



مطالعه تجربی و عددی جذب انرژی در پانل‌های ساندویچی با هسته‌ی دوزنقه‌ای پر شده از فوم تحت بارگذاری شبه استاتیکی

حسین تقی‌پور¹، کرامت ملک‌زاده فرد^{2*}

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

2- استاد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 123456789، k.malekzadeh@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: 96/4/17

تاریخ پذیرش: 96/6/26

کلیدواژگان:

جذب انرژی

هسته دوزنقه‌ای مرکب

بارگذاری شبه استاتیکی

فوم پلی‌یورتان سخت

شبیه‌سازی عددی

چکیده

در این پژوهش تاثیر روش پرکردن هسته‌های موجدار دوزنقه‌ای شکل دو لایه، با فوم‌های پلی‌یورتان از نوع سخت با وزن سبک، مورد مطالعه قرار گرفته است. پنج نوع هسته موجدار از جنس آلومینوم به صورت خالی و پر شده از فوم، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به صورت فشاری تک محوره قرار گرفته‌اند. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس به بررسی پارامترهای ضربه‌پذیری، شامل جذب انرژی ویژه، بعنوان اهداف آزمایش پرداخته شده است. این نوع سیستم جاذب انرژی، می‌تواند در صنایع هوایی، کشتی سازی، خودروسازی، صنایع ریلی و آسانسورها جهت جذب انرژی ضربه مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی، نشان از همپوشانی بالا و تطابق خوب دو روش با هم دارد. نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود و آزمایشگاهی نشان داد، که به کارگیری فوم در هسته، می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق هسته تا دو برابر، جذب انرژی ویژه را به میزان 509.47٪ افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش‌های محوری نشان داد که ظرفیت جذب انرژی ویژه در پانل ساندویچ تقویت شده با فوم در مقایسه با پانل توخالی، 91.42٪ افزایش یافته است. همچنین، هسته دو لایه در پانل موجب افزایش جذب انرژی ویژه تا 81.42٪ می‌شود. در انتها پارامترهای هندسی مناسب، و بهترین نمونه‌ها از لحاظ معیارهای در نظر گرفته شده با توجه به اهداف طراحی، معرفی می‌شوند.

Experimental and numerical study of energy absorption in foam filled trapezoidal core sandwich panels subjected to quasi-static loading

Hossein Taghipoor¹, Keramat Malekzade Fard^{2*}

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

2-Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran.

*P.O.B 123456789, Tehran, Iran, k.malekzadeh@mut.ac.ir.

Keywords

Energy absorption
Trapezoidal Compound core
Quasi-static loading
Rigid polyurethane foam
Numerical simulation

Abstract

In this research, influence of foam filling technique in double layer trapezoid-shape corrugated core by using lightweight rigid polyurethane foam is investigation. Five types of Aluminum corrugated cores both bare and foam-filled were subjected to unidirectional quasi-static compression. In the following, using numerical simulation by Abaqus software 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. The FEM results are compared with Experimental results which reveal a good conformity. FEM and experimental results showed that foam filling technique can significantly increase specific absorbed energy. Results show that the increase in core sheet thickness up to two times increases the specific energy absorption by 509.47%. The results of axial crushing tests showed that the SEA of foam-filled sandwich panel increased by 91.42%, comparing to the hollow panel. Also, double-layered core in the panel caused to increase the specific energy absorption by 81.42%. Finally, appropriate geometric parameters and the best examples of criteria considered with respect to the objectives, are introduced.

1- مقدمه

پانل‌های ساندویچی با هسته‌های دوزنقه‌ای، جذب مقادیر زیادی از انرژی را در نیروهای وارده نسبتاً کم، همراه با تغییر شکل‌های بزرگ میسر می‌سازد. این پانل‌ها؛ 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

پانل‌های ساندویچی به دلیل دارا بودن وزن کم و مکانیزم فروریزش همگن و مناسب، دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. این نوع از جاذب‌ها در صنایع خودروسازی، قطارها، هواپیماها و... کاربرد دارند.

Please cite this article using:

Taghipoor, H. and Malekzade Fard, K., "Experimental and numerical study of Energy Absorption in foam filled Trapezoidal core sandwich panels subjected to quasi-static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 565-574, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

پرداخته‌اند. که نتایج بدست آمده نشان دهنده این مطلب بوده که خاصیت مقاومت فشاری در کامپوزیت‌های مختلف در مقایسه با لانه زنبوری و فوم‌های معمولی بیشتر بوده و هسته‌های موجدار از جنس پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن خواص مشابه‌ای با لانه زنبوری آلومینیومی دارد.

علوی‌نیا و صدیقی [22] و همچنین زارعی و صدیقی [23] به بررسی آزمایشگاهی پاسخ مکانیکی لانه زنبوری خالی و پر شده از فوم پلی‌یورتان، تحت بارگذاری فشاری پرداختند. آنها از فوم‌های پلی‌یورتان 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 مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند.

در مقاله حاضر به بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای، تحت بارگذاری شبه استاتیکی، به صورت تجربی و عددی پرداخته شده است. اثر تغییر پارامترهای هندسی از نظر ضخامت صفحات در هسته و اثر این پارامتر بر میزان جذب انرژی بررسی می‌شود. در ادامه با دولا به کردن هسته دوزنقه‌ای پانل ساندویچی آلومینیومی، به همراه اضافه شدن فوم پلی‌یورتان با دو چگالی مختلف پرداخته شده است. رفتار بهبود یافته پانل پر شده از فوم پلی‌یورتان با نمونه بدون فوم مقایسه شده است. در پایان به محاسبه کلیه شاخص‌های مهم در تحلیل جذب‌های انرژی پرداخته و نتایج با شبیه‌سازی عددی مقایسه می‌شود.

2- تحلیل آزمایشگاهی

برای ساخت تمامی نمونه‌ها، از ورق‌های آلومینیومی سری 1100 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 آلومینیومی بدست آمده، رسم شده است.

