونه 4S می‌باشد چون چند لایه بودن هسته سبب شده شیب صعود این ناحیه کمتر و جابجایی آن بیشتر گردد بطوریکه مقدار جذب انرژی آن 40% بیشتر شده است. در ناحیه دوم به ازای تخریب یکسان مقدار نیروی نمونه 5S بیشتر گردید و در نتیجه مقدار جذب انرژی تا اواسط این ناحیه افزایش می‌یابد. اما در انتهای ناحیه دوم مقدار SAE آن به علت عدم یکپارچه بودن هسته 16% کاهش می‌یابد.

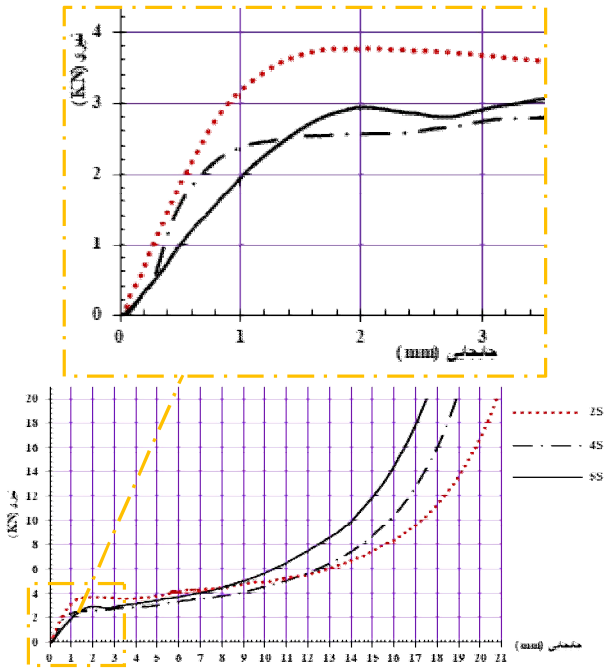

Fig. 7 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 2S, 4S and 5S samples

شکل 7 منحنی‌های نیرو-جابجایی از آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌های 2S، 4S و 5S

در ناحیه سوم تفاوت درصد تخریب هر دو آزمایش کمتر گردیده و مقدار جذب انرژی آن‌ها نزدیک به هم شده است. با مقایسهٔ هر سه نتیجه گرفته می‌شود که اولاً چند لایه شدن هسته فومی خواص SAE را در ناحیه الاستیک خطی تقویت می‌کند چون بشکه ای شدن دیواره سلول‌ها از دو نقطه آغاز شده و سبب افزایش جذب انرژی می‌شود و ثانیاً در ناحیه دوم به‌دلیل عدم یکپارچگی هسته خود مرز جدایش بین لایه‌های هسته فومی عیب و شکست محسوب شده و باعث تضعیف کاهش 3% در SAE می‌گردد.

5-4- تأثیر تغییر چگالی فوم آلومینیومی بدون پوسته

همچنان‌که در شکل 8 و با مقایسهٔ تحلیل داده‌های آزمایش‌های 2S، 10S و 11S می‌توان دید افزایش چگالی به مقدار 0/17 g/cm³ ناحیه الاستیک خطی را بزرگتر کرده و باعث افزایش مقدار SAE می‌شود و در ناحیه الاستیک خطی افزایش چگالی، شیب و میزان نیروی این ناحیه در نمودار نیرو-جابجایی را زیاد می‌کند.

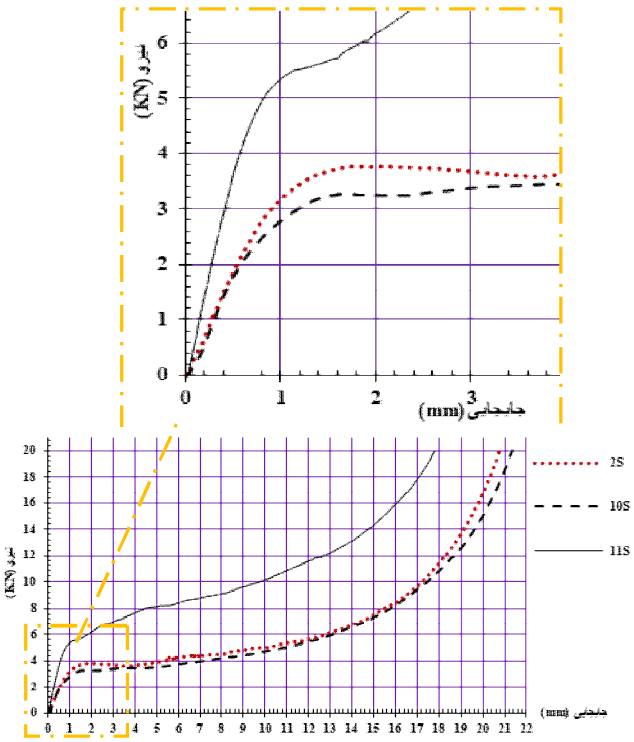

Fig. 8 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 2S, 10S and 11S samples

شکل 8 منحنی‌های نیرو-جابجایی از آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌های 2S، 10S و 11S

اما در محدودهٔ ناحیه دوم به ازای تخریب یکسان، نیروی بیشتری صرف شده اشت. در این ناحیه درصد تخریب نمونه 2S و 10S حدود 20% بیشتر از نمونه 11S شده است در نتیجه مقدار SAE آنها بیش از 44% زیادتر شده است. علت این برتری عدم غلبه حداکثر نیروی این ناحیه به استحکام فشاری دیواره سلول‌های فوم آلومینیومی نمونه 11S است. درواقع افزایش چگالی باعث تقویت نیروی تخریب و کاهش مقدار جابجایی شده است. اما علت برتری SAE نمونه 10S در مقایسه با 2S برتری نسبت استحکام به وزن فوم آلومینیومی می‌باشد[2]. در ناحیه سوم و در سطح نیروی 20 KN جذب انرژی نمونه چون نرخ و درصد تخریب در نمونه 11S افزایش داشته و نیروی تخریب در مقادیر بالاتری روی داده در نتیجه مقدار SAE آن رشد قابل توجهی پیدا کرده و حدود 6% بهتر از نمونه معیار شده است اما نسبت به نمونه 10S، بعلت افزایش چگالی نمونه 11S اجزاء سرامیکی متلاشی شده آن از تراکم پذیری کمتری برخوردار بوده درنتیجه درصد تخریب کمتری داشته و باعث شده است مقدار SAE آن کمتر گردد. در نهایت افزایش چگالی فوم آلومینیومی باعث افزایش نیروی تخریب هسته فومی در هر سه ناحیه می‌شود اما میزان جذب انرژی آن فقط در ناحیه سوم و به مقدار 37% بیشتر می‌شود.

6-4- تأثیر چگالی فوم آلومینیومی در ساندویچ پنل با پوسته دو طرفهٔ کامپوزیتی

بررسی تأثیر چگالی فوم آلومینیومی در ساندویچ پنل با پوسته دو طرفهٔ کامپوزیتی با مقایسه تحلیل داده‌های آزمایش‌های 2S، 4S، 12S و 13S با یکدیگر انجام شده است.

با مشاهده رشد منحنی‌های 12S و 13Sدر شکل 9 نتیجه می‌شود که شیب ناحیه الاستیک خطی برای هر دو نمونه یکسان هست اما نمونه 13S چون چگالی بیشتری دارد درصد تخریب و نیروی الاستیک بالاتری داشته و میزان SAE آن نیز 20% بیشتر شده است.

در ناحیه دوم رشد منحنی 13S به ازای جابجایی یکسان دارای نیروی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها شده است اما در انتهای ناحیه دوم درصد تخریب نمونه 12S حدود 9% بیشتر از نمونه 13S است که علت آن کاهش چگالی یا تراکم پذیری بیشتر هسته و افت نیروی تخریب در این ناحیه می‌باشد و در نتیجه مقدار SAE آن 29% بیشتر از نمونه 13S شده است. اما در ناحیه سوم و در سطح نیروی 20 KN چون نیروی تخریب افزایش داشته است توانسته بر استحکام نهایی نمونه 13S غلبه کند در نتیجه درصد تخریب و جذب انرژی آن زیادتر شده اما

مقدار SAE آن به سبب افزایش چگالی و وزن 12% کمتر ازنمونه 12S شده است.