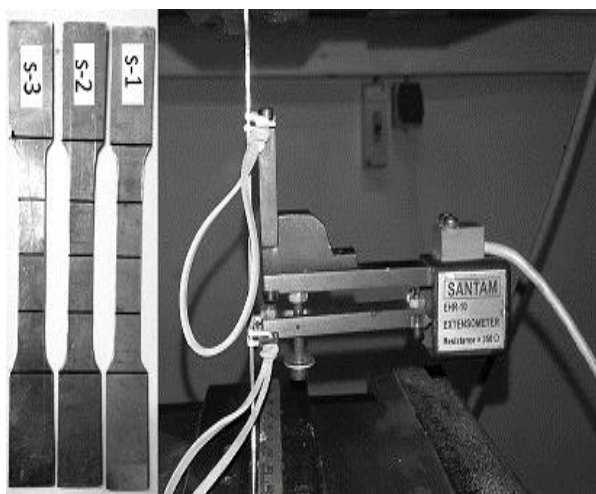


Fig. 1 Aluminum sheet tensile test

شکل 1 تست کشش ورق آلومینیومی

متصل می‌کنند. طراحی 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 آلومینیومی و همچنین انواع فوم‌های پلیمری یکی از کاربردی‌ترین نوع پانل‌های ساندویچی در ساخت جاذب‌ها به شمار می‌آیند. هسته‌های فومی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که خواص 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].

در این راستا کلیچ اصلان و همکارانش [5-7]، به بررسی هسته دوزنقه‌ای چند لایه آلومینیومی تحت پاسخ ضربه محلی با هندسه ضربه زنده‌های کروی، مخروطی و سر تخت پرداخته‌اند، که براساس این بررسی صورت گرفته مشاهده شده که چند لایه‌ای کردن لایه‌های هسته تنش کم‌انرژی را کاهش و تراکم کرنش را افزایش داده است. دو حالت اصلی لهیدگی از روش تجربی و عددی یکی پیشروی چین خوردگی بال‌ها و دیگری بریده شدن صفحات میانی آلومینیومی مشاهده شده است. نمونه‌های بدون صفحات میان لایه‌ای با راستای هسته 0.90 تنش کم‌انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های با راستای هسته 0.0 را نشان داده است. پانل‌های تست شده با ضربه‌زنده کروی و تخت که نسبت به ضربه‌زنده مخروطی در نمونه‌ها نفوذ نکرده نیروی تغییر شکل و جذب انرژی اندکی بیشتر را نشان داده‌اند. یحیا و همکاران [8] تأثیر شکل هسته پانل را بر تغییر شکل آن در اثر اصابت پرتابه فوم آلومینیوم با سرعت‌های مختلف مطالعه کردند.

نوریک و همکاران [9] تأثیر ارتفاع هسته، ضخامت رویه و برهم کنش اجزای پانل را بر مودهای تخریب آن بررسی کردند و نمونه با بیشترین میزان در جذب انرژی را معرفی کردند. وادلی و همکاران [10] تغییر شکل و شکست پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار مثلثی، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند. رفتار بالستیکی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری در مقالات متعددی بررسی شده است [11-13].

یان و همکارانش [14-16] 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 فرو ریزش می‌کنند از دیگر نتایج می‌توان از اثر مفید اضافه کردن فوم هنگام فرو ریزش صفحات خالی به وسیله کم‌انرژی اولیور الاستیک، 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، t/L اثر مقاومتی فوم به تدریج کاهش پیدا می‌کند. موهود مت رجب و همکارانش [17-21] به بررسی رفتار مکانیکی سازه ساندویچی با هسته‌های موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی در یک زاویه مشخص از جنس آلومینیوم و کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر کربن تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و ضربه سرعت پایین به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی

مطابق شکل 5، 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 شکل 6 و شکل 7 ارائه شده است. نتایج تست و خواص فوم در جدول 3 نشان داده شده است.



Fig. 3 The composition and production of polyurethane foam
شکل 3 ترکیب و ساخت فوم پلی‌یورتان

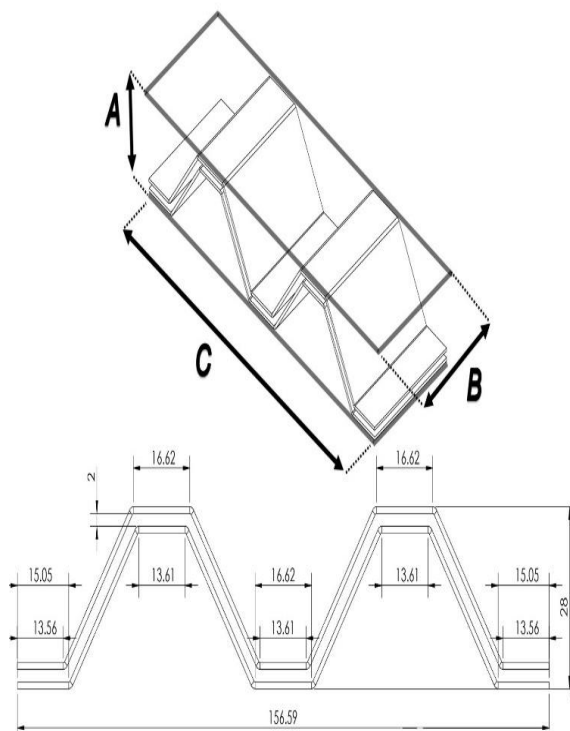


Fig. 4 A schematic view of the sandwich panel sample, height (A), Width (B), and length (C)
شکل 4 نمایی شماتیک از پانل ساندویچی، ارتفاع (A)، عرض (B) و طول (C)