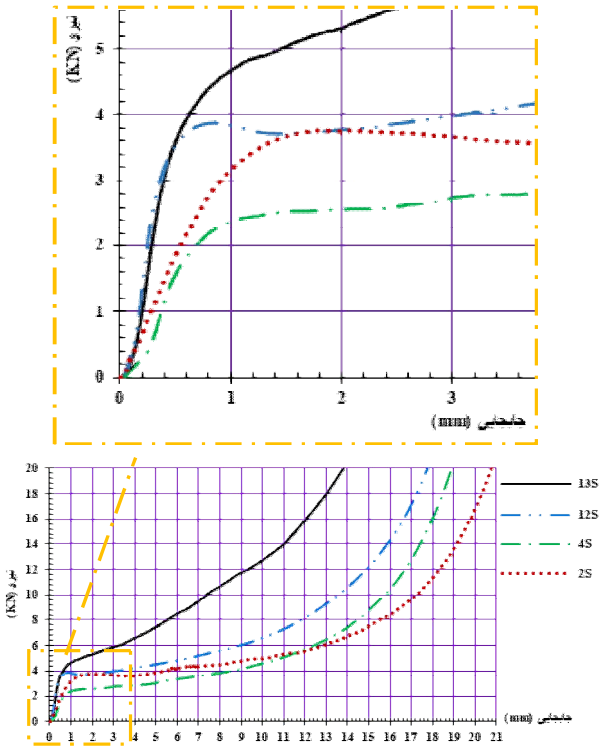

Fig. 9 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 2S, 4S, 12S and 13S samples

شکل 9 منحنی‌های نیرو-جابجایی از آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌ها 2S، 4S، 12S و 13S

بنابراین افزایش چگالی ساندویچ فوم آلومینیومی در پوسته کامپوزیتی باعث افزایش جذب انرژی شده است. نسبت به نمونه بدون پوسته کامپوزیتی جذب انرژی فقط در ناحیه دوم بیشتر گردید. در واقع پوسته‌های کامپوزیتی باعث چنین کاهش‌هایی شده‌اند.

4-7- تأثیر رویه‌های ورق آلومینیومی با وزنِ معادل پوسته‌های کامپوزیتی

در این نمونه‌ها ورق‌های آلومینیومی سری 1050 در 4 نقطه با چسب صنعتی پاتکس به هسته‌های فوم آلومینیومی متصل شدند. تأثیر رویه‌های ورق آلومینیومی با وزنِ معادل پوسته‌های کامپوزیتی با بررسی و مقایسه تحلیل آزمایش نمونه‌های 2S، 4S و 26S انجام شده است. وزن یک صفحه آلومینیومی 6/5 گرم می‌باشد.

با توجه به شکل 10 حداکثر مقدار نیروی ناحیه الاستیک خطی برای آزمایش‌ها به ترتیب 2S، 26S و در آخر 4S می‌باشد و به همین ترتیب مقدار جذب انرژی وSAE آن‌ها برتر شده‌اند.

شاید علت آن، متفاوت بودن توزیع نیرو و نوع تماس سطح با هسته باشد اما در ناحیه دوم به ازای جابجایی یکسان به ترتیب مقادیر نیروی آزمایش 26S و 2S و در آخر 4S زیادتر شده‌اند و به همین ترتیب مقدار جذب انرژی و SAE آن‌ها بیشتر گردیده است که یک مزیت برای پنل‌های آلومینیومی محسوب می‌گردد. علت برتری رویه‌های آلومینیومی در مقایسه با آزمایش 4S نداشتن اتصال رزین اپوکسی با سلول‌های سطحی فوم آلومینیوم جهت امکان پذیری تخریب بیشتر است. در مقایسه با آزمایش 2S شاید دلیل دیگر کم شدن زاویه مخروط اصطکاک در سطح قاعده و توزیع یکنواخت و بهتر نیرو و انتقال همگن موج تنش باشد. در ناحیه سوم همچنین جذب انرژی نمونه 26S بیشتر از سایر آزمایش‌ها شده اما علت کمتر شدن SAE آن نسبت به آزمایش 2S، زیادتر شدن وزن آن به سبب وجود پنل‌ها می‌باشد.

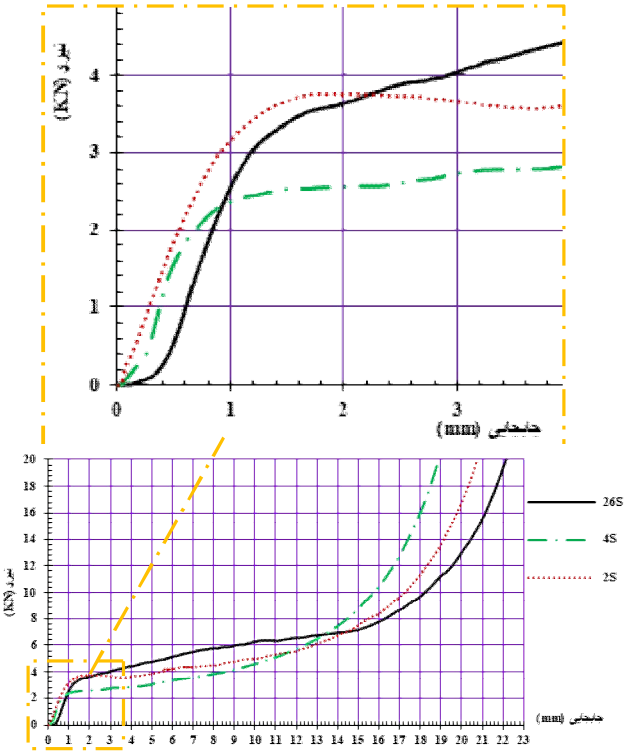

Fig. 10 Force-displacement curves of Quasi-Static experiment of 2S, 4S and 26S samples