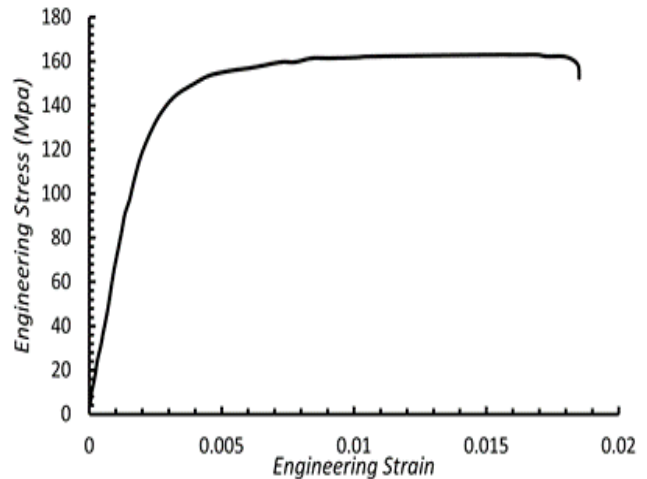


Fig. 2 Engineering stress versus engineering strain curve for aluminum (sheet (substrate and core

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

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم

Table 1 Properties of aluminum.

مقادیر	خصوصیات مکانیکی
69	مدول الاستیک $E(Gpa)$
0.33	ضریب پواسون ν
111.3	تنش تسلیم $\sigma_y(Mpa)$
162.27	تنش نهایی $\sigma_u(Mpa)$
2700	چگالی $\rho(kg/m^3)$

برای ساخت هسته های موجدار در زاویه های 50 درجه و ضخامت های 0.5 و 1.1 از دستگاه خم کن دستی استفاده شده است. تمامی هسته های موجدار ساخته شده از لحاظ ابعادی یکسان بوده و دارای ارتفاع هسته 30 میلیمتر و 156 میلیمتر طول و عرض 80 میلیمتر است، که مشخصات نمونه ها در جدول 2 نشان داده شده است.

همچنین نمونه پانل های ساندویچی مورد آزمایش به صورت شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است.

با توجه به کم بودن ضخامت صفحات مورد استفاده در این مطالعه، امکان جوش دادن ورقه ها و یا استفاده از جوش نقطه ای، به دلیل ابعاد کوچک نمونه ها میسر نبوده از این رو از چسب مخصوص آلومینیوم برای اتصال هسته موجدار به صفحات بالا و پایین استفاده شده است.

در این مطالعه از دو نوع فوم سلول بسته پلی یورتان، با چگالی های $160 (kg/m^3)$ و $320 (kg/m^3)$ استفاده شده است. همانطور که در شکل 3 مشاهده می کنید با ترکیب دو ماده ایزوسیانات و پولیول با درصد وزنی مشخص، فوم پلی یورتان با چگالی مورد نظر بدست آمد. خواص فیزیکی و مکانیکی فوم سلول بسته پلی یورتان، با ابعاد استاندارد 50 در 50 میلیمتری

جدول 2 ابعاد هسته ها و صفحات بالایی و پایینی پانل های ساندویچی

Table 2 The geometric dimensions of the core and upper and lower plates in sandwich panels.

زاویه θ	نوع هسته	ابعاد صفحات بالایی و پایینی پانل (mm)	ضخامت دیواره هسته (mm)	عرض B (mm)	طول C (mm)	ارتفاع هسته A (mm)	نمونه
50	موجدار دوزنقه‌ای	$80 \times 156 \times 2$	1.1	80	156	30	SC-1
50	موجدار دوزنقه‌ای مرکب	$80 \times 156 \times 2$	0.5	80	156	30	DC-0.5
50	موجدار دوزنقه‌ای مرکب	$80 \times 156 \times 2$	1.1	80	156	30	DC-1.1
50	موجدار دوزنقه‌ای مرکب تقویت شده	$80 \times 156 \times 2$	1.1	80	156	30	DC-1F
---	فوم پلی‌یورتان	$80 \times 156 \times 2$	---	80	156	30	CF

جدول 3 خواص فیزیکی و مکانیکی فوم پلی‌یورتان

Table 3 Mechanical properties of polyurethane foam

چگالی میانگین ρ (Kg / m ³)	مدول الاستیک E (Mpa)	ضریب پواسون	تنش فشاری هیدرواستاتیک σ_{hc} (Mpa)	تنش کششی هیدرواستاتیک σ_{ht} (Mpa)	تنش کششی تک محوره σ_{tt} (Mpa)	تنش فشاری تک محوره σ_{uc} (Mpa)
160	71.31	0	[24]1.863	[25]1.986	2.8	2.1
320	240.12	0	[24]7.776	[25]5.64	8.2	8.6

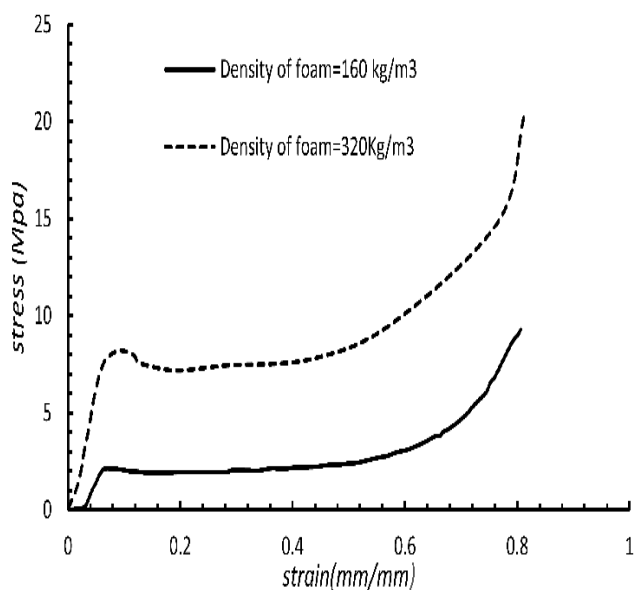


Fig. 6 Stress-strain curve in uniaxial compression test on Polyurethane Foam

شکل 6 نمودار تنش بر حسب کرنش تست فشار تک محوره بر روی فوم پلی‌یورتان



Fig. 5 Polyurethane foam samples under uniaxial compression test

شکل 5 نمونه فوم پلی‌یورتان تحت آزمایش فشار تک محوره

منحنی سخت شوندگی می‌بایست تنش تسلیم فشاری یک محوره را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک متناظر توصیف نماید. رفتار تسلیم اولیه از دو پارامتر که در نرم‌افزار آباکوس نیز وارد می‌شود، تبعیت می‌کند. یکی از پارامترها نسبت تنش تسلیم اولیه در فشار تک محوری به تنش تسلیم در فشار هیدرواستاتیک است. پارامتر دوم نسبت تنش تسلیم کشش هیدرواستاتیک به تنش تسلیم در فشار هیدرواستاتیک است، که با K و K_t معرفی می‌شود. پارامتر α نشان دهنده فاکتور شکل بیضی تسلیم می‌باشد، که مقدار نسبی محورها را مشخص می‌کند [26].

$$\alpha = \frac{3K}{\sqrt{(3K_t + K)(3 - K)}} \quad (1)$$

$$K = \frac{\sigma_{uc}^0}{\sigma_{hc}^0} \quad (2)$$

$$K_t = \frac{\sigma_{ht}^0}{\sigma_{hc}^0} \quad (3)$$

در روابط 1 تا 3، σ_{ht}^0 تنش تسلیم در کشش هیدرواستاتیک، σ_{hc}^0 تنش تسلیم فشار هیدرواستاتیک و σ_{uc}^0 تنش تسلیم فشار تک محوری است. صفحات آغازگر و نگه‌دارنده پانل که در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد از نوع جسم صلب و بدون تغییر شکل در نظر گرفته شده است. در حالی که آغازگر با جابجایی در امتداد محور با سرعت 10 mm/min توصیف می‌شود. بنابراین هیچ اثر اینرسی و نرخ کرنشی در نتایج تاثیر گذار نبوده و از اثرات دینامیکی نیز صرف‌نظر شده است.

در تعریف خصوصیات تماسی که یکی از مهمترین بخش‌ها در مدل سازی است، تماس بین آغازگر صلب و همچنین سطح صلب مقید شده در پایین پانل را با دو صفحه بالایی و پایینی نمونه، به صورت بدون اصطکاک تعریف شده است. در بررسی‌های تجربی همان‌طور که در شکل 9 نمایش داده شده، دو سطح بالا و پایین پانل با نوعی روان‌کننده به منظور از بین بردن اصطکاک آغشته شده‌اند.



Fig. 9 Sandwich panels coated with a lubricant
شکل 9 سطوح پانل ساندویچی پوشیده شده با روان‌کننده

سایر سطوح از جمله سطح فوم با ورقه‌های هسته آلومینیومی و سطح هسته‌های آلومینیومی، با یکدیگر و سطوح بالایی و پایینی پانل، از نوع تماس کامل با ضریب اصطکاک پنالته 0.35 در نظر گرفته شده است.

⁴ Crushable foam

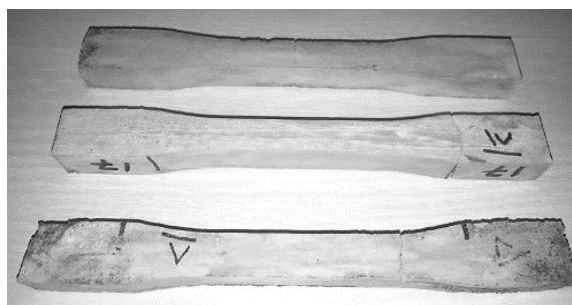


Fig. 7 Polyurethane foam tensile test samples

شکل 7 نمونه آزمایش کشش فوم پلی‌یورتان



Fig. 8 A view of the Santam tension and compression testing machine

شکل 8 نمای از دستگاه تست کشش و فشار سنتام

کلیدی تست های فشاری شبه استاتیکی انجام شده بر روی سازه ساندویچی موجدار خالی، پر شده با فوم پلی‌یورتان و پانل با هسته فوم پلی-یورتان خالی، با استفاده از دستگاه سنتام STM-400 انجام شده، که در شکل 8 مشخص است. همه نمونه ها تحت فشار شبه استاتیکی با سرعت 10 mm/min قرار گرفته‌اند.

3- شبیه سازی عددی

در بررسی عددی نمونه‌های مورد آزمایش، از نرم‌افزار تحلیلی آباکوس استفاده شده است. نمونه‌ها با تغییر شکل غیر خطی مدل شده است، و به صورت دینامیک صریح تحلیل می‌شوند.

از المانهای صفحه‌ای¹ (S4R) برای مدل سازی هسته آلومینیومی دوزنقه-ای استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی فوم پلی‌یورتان از المان سه بعدی² (C3D10M) و از نوع فوم‌های قابل فروریزش⁴ با کار سختی استفاده شده است، که مشخصات آن در جدول 3 نشان داده شده است.

¹ Shell

² Solid

³ 10-node modified quadratic tetrahedral second order elements

4- نتایج و بحث

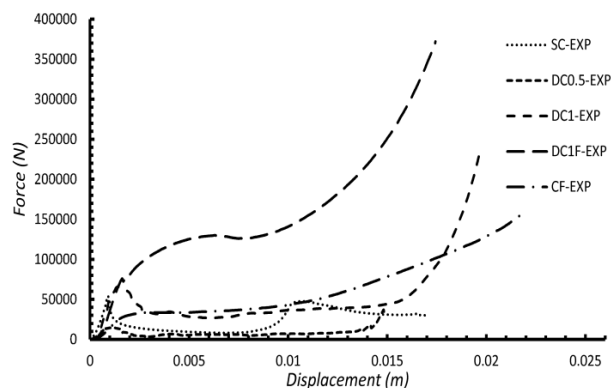


Fig. 11 A comparison between the experimental force-displacement curves for all sandwich panels in a view.