شکل 10 منحنی‌های نیرو-جابجایی از آزمایش شبه استاتیکی نمونه‌های 2S، 4S و 26S

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عوامل تأثیر گذار بر رفتار ساندویچ فوم آلومینیومی با رویه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و آلومینیومی تحت بارگذاری شبه استاتیکی (با سرعت بارگذاری 10 mm/s) بطور تجربی بررسی شد و پارامترهایی مانند اثر تغییر ضخامت و

چگالی در هسته، وجود پنل‌ها در یک طرف، مقایسه چند لایه و یکپارچه بودن هسته با ضخامت معادل، تأثیر رویه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با وزن معادل و تأثیر رویه‌های آلومینیومی بر روی میزان جذب انرژی ساندویچ فوم آلومینیومی با رویه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی بررسی شد.

نتایج مقادیر SAE حاصل از آزمایش‌های شبه استاتیکی بر انواع ساندویچ پنل‌های این پژوهش برای نواحی دوم و سوم و در ناحیه سوم در سطح نیروی 20KN در شکل 11 مقایسه شده‌اند.

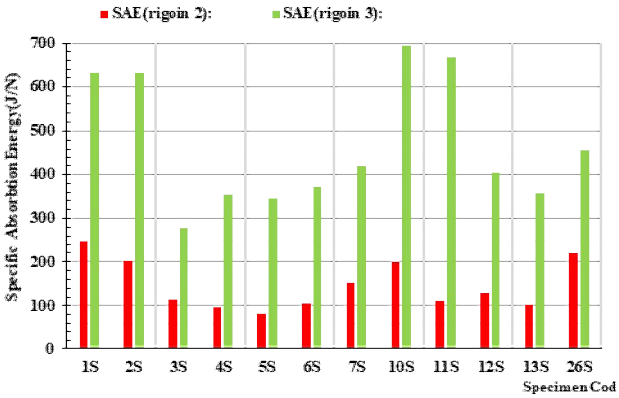

Fig. 11 Comparison of specific absorbed energy (SAE) sandwich panels in 2 and 3 zones of force-displacement diagrams

شکل 11 مقایسه جذب انرژی ویژه (SAE) ساندویچ پنل‌ها در ناحیه دوم و سوم نمودار نیرو-جابجایی

با بررسی تحلیل‌های انجام شده به نتایج زیر می‌توان دست یافت:

- تأثیر افزایش ضخامت فوم آلومینیومی در بارگذاری شبه استاتیکی باعث رشد نیرو در ناحیه الاستیک خطی شد و میزان طول تخریب کل را زیادتر نمود و شیب رشد نمودار در مراحل تخریب را کاهش داد و به طبع آن مساحت زیر منحنی افزایش پیدا کرد. در نتیجه افزایش ضخامت فوم آلومینیومی از 2 cm به 3 cm بین 12% تا 26% باعث افزایش SAE می‌شود.

- ساندویچ فوم آلومینیومی با پوسته کامپوزیتی شیشه/اپوکسی فقط در ناحیه الاستیک خطی SAE را افزایش داد و در ناحیه دوم سبب شد به ازای جابجایی یکسان نیرو و جذب انرژی را افزایش یابد و در بقیه سطوح نیرو باعث کاهش آن شد.

- وجود پوسته در وجه بالایی سبب می‌شود به ازای مقادیر جابجایی یکسان تا اواسط ناحیه دوم، نیروی تخریب بیشتر گردد با این وجود فقط در انتهای ناحیه سوم جذب انرژی آن بیشتر می‌شود. در سایر نواحی وجود پوسته در وجه پایین سازه باعث افزایش بیشتر نیرو و مقدار SAE می‌شود. در مقایسه نسبت به حالتی که در دو طرف سازه ساندویچی پوسته وجود دارد وجود پوسته کامپوزیتی در یک سمت سازه باعث افزایش مقدار SAE می‌شود.

- چند لایه بودن هسته با ضخامت معادل در بارگذاری شبه استاتیکی مقدار SAE در ناحیه الاستیک خطی را بیشتر می‌کند. همچنین در ناحیه دوم در مقادیر جابجایی یکسان شیب نمودار بیشتر می‌شود اما در ناحیه دو و سه باعث کاهش مقدار SAE می‌گردد.