شکل 11 مقایسه منحنی نیرو - جابجایی بدست آمده از تست‌های تجربی برای تمامی پانل‌های ساندویچی در یک نما.

5- محاسبه پارامترهای مهم در جذب انرژی

نیروی پیک اولیه (P_{peak})، نیروی میانگین (P_m)، ظرفیت جذب انرژی (E_a) و ضریب شکل (η)، پارامترهایی هستند که برای سنجیدن خواص جذب استفاده می‌شوند. به علاوه پارامتر دیگری نیز وجود دارد که از اهمیت بالایی در بررسی جذبها برخوردار می‌باشد. انرژی جذب شده بر واحد وزن (SEA) می‌باشد.

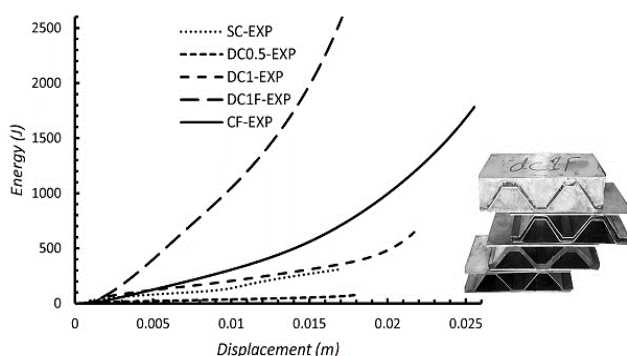


Fig. 12 A comparison between the energy-displacement curves for sandwich panels in experimental

شکل 12 مقایسه بین تمامی نمودارهای انرژی-جابه‌جایی تجربی برای پانل‌های ساندویچی

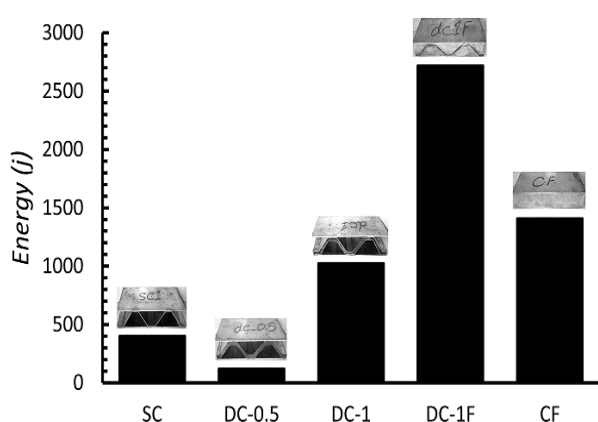
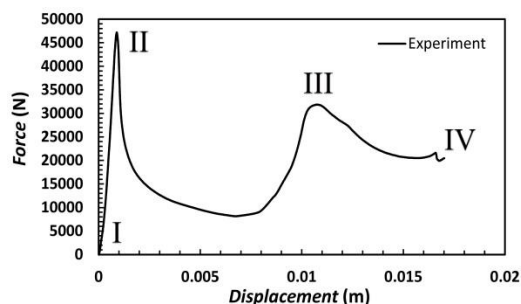


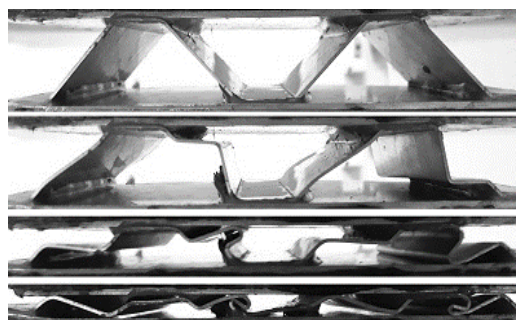
Fig. 13 Effect of cores on energy absorption.

شکل 13 نمودار میله ای اثر نوع هسته بر روی مقدار جذب انرژی.

در بررسی فروریزش نمونه با هسته ساده تک لایه، مطابق نمودار نیرو-جابجایی شکل 10 الف، مشاهده می‌شود نیرو تا بارکمانشی (نیروی بیشینه⁵) یا همان ناحیه II، منحنی یک رفتار خطی از خود نشان می‌دهد، و تا شروع فروریزش نیرو افزایش پیدا می‌کند. بعد از رسیدن نیرو به نقطه اوج خود، هسته موجدار دچار خمش جزئی می‌شود، که این نشان دهنده کاهش استحکام کلی نمونه می‌باشد. بعد از این مرحله، بار مورد نیاز برای تغییر شکل نمونه به طور چشمگیری کاهش یافته که ناشی از انتشار کمانش موضعی در طول هسته موجدار می‌باشد که پاسخ نمونه رفتاری غیر خطی را از خود نشان می‌دهد. در ادامه به دلیل افت ناگهانی در بار وارده، سازه ثبات خود را به دلیل کمانش پلاستیک از دست می‌دهد. در ادامه، بعد از کمانش، مجدداً ظرفیت تحمل بارگذاری در سازه هسته مطابق شکل 10 ب، افزایش پیدا می‌کند و نمودار تا ناحیه III افزایش می‌یابد. سرانجام در ناحیه IV، هسته موجدار به طور کامل متراکم می‌شود. در شکل 11 مقایسه کلی صورت گرفته در نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها را شاهد هستیم. این شواهد نشان می‌دهد که تاثیر اضافه کردن فوم پلی‌یورتان در داخل سلول‌های هسته موجدار دوزنقه‌ای، از کاهش شدید میزان نیرو بعد از نقطه اوج جلوگیری می‌کند. همچنین با مقایسه نمودارها با یکدیگر مشاهده می‌شود که مکان نقطه اوج در پانل تقویت شده با فوم پلی-یورتان نسبت به حالت بدون فوم و تنها هسته موجدار مرکب، با جابجایی بیشتری به نیروی پیک یا قله اولیه رسیده است، که به عنوان جذب انرژی بسیار مطلوب است.



(a)



(b)

Fig. 10 a) Force-displacement Diagram for trapezoidal corrugated core sandwich structures with an angle of 50 degrees and a thickness of 1.1 mm b) collapse of the structures in experimental test.

شکل 10 الف) نمودار نیرو بر حسب جابجایی سازه ساندویچی با هسته موجدار دوزنقه ای با زاویه 50 درجه و ضخامت 1.1 میلیمتر (ب) مراحل فروریزش سازه در آزمایش تجربی.

⁵ Peak force

بالا رفتن ضریب شکل دارد که با بالا رفتن ضریب شکل در واقع نیروی بیشینه به نیروی متوسط نزدیک شده که حالتی ایده‌آل برای جاذب‌های انرژی محسوب می‌شود.

در نمودارها، دو تحلیل عددی و تجربی با هم مقایسه شده است. نتایج نشان از همپوشانی بالای نتایج عددی و تجربی با هم دارد. بررسی‌های عددی با صرف هزینه و زمان کمتر در مقایسه با آزمایشات تجربی می‌تواند در بررسی پارامترهای موثر مفید واقع شوند.

با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی، اختلاف بیشترین و کمترین مقدار در جذب انرژی بین دو نمونه (DC-1F) و (DC-0.5)، برابر 93٪ بود، در حالی که این اختلاف در آزمایشات تجربی حدود 95٪ مشاهده شد. این اختلاف با توجه به عیوب ذاتی مواد مورد استفاده در ساخت پانل‌های ساندویچی و نحوه اتصال هسته به صفحات بالایی و پایینی پانل ایجاد شده است.

6- نتیجه گیری

از بررسی‌های انجام گرفته نتایج زیر حاصل شد.

1- یکی از مهمترین پارامترهایی که در این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت، نوع هسته پانل ساندویچی بود. نتایج نشان از افزایش 155.42 درصدی میزان جذب انرژی و افزایش 81.42 درصدی ظرفیت جذب انرژی ویژه، در استفاده از هسته مرکب به جای هسته تک لایه با ضخامت برابر را می‌دهد. همچنین با استفاده از هسته مرکب میزان نیروی متوسط 136.86 درصد افزایش می‌یابد.

2- جاذب‌های ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای معرفی شده، دارای وزن کمی هستند و انرژی زیادی را جذب می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نوع جاذب‌ها دارای بازده انرژی بالایی هستند. همچنین در مقایسه بین هسته تک لایه و هسته مرکب، مشاهده شد که با افزایش ضریب شکل یا بازده نیروی لهدیگی، مقدار انرژی ویژه هم افزایش می‌یابد.

3- با افزایش 2 برابری مقدار ضخامت صفحات در هسته دولایه، در پانل‌های ساندویچی مقدار جذب انرژی افزایش 631.62 درصدی را نشان می‌دهد و مقدار نیروی بیشینه هم افزایش می‌یابد که نشان دهنده یک رابطه خطی بین آن‌ها می‌باشد.

4- جاذب‌های انرژی ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای دولایه به دلیل شکل سازه‌ای که دارند، دارای مکانیزم فروریزش متقارن و همگن در هسته می‌باشند. همچنین در این نوع جاذب‌ها نیروی بیشینه اولیه مقدار کمی دارد و به نیروی میانگین نزدیک است. محاسبه‌ی ضریب شکل یا بازده نیروی لهدیگی بیانگر همین موضوع است. از ضریب شکل‌های محاسبه شده این نتیجه حاصل می‌شود که جاذب‌های انرژی ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای دولایه دارای بازده بالایی در میزان جذب انرژی هستند.

5- تقویت هسته با فوم پلی‌یورتان با توجه به افزایش محدود در وزن سازه، میزان جذب انرژی را 165 درصد بهبود می‌بخشد، و میزان ظرفیت جذب انرژی ویژه را تا 91.42 درصد افزایش می‌دهد.

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. ضریب شکل، از نسبت نیروی میانگین بر نیروی پیک اولیه بدست می‌آید. نتایج محاسبه شده از آزمایش تجربی و میزان درصد خطای نتایج با تحلیل عددی در جدول 4 آورده شده است [27].

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (4)$$

$$P_m = \frac{E_a}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{peak}} \quad (6)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (7)$$

در شکل 12، نمودار انرژی-جابجایی برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است، و در شکل 13 نمودار میله‌ای میزان جذب انرژی نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد پانل با هسته مرکب و ضخامت صفحات هسته برابر 0.5 میلیمتر، با مقدار 140.34 ژول، کمترین میزان جذب انرژی را در میان نمونه‌ها دارد، مقدار بدست آمده از حالت هسته ساده، با جذب انرژی برابر 401.98 ژول، نیز کمتر است و این تاثیر مؤثر ضخامت را نشان می‌دهد.

از طرفی پانل ساندویچی با هسته فوم خالی، با 1410.66 ژول جذب انرژی، در رتبه دوم جذب انرژی، بعد از هسته مرکب تقویت شده با فوم قرار دارد.

ظرفیت جذب انرژی ویژه، نمونه دو لایه (DC-1) در مقایسه با نمونه مشابه تک لایه (SC)، 81.42٪ افزایش پیدا کرده است. از طرفی ظرفیت جذب انرژی ویژه در نمونه دو لایه با ضخامت صفحات 1 میلیمتر (DC-1)، در مقایسه با نمونه دولایه با ضخامت صفحات 0.5 میلیمتر (DC-0.5)، 509.47٪ افزایش پیدا کرده است.

همچنین نمونه تقویت شده از فوم (DC-1F) در مقایسه با نمونه مشابه خالی (DC-1)، افزایش 91.42٪ در میزان SEA را تجربه کرده است. با مقایسه بین نتایج حاصله از تغییرات ایجاد شده در راستای بهبود ظرفیت جذب انرژی، به ترتیب پارامتر ضخامت هسته، پر کردن هسته با فوم و دولایه کردن هسته بیشترین تاثیر را نشان داده‌اند.