- افزایش چگالی فوم آلومینیومی شیب و مقدار نیروی در ناحیه الاستیک را زیادتر نموده و باعث افزایش مقدار SAE می‌شود اما در کل تا انتهای ناحیه دو درصد تخریب آن کمتر از نمونه‌های کم چگال تر شده و مقدار SAE نیز کمتر می‌شود. در ناحیه سوم شیب و درصد تخریب زیادتر از سایر آزمایش‌ها شده و در نتیجه مقدار جذب انرژی و SAEآن بیشتر می‌شود.

- افزایش چگالی هسته ساندویچ فوم در رویه کامپوزیتی باعث افزایش مقدار SAE در ناحیه الاستیک خطی می‌شود. در ناحیه دوم و در مقادیر نیروی‌های میانی درصد تخریب فوم آلومینیوم با چگالی کمتر حدود دو برابر بیشتر از نمونه با چگال بیشتر شده و در نتیجه مقدار SAE آن بیشتر می‌شود. افزایش چگالی هسته سبب می‌شود تا استحکام نهایی آن نیز زیاد شده و تخریب اصلی در نیروهای نهایی صورت گیرد و جذب انرژی آن نیز در نیروی‌های نهایی بیشتر گردد اما مقدار SAE آن کمتر از نمونه‌های با چگال کمتر می‌شود. در مقایسه با نمونه بدون پوسته کامپوزیتی جذب انرژی آن فقط در ناحیه دو بیشتر شد.

- رویه ورق آلومینیومی با وزنِ معادل رویه کامپوزیتی سبب کاهش نیروی ناحیه الاستیک خطی شد و فقط نسبت به نمونه‌ها با رویه کامپوزیتی نیرو و جذب انرژی بهتر گردید. در ناحیه دوم به ازای جابجایی یکسان، مقدار نیروی این ساختار از سایر نمونه‌ها زیادتر شد و در انتهای این ناحیه و همچنین در ناحیه سوم مقدار جذب انرژی و SAE از سایر ساختارها بیشتر گردید.

6- مراجع

[1] Michael Ashby Tony Evans NA Fleck J.W. Hutchinson H.N.G. Wadley L. J. Gibson, 2001 "Metal Foams: A Design Guide". Vol. 1st Edition. 251.

[2] Thornton, P.H. And Magee, C.L., 1975. "Deformation CharacteriSticS of Zinc Foam." Metallurgical TranSactionS A.Vol. 6(9), 1801-1807.

[3] Zenkert, D., 1995; "An Introduction To Sandwich ConStruction. Sheffield: Engineering MaterialS-

AdviSory ServiceS". Ltd.

[4] I, W., Hall, M, G., And C, J., Yu, 2000. "CruShing of Aluminum CloSed Cell FoamS: DenSity And Strain Rate EffectS." Scriptamat, 515-521.

[5] Alavinia, A. and FarShad, A., 2014. "Experimental And Numerical InveStigationS of EffectS of Section Geometry and Metallic Foam Filler on Deformation and Energy AbSorption CharacteriSticS of Thin-Walled TubeS." Journal of Solid And Fluid MechanicS. Vol. 4(1), 51-63. (In PerSian فارسی)

[6] IK.ImielińskaaL.GuillaumatbR.WojtyracM.Castaing sd, 2008. "Effects of Manufacturing and Face/Core Bonding on Impact Damage in Glass/Polyester–PVC Foam Core Sandwich Panels." Composites Part B: Engineering.Vol 39(6), 1034-1041.

[7] Jilin Yu, Erheng Wang, Jianrong Li, Zhijun Zheng, 2008. "Static And Low-Velocity Impact Behavior of Sandwich Beams With Closed-Cell Aluminum-Foam Core In Three-Point Bending." International Journal of Impact Engineering. Vol 35(8), 885-894.

[8] Alvandi-Tabrizi, Y. and Rabiei, A., 2014. "USe of CompoSite Metal Foam For Improving AbSorption of ColliSion ForceS." Procedia MaterialS Science. Vol. 4, 377-382. (in PerSian فارسی)

[9] ReyeS, G., 2008. "Static And Low Velocity Impact Behavior of CompoSite Sandwich PanelS With An Aluminum Foam Core." Vol. 42, 1659-1670.

[10] Taghipoor, H. and Damghani Noori, M., 2018. "Experimental InveStigation of Energy AbSorption In Foam Filled Sandwich BeamS With Expanded Metal Sheet aS Core Under QuaSi-Static Bending". Vol. 18, 126-134. (in PerSian فارسی)