نمودارهای شکل 14 اثر هسته‌های مرکب، ضخامت هسته و تقویت هسته با فوم پلی‌یورتان را در میزان جذب انرژی و نیروی اوج نشان می‌دهد. نمونه هسته تک لایه (SC) با ضریب شکلی برابر 0.43 کمترین میزان ضریب شکل را به خود اختصاص داده است، این نمونه در مقایسه با نمونه با هسته فوم خالی (CF)، 78.6٪ در میزان ضریب شکل کاهش پیدا کرده است.

همچنین ضریب شکل پانل، با هسته دولایه یک میلیمتری و پر شده از فوم (DC-1F) در مقایسه با نمونه مشابه خالی (DC-1)، 50.58٪ افزایش پیدا کرده است، این نتایج نشان از تاثیر اضافه شدن فوم در کاهش نیروی بیشینه اولیه و

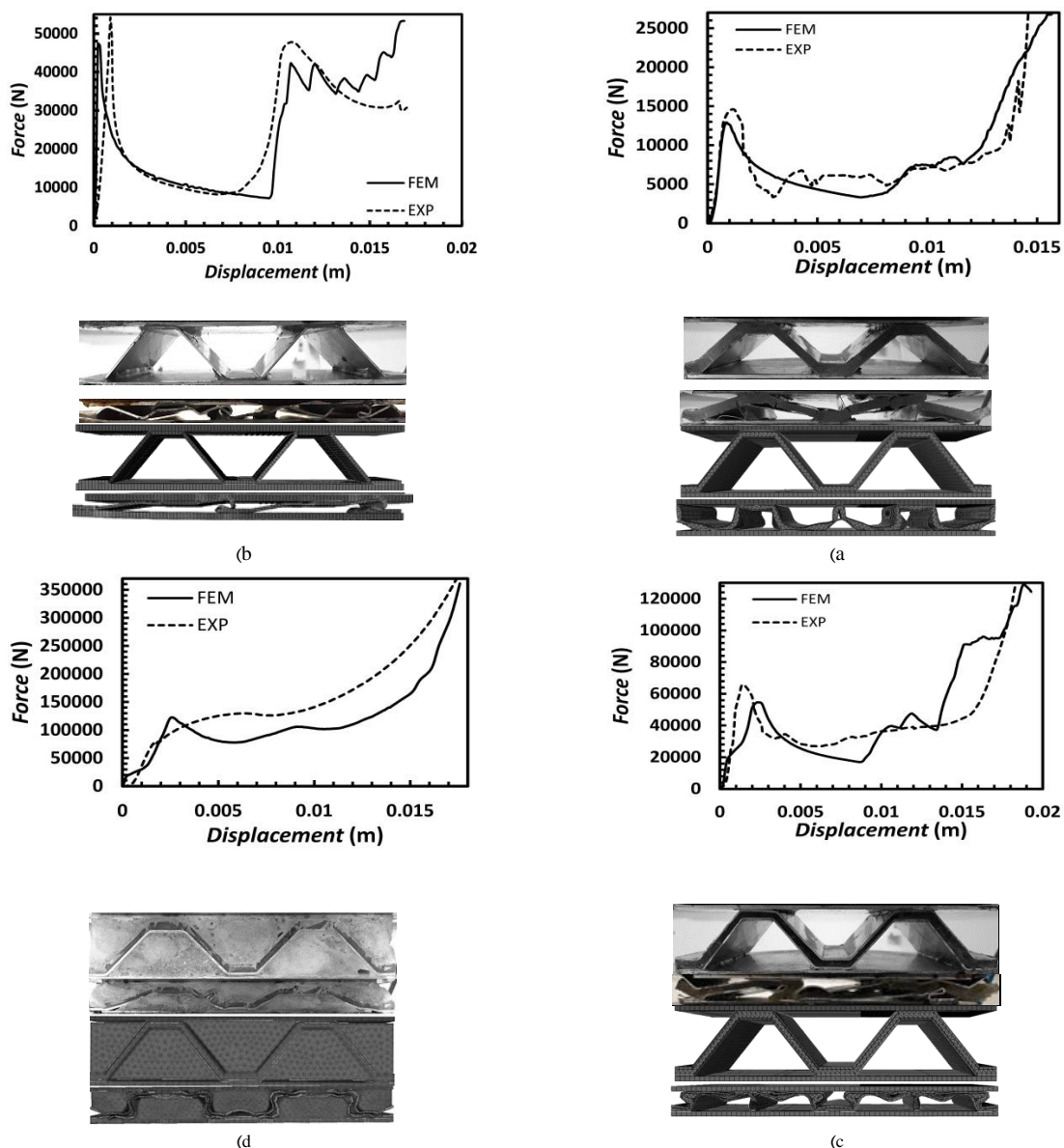


Fig. 14 A comparison of numerical and experimental force-displacement curve a) Compound core with a thickness of 0.5mm b) Single core layer c) Compound core with a thickness of 1.1mm d) foam filled Compound core with a thickness of 1.1mm

شکل 14 مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی نیرو-جابجایی الف) هسته مرکب با ضخامت 0.5mm ب) هسته تک لایه ج) هسته مرکب با ضخامت 1.1mm د) هسته مرکب با ضخامت 1.1mm تقویت شده با فوم پلی‌یورت

جدول 4 محاسبه پارامترهای شاخص در جذب انرژی نمونه‌ها

نمونه	$P_{Peak}(N)$	$P_{mean}(N)$	$E_{a-total}(J)_{Exp}$	$E_{a-total}(J)_{Sim}$	Error (%)	X(mm)	η	SEA(J/gr)	$W_m(gr)$
SC	54083.54	23687.978	401.985	402.1022	0.029	16.97	0.43	2.056	195.5
DC-0.5	14588.06	8854.321	140.341	146.5399	4.4	15.85	0.6	0.612	229.1
DC-1	65844.16	56107.978	1026.776	957.0874	-6.7	18.30	0.85	3.73	274.65
DC-1F	122341.2	157053.144	2721.731	2064.728	-24.1	17.33	1.28	7.14	381.1
CF	31812.68	64150.25	1410.664	1125.893	-20.1	21.99	2.01	6.33	222.83

- No. 03, pp. 126–134, 2018.
- [15] Taghipoor H., Noori M.D., “Topology Optimization Study in Energy Absorption of Lattice-core Sandwich Beams under Three-point Bending Test,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 18, No. March, pp. 163–173, 2018.
- [16] Rejab M.R.M., Cantwell W.J., “The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels,” *Compos. Part B Eng.*, Vol. 47, pp. 267–277, 2013.
- [17] Rejab M. R. M., Bachtiar D., Siregar J. P., Paruka P., Fadzullah S. H. S. M., Zhang B., and Cantwell W. J., “The Mechanical Behavior of Foam-filled Corrugated Core Sandwich Panels in Lateral Compression,” in *American Society for Composites Thirty-First Technical Conference*, 2016.
- [18] Mat Rejab M.R., Zaid N.Z.M., Siregar J.P., Bachtiar D., “Scaling Effects for Compression Loaded of Corrugated-Core Sandwich Panels,” *Adv. Mater. Res.*, Vol. 1133, pp. 241–245, 2016.
- [19] Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Jusoh A.F., Bachtiar D., Siregar J.P., Dian Z., “Fracture Behaviours in Compression-loaded Triangular Corrugated Core Sandwich Panels,” Vol. 01041, 2016.
- [20] Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Jusoh A.F., Bachtiar D., Siregar J.P., “Effect of varying geometrical parameters of trapezoidal corrugated-core sandwich structure,” Vol. 01018, 2017.
- [21] Alavi Nia A., Sadeghi M.Z., “The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study,” *Mater. Des.*, Vol. 31, No. 3, pp. 1216–1230, Mar. 2010.
- [22] Zarei Mahmoudabadi M., Sadighi M. A., “A study on the static and dynamic loading of the foam filled metal hexagonal honeycomb - Theoretical and experimental,” *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 530, No. 1, pp. 333–343, 2011.
- [23] Division U.T., “OPERATIONAL BENEFITS OF ELECTRONIC TOLL COLLECTION : CASE STUDY” Vol. 3, No. December, pp. 467–477, 1997.
- [24] Company G. P. M., “Rigid Polyurethane Foam,” Last-A-Foam FR-3710, Last-A-Foam FR-3720, 2017.
- [25] Whisler D., Kim H., “Experimental and simulated high strain dynamic loading of polyurethane foam,” *Polym. Test.*, Vol. 41, pp. 219–230, 2015.
- [26] GraciaNo C., Martínez G., Smith D., “Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes,” *Thin-Walled Struct.*, Vol. 47, No. 8–9, pp. 953–961, 2009.

7- فهرست علائم

مدول الاستیک	E
ظرفیت جذب انرژی جاذب	E_d
طول نمونه	L
نیروی میانگین	P_m
نیروی پیک اولیه	P_{peak}
انرژی جذب شده بر واحد وزن جاذب	SEA_d
وزن نمونه	W_m
ضریب شکل	η
ضخامت هسته	t
تنش	σ
علائم یونانی	
زاویه یال در سلول هسته موجدار (درجه)	θ

8- مراجع

- [1] Guruprasad S. and Mukherjee A., “Layered sacrificial claddings under blast loading Part I * analytical studies,” *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 24, pp. 975–984, 2000.
- [2] Guruprasad S. and Mukherjee A., “Layered sacrificial claddings under blast loading. Part II - experimental studies,” *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 24, no. 9, pp. 975–984, 2000.
- [3] Molatefi H. M. H., “Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 15, pp. 177–185, 2014.
- [4] Shen J., Lu G., Zhao L., Qu Z., “Response of Curved Sandwich Panels Subjected to Blast Loading,” *J. Perform. Constr. Facil.*, Vol. 25, No. 5, pp. 382–393, 2011.
- [5] Kiliçaslan C., Güden M., Odaci I.K., Taşdemirci A., “The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures,” *Mater. Des.*, Vol. 46, pp. 121–133, 2013.
- [6] Kiliçaslan C., Güden M., Odaci I.K., Taşdemirci A., “Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches,” *Thin-Walled Struct.*, Vol. 78, pp. 70–78, 2014.
- [7] Kılıçaslan C., Odac I.K., Taşdemirci A., Güden M., “Experimental testing and full and homogenized numerical models of the low velocity and dynamic deformation of the trapezoidal aluminium corrugated core sandwich,” *Strain*, Vol. 50, No. 3, pp. 236–249, 2014.
- [8] Yahaya M.A., Ruan D., Lu G., Dargusch M.S., “Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact - An experimental study,” *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 75, pp. 100–109, 2015.
- [9] Nurick G.N., Langdon G.S., Chi Y., Jacob N., “Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast - Part 1: Experiments,” *Compos. Struct.*, Vol. 91, No. 4, pp. 433–441, 2009.
- [10] Wadley H.N.G., Borvik T., Olovsson L., “Deformation and fracture of impulsively loaded sandwich panels,” *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 61, No. 2, pp. 674–699, 2013.
- [11] Pirmohammadi N., Liaghat G.H., Pol M.H., Sabouri H., “Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 5, pp. 153–164, 2014.
- [12] Pirmohammadi N., Liaghat G.H., Pol M.H., “Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 4, pp. 21–26, 2014.
- [13] Feli S., “Analytical investigation of perforation of aluminum – foam sandwich panels under ballistic impact,” Vol. 13, No. 6, pp. 1–8, 2012.
- [14] Taghipoor H., Noori M.D., “Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 18,